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



École Nationale Polytechnique
École Doctorale « Ingénierie et Environnement »
Option
Construction et Environnement

Mémoire de Magister

Présenté par :

Mahfoud TOUHARI

Ingénieur d'Etat en Génie Civil de l'Ecole Nationale Polytechnique

Thème

**INFLUENCE DU RENFORCEMENT PAR MATERIAUX
COMPOSITES DE FIBRES DE CARBONE SUR LE
COMPORTEMENT D'UN PONT A POUTRES EN BETON**

La soutenance aura lieu le Lundi 24-Mai-2010 à 10h, à la bibliothèque, devant le jury composé de :

Présidente :	Mme R.KETTAB	Maître de conférences/ENP
Promoteur :	Mr A.BALI	Professeur /ENP
Examineurs :	Mr S.KENAI	Professeur /Université de BLIDA
	Mr K.SILHADI	Maître de conférences/ENP
Invité :	Mr M.ABDESSEMED	Chargé de cours/Université de BLIDA

Promotion 2010

تتميز تقنيات الترميم والتقوية باستعمال ألياف الكربون ببساطتها وفعاليتها، والمواد المستعملة بمقاومتها العالية للشد ومقاومتها الجيدة للتآكسد. استعمال هذه المواد لتقوية المنشآت الفنية والبنائيات جد حديث، ودراسات عديدة قد أنجزت عبر العالم لمعرفة سلوك العناصر المقواة بهذه المواد المركبة.

والهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تحقيق النمذجة الرقمية لجسر من الخرسانة مقوى بالمواد المركبة. دراسة رقمية تتألف في المقام الأول في النمذجة الرقمية لعوارض من الخرسانة المسلحة والتي قويت من نسيج قائم على ألياف الكربون و هذا من خلال استخدام البرنامج ANSYS لكي نقوم بمقارنة النتائج المحصل عليها مع النتائج التجريبية المنجزة بمخبر البناء و البيئة بالمدرسة الوطنية المتعددة التقنيات. الجزء الثاني من هذه الدراسة يتمثل في نمذجة جسر من الخرسانة مقوى بألياف الكربون من المواد المركبة (CFRP). بينت هذه الدراسة أن استعمال المواد المركبة له تأثير جد مفيد للحد من انخفاض في انحناء وتشوهات العوارض من الخرسانة المسلحة، كذلك استيعاب التأثير الديناميكي على الجسور. في الأخير قمنا بمقارنة هذه النتائج بالنتائج المحصل عليها تجريبيا بالاهتزازات المكتتفة.

الكلمات المفتاحية: تقوية، مواد مركبة، ألياف الكربون، نمذجة رقمية.

Résumé

Les techniques de réparation et renforcement par collage de composites de fibres de carbone se caractérisent par leur simplicité de mise en œuvre et leur efficacité. L'application de ces matériaux pour le renforcement des ponts est très récente, et plusieurs études ont été réalisées sur le comportement d'éléments renforcés par ces composites à travers le monde.

L'objectif principal de cette étude est de réaliser une modélisation numérique d'un pont en béton renforcé par matériaux composites. L'étude numérique consiste en premier lieu en une modélisation des poutres en béton armé renforcées par un tissu à base de fibre de carbone par l'utilisation du logiciel ANSYS, afin de les comparer avec les résultats des essais expérimentaux réalisées au laboratoire LCE de l'Ecole Nationale Polytechnique. La deuxième partie de l'étude consiste en une modélisation d'un pont renforcé par matériaux composites à base de fibre de carbone (CFRP). Cette étude a montré l'effet bénéfique des matériaux composites sur la réduction des flèches et les déformations dans les poutres en béton armé, ainsi que l'absorption des effets dynamiques sur ce pont étudié. Finalement, nous avons comparé les résultats obtenus par la modélisation aux ceux des essais par vibrations ambiantes.

Mots clés: Renforcement, matériaux composites, fibres de carbone, modélisation numérique.

Abstract

Repair and reinforcement technics by bonding of composites materials of carbon fibers are characterized by their simplicity of emplacement and their efficacy, and materials used by their strength at high tensile and their good strength of corrosion. The application of these materials for the reinforcement of bridges and buildings is very recent and many studies are realized on the behavior of reinforced elements by these composites.

The main object of this study is to achieve a numerical modeling of Reinforced Concrete Bridge by composites materials. The numerical study consists primarily in the modeling of reinforced concrete beams strengthened by a tissue-based carbon fiber by using the software ANSYS, to compare with the results of the experiments conducted in the laboratory CEL of National Polytechnic School. The second part of the study is a modeling of a bridge reinforced by Carbone Fibers polymer (CFRP). This study showed the beneficial effect of composites on the reduction of arrow and strains in concrete steel beams, and the absorption dynamic effects on the bridge study. Finally, we compared the results obtained by modeling with those of ambient vibration tests.

Keywords: Reinforcement, composites materials, carbone fibers, numerical modeling.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier et en premier lieu mon Dieu le Tout Puissant et Miséricordieux qui m'a donné la force, la volonté et le courage à mener à bonne fin ce travail, ainsi que je remercie mes très chers parents et mes très chère frères pour toute l'aide et le soutien qu'ils m'ont offert tout au long de mes études.

Mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance vont à mon Directeur de thèse le Pr. A. BALI et mon Co-Directeur de thèse Mr M. ABDESSEMED pour leurs dévouements, leurs conseils et leurs soutiens moral et matériel tout le long de l'élaboration de ce travail.

Les membres du jury à savoir : Mme KETTAB, Mr K.SILHADI et Mr S.KENAI dont la présence donne une dimension supplémentaire à ce travail. Je vous prie d'accepter du fond du cœur mes remerciements et toute ma reconnaissance.

Je n'oublie pas de remercier Mr BENYAMINA Smain, CHABANE Toufik, ABDESSEMED Abdennour, et ZOURDANI Lyes qui m'ont aidé dans la partie Numérique.

Table Des Matières

INTRODUCTION GENERALE

1 Introduction	1
2 Objectifs de l'étude	2
3 Présentation de l'étude	2

CHAPITRE I : PATHOLOGIE DES PONTS

I.1 Introduction.....	3
I.2 Phases de dégradation	3
I.3 Conséquences des dégradations	3
I.4 Processus de dégradation des ouvrages en béton armé.....	4
I.4.1 Dégradation des Matériaux	5
I.4.2 Dégradation due aux erreurs de conception ou d'exécution	5
I.5 Les dégradations dues à la corrosion des armatures	9
I.5.1 Introduction	9
I.5.2 Origines et mécanismes des désordres dus à la corrosion.....	10
I.6 Moyens et procédures de diagnostic des désordres dans les ponts	11
I.6.1 Introduction	11
I.6.2 Moyens de diagnostic	12
I.6.3 Procédures de diagnostic	13
I.6.4 Recherche de la qualité des matériaux	14
I.7 Conclusion	15

CHAPITRE II: MATERIAUX COMPOSITES

II.1 Généralités sur les matériaux composites.....	16
II.1.1 Définitions	16
II.1.1.1 Matériau composite	16
II.1.1.2 Matrice.....	17
II.1.1.3 Renfort.....	17
II.1.1.4 Stratifié (laminé).....	17
II.2 Les Matrices et les Fibres	18
II.2.1 Les matrices	18
II.2.2 Les fibres	19

II.3 Renforcement des poutres par matériaux composites de fibres de carbone	21
II.3.1 Généralités	21
II.3.2 Comparaison avec les autres fibres de renforcement	21
II.3.3 Comparaison avec les matériaux métalliques.....	21
II.3.4 Procédés de Renforcement	22
II.3.5 Renforcement en flexion	25
II.3.6 Renforcement au cisaillement	26
II.4 Utilisations industrielles des composites à base de fibres de carbone dans différent Pays	27
II.5 Conclusion	29

CHAPITRE III : DIFFERENTES TECHNIQUES DE REPARATION ET DE RENFORCEMENT DES PONTS

III.1 Introduction	30
III.2 Différentes techniques de réparation et de renforcement des structures en béton armé	30
III.2.1 Méthodes non structurales de réparation et de renforcement.....	30
III.2.1.1 Préparation de la surface de béton.....	30
III.2.1.2 Protection des armatures	31
III.2.1.3 Réparation du béton dégradé par apport de matériaux.....	31
III.2.2 Méthodes structurales de réparation et de renforcement.....	32
III.2.2.1 Béton projeté	32
III.2.2.2 Ajout d'armatures.....	33
III.2.2.3 Renforcement des structures à l'aide de tôles métalliques collées.....	34
III.2.2.4 Renforcement des structures à l'aide de plaques composites collées	35
III.2.3 Utilisation les matériaux composites pour renforcer les ponts en béton armé.....	36
III.2.3.1 Renforcement par collage de tissus de fibre de carbone	36
III.2.3.2 Remplacement des tôles métalliques par des fibres de carbone.....	36
III.2.3.3 Utilisation des joncs composites pour armer les structures en béton	37
III.2.3.4 Renforcements parasismiques au moyen de matériaux composites.....	39
III.3 Modélisation numérique du comportement des poutres et des ponts.....	40
III.3.1 Introduction	40
III.3.2 Renforcement des poutres	41
III.3.3 Renforcement d'un pont.....	46
III.4 Conclusion.....	49

CHAPITRE IV : MODELISATION NUMERIQUE DES POUTRES EN BETON ARME RENFORCEES PAR MATERIAUX COMPOSITES DE FIBRES DE CARBONE 'CFRP'

IV.1 Introduction	50
IV.2 Présentation du logiciel "ANSYS" et principe du choix.....	51
IV.3 Non linéarité des structures	53
IV.3.1 Types de non-linéarités	53
IV.3.2 Solution par les itérations de Newton-Raphson.....	54
IV.4 Modélisation des poutres renforcées par matériaux composites.....	55
IV.4.1 Introduction.....	55
IV.4.2 Modélisation par éléments finis	56
IV.4.2.1 Le béton.....	56
IV.4.2.2 L'acier.....	60
IV.4.2.3 Matériaux composites	62
IV.4.3 Analyse numérique	64
IV.4.3.1 Géométrie.....	64
IV.4.3.2 Ferrailage	65
IV.4.3.3 Modes de renforcement modélisés.....	65
IV.4.3.4 Discrétisation par éléments finis	66
IV.4.3.5 Chargement et condition aux limites	67
IV.5 Résultats Numérique et discussion	68
IV.5.1 Poutre en béton armé non renforcée	68
IV.5.2 Résultats obtenus par ANSYS pour la poutre en BA renforcée CFRP.....	70
IV.5.3 Comparaison entre la poutre renforcée et la poutre de référence.....	72
IV.5.3.1 Comparaison Numérique/Numérique	72
IV.5.3.2 Confrontement Numérique/Expérimentale	73
IV.6 Conclusion	75

HAPITRE V : MODELISATION DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE D'UN PONT EN BETON AVANT ET APRES LE RENFORCEMENT

V.1 Introduction	77
V.2 Modélisation du comportement dynamique d'une poutre en BA renforcée par CFRP	78
V.2.1 Introduction des données dans L'ANSYS.....	78
V.2.2 Résultats obtenus et discussion	81

V.3 Modélisation du comportement dynamique d'un pont en béton avant et après renforcement	85
V.3.1 Introduction	85
V.3.2. Description du cas d'étude et diagnostic	85
V.3.3 Introduction des données dans l'ANSYS	83
V.4 Résultats obtenus et discussion	85
V.5 Comparaison entre les fréquences adoptées pour les deux ponts.....	92
V.5.1 Comparaison avec d'autre recherche	92
V.5.2 Confrontement Numérique/Expérimentale	92
V.6 Conclusion.....	93

CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMANDATIONS

1 Introduction	95
2 Conclusions generales	95
3 Recommandations	96

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 Caractéristiques essentielles des fibres de verre [1].	19
Tableau II.2 Caractéristiques essentielles des fibres de carbone [5].	20
Tableau III.1 <i>Renforcement des poutres d'essai</i> [16].	42
Tableau III.2 <i>Caractéristiques du béton</i> [16].	43
Tableau III.3 <i>Propriétés matérielles des matériaux utilisés</i> [21].	47
Tableau IV.1 <i>Processeurs disponibles dans le logiciel ANSYS 11</i> [32].	50
Tableau IV.2 <i>Propriétés du béton</i>	58
Tableau IV.3 <i>Propriétés de l'acier (l'élément link 8)</i>	60
Tableau IV.4 <i>Différentes propriétés du matériau composite (solide 46)</i> .	63
Tableau IV.5 <i>Nombre des éléments discrétisés</i>	66
Tableau V.1 <i>Propriétés mécaniques des matériaux</i>	76
Tableau V.2 <i>Fréquences modales de la poutre avant et après renforcement</i>	79
Tableau V.3 <i>Fréquences modales du pont avant et après renforcement</i>	86
Tableau V.4 <i>Comparaison entre les résultats obtenus par ANSYS et SAP2000</i>	89
Tableau V.5 <i>Comparaison entre les résultats ANSYS / Expérimentation</i>	90

LISTE DES FIGURES

Fig I.1 <i>Pile de pont dégradé</i> [20]	3
Fig I.2 <i>Poutre de tablier</i> [20]	5
Fig I.3 <i>Ségrégation due au mauvais de malaxage et coulage</i> [15]	6
Fig I.4 <i>Les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages en béton armé</i> [29].....	8
Fig I.5 <i>Les facteurs d'influence sur la dégradation des ponts</i> [28].....	9
Fig I.6 <i>Effets de la corrosion sur le comportement mécanique de structures corrodées</i> [30].....	10
Fig I.7 <i>Dégradation du pont Front de mer Oran</i> [15].	11
Fig I.8 <i>Organigramme résumant les étapes de diagnostic</i> [25].....	14
Fig I.9 <i>Cristal de chloroaluminate</i> [6]	14
Fig I.10 <i>Spectre EDS associé</i> [6]	14
Fig II.1 <i>Composition d'un matériau composite</i> [2].....	16
Fig II.2 <i>Définition des termes : Pli, couche et stratifier</i> [9 ; 6].....	18
Fig II.3 <i>Collage d'un lit de 2 lamelles</i> [3].....	25
Fig II.4 <i>Courbes charges flèche - influence du nombre de lits de lamelle-</i> [3].....	25
Fig II.5 <i>Configuration des poutres renforcées</i> [11]	27
Fig III.1 <i>Conception du système multicouche</i> [26].	35
Fig III.2 <i>Réparation des poutres du pont de Gagnac-France par matériaux composites</i> [18].....	36
Fig III.3 <i>Renforcement à l'aide de TFC</i> [17].....	36
Fig III.6 <i>Essai de flexion</i> [16].....	41
Fig III.7 <i>Modélisation numérique d'une poutre</i> [16]	43
Fig III.8 <i>Modèle du béton utilisé</i> [16].	43
Fig III.9 <i>Modèle de l'aramide utilisé</i> [16].	44
Fig III.10 <i>Comparaison entre les essais et le calcul numériques</i> [16].....	45
Fig III.11 <i>Géométrie de la poutre</i> [20]	46
Fig III.14 <i>Les positions du chargement du camion le long du tablier (mm)</i> [21].	48
Fig III.15 <i>Modèle élément fini du tablier</i> [21]	49
Fig IV.1 <i>Solution par d'itération de Newton-Raphson (2 incréments de charge)</i> [30].	53
Fig IV.2 <i>Solid 65 à 3D</i> [32].....	55
Fig IV.3 <i>Comportement typique du béton sous un chargement uniaxial</i> [28].	55
Fig IV.4 <i>Diagramme contrainte-déformation simplifié du béton en compression uniaxial</i> [28].57	

Fig IV.5 Courbe contrainte-déformation pour l'acier de renforcement [31].	59
Fig IV.6 Link8 – 3-D spar [32].	59
Fig IV.7 Constituants d'un matériau composite [28].	61
Fig IV.8 Courbe Contrainte – Déformation pour FRP composite [19].	62
Fig IV.9 L'élément solid46 [28].	63
Fig IV.10 Schéma statique de chargement.	64
Fig IV.11 ferrailage de la poutre.	64
Fig IV.12 Mode renforcement de la poutre.	65
Fig IV.13 Connectivité d'élément, (a) connections de l'élément béton et l'acier, (b) connections de l'élément béton et la couche de FRP [36].	66
Fig IV.14 chargement et condition aux limites	67
Fig IV.15 Courbe Force -Flèche au milieu de la poutre Non renforcée	68
Fig IV.16 Déformation de la poutre.	69
Fig IV.17 Variation de la déformation en fonction de la charge	69
Fig IV.18 Poutre renforcée par matériaux composites.	70
Fig IV.19 Courbe Force -Flèche au milieu de la poutre renforcée	71
Fig IV.20 Charge –Flèche poutres renforcée et non renforcée modélisées par ANSYS	71
Fig IV.21 Courbes Charge –Flèche de la poutre Non Renforcée Comparaison Numérique / expérimentale	72
Fig IV.22 Courbes Charge –Flèche de la poutre Renforcée Comparaison Numérique / expérimentale	73
Fig V.1 Propriétés géométrique de la poutre étudiée.	76
Fig V.2 Conditions aux limites des poutres étudiées	77
Fig V.3 Mode de renforcement de la poutre étudiée.	78
Fig V.4 Discrétisation par éléments finis 1. Matériaux composite 2. Acier 3. Béton.	78
Fig V.5 Histogramme des fréquences de poutres	80
Fig V.12 Vue d'ensemble du pont [33].	83
Fig V.13 Propriétés géométrique du pont.	84
Fig V.14 Maillage du modèle.	84
Fig V.15 Condition aux limites	85
Fig V.17 Histogramme des fréquences de poutres	86

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

CFRP: Carbon fiber reinforced plastic.

E : Module élastique (module de Young)

E_e : Module élastique de béton

E_s : Module élastique d'acier

E_0 : Module d'élasticité initial du béton

F_e : Charge agissant sur la matrice

F_m : Charge agissant sur les fibres

F_r^* : Charge ultime

F_r^8 : Charge ultime de la température ambiante

F_r^b : Charge ultime après cycles mouillages - séchages

f_{ct} : Résistance maximale du béton tendus.

f_y : Limité élastique des aciers

f_i : La fréquence propre associée au vecteur propre \mathbf{x}_i .

f_U : Résistance ultime de l'acier.

f_t : Résistance à la traction du béton.

FRP : Fiber reinforced polymer

GFRP : Glass fiber reinforced plastic.

G : Module de cisaillement du béton

G_a : Module de cisaillement de la couche adhésif

G_f : Énergie de rupture

I : Moment d'inertie

K : La matrice de raideur

M : La matrice de masse

MEF : Méthode des éléments finis

q : Le vecteur des degrés de liberté.

T.F.C : Tissu de fibres de carbone.

ω_i : La pulsation propre associée au vecteur propre \mathbf{x}_i .

\mathbf{x}_i : Vecteur propre

u : Déplacement.

β_i : Coefficient de transfert de cisaillement

ν : Coefficient de poisson

ε_{c2} : Déformation du béton

ε_{cu} : Déformation maximal du béton comprimé.

ε_{ct} : Déformation ultime du béton comprimé.

ε_{ctu} : Déformation maximale du béton tendus.

ε_ε : Déformation ultime du béton tendus.

ε_f : Déformation élastique de l'acier.

ε_f : Déformation des fibres.

ε_0 : Déformation maximale de la compression du béton.

ε_u : Déformation ultime de la compression du béton

ε_t : Déformation à la traction

ρ : Masse volumique

σ : Contrainte normale contrainte des fibres.

σ_f : Contrainte composites

σ_m : Contrainte du béton.

σ_c : Contrainte maximale de la compression du béton

τ : Contrainte tangentielle.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

1. INTRODUCTION

Les ouvrages en béton armé peuvent être endommagés durant leur durée de vie par vieillissement des matériaux ou par modification des conditions d'exploitation. Plusieurs facteurs font qu'il peut être nécessaire de renforcer ou de réparer un ouvrage : la corrosion des aciers d'armatures, la fissuration du béton, des changements d'affectation qui imposent de nouvelles charges, un mauvais dimensionnement, l'évolution des normes, l'endommagement par un tremblement de terre, la prolongation de la durée de vie d'un ouvrage, etc.

Les méthodes de renforcement classique, par exemple l'augmentation de section par l'ajout de nouvelles barres d'armatures et d'un nouveau béton lié à l'ancien ouvrage, sont souvent très complexes à réaliser, très onéreuses, et nécessitent une intervention lourde sur la structure. Grâce aux progrès effectués dans le domaine des adhésifs au milieu du siècle passé, une nouvelle option se présentait aux ingénieurs : le renforcement de structure par collage externe. Dès le milieu des années soixante, est apparu en Afrique du sud le premier cas d'ouvrages renforcés par collage de lames d'acier sur des structures en béton. Cette méthode constituait une avancée majeure dans le domaine de la réparation car elle simplifie grandement le travail par rapport aux méthodes traditionnelles. Toutefois, des problèmes de corrosion de l'acier mettaient en péril la sécurité de ce type de renforcement.

Dès lors, les chercheurs ont tentés de trouver des matériaux de substitution qui régleraient ce problème, et se sont tournés vers les matériaux non métalliques, en particulier les FRP (fiber reinforced polymer). Toutefois, cette technique présente quelques désavantages liés à l'acier. En effet, le poids propre de ce matériau est important et il présente une certaine vulnérabilité à la corrosion et aux agressions chimiques [1].

De nos jours, la volonté grandissante de maîtriser notre environnement mène grand nombre d'hommes de sciences, et les ingénieurs en particulier, à se tourner vers des outils sophistiqués qui permettent d'analyser dans le détail les comportements physiques des matériaux. Les éléments finis, avec des programmes de calcul extrêmement puissants tels ANSYS, ADINA, SAP2000, sont à même de répondre à ces attentes et sont actuellement utilisées dans de nombreux domaines.

Plusieurs ponts et ouvrages ont été réparés et/ou renforcés par matériaux composites au Canada, Etats-Unis, Japon, Asie, Afrique et en Europe. En Algérie, cette technique a

montré son efficacité dans le domaine des ouvrages d'art depuis plus de dix ans puisqu'un nombre important d'ouvrages d'art a été renforcé par des matériaux composites comme le pont sur oued Bill Braguettz à Constantine, le pont blanc d'El Harrach, le pont d'Ighezer Amokrane à Béjaia, et le pont sur Oued Oumazer à Tipaza [27].

2. OBJECTIF DE L'ETUDE

Le patrimoine algérien d'ouvrages d'art est composé d'un nombre significatif de structures à réhabiliter, puisque plus de 40 % de ces ouvrages ont plus de 40 ans et nécessitent des réparations à court et moyen termes. Le renforcement de ces ouvrages nécessite un savoir faire et un bon choix de la méthode de réhabilitation [33]. Parmi les méthodes de renforcement qui représente une solution alternative des méthodes existantes (chemisage, ajout de force, tôles colles), celle appelée coulage de matériaux composites par fibres de carbone (CFRP).

Le but principal de cette étude est de contribuer à la compréhension et la maîtrise de l'influence du renforcement par CFRP sur le comportement statique et dynamique d'un pont à poutres en béton. Une modélisation par éléments finis est proposée, avec le logiciel ANSYS, afin de les comparer aux résultats obtenus par le modèle SAP2000 et l'expérimentation.

3. PRESENTATION DE L'ETUDE

Après une introduction générale, les chapitres I, II et III donnent une synthèse bibliographique sur la pathologie des ponts en béton armé, les différentes propriétés et domaines d'utilisation des matériaux composites, et les différentes techniques de réparation et de renforcement des ponts.

Le quatrième chapitre présente une synthèse sur la modélisation numérique par la méthode des éléments finis (MEF) basée sur le logiciel **ANSYS 11** pour simuler le comportement d'une poutre en béton armé renforcée par matériaux composites à base de fibres de carbone. Le cinquième chapitre comporte l'analyse dynamique d'un pont en béton renforcé par matériaux composites à base de fibres de carbone. Enfin une conclusion générale et des recommandations pour d'éventuelles futures recherches sont données.

CHAPITRE I

PATHOLOGIE DES

PONTS

CHAPITRE I : PATHOLOGIE DES PONTS

I.1 Introduction

Dans les ponts et les ouvrages d'art, il apparaît que les zones les plus sensibles soient les tabliers, les appuis en superstructure, et les équipements de tablier où l'influence des sels de déverglaçage est importante [20].



Fig I.1 Pile de pont dégradé [20]. **Fig I.2** Poutre de tablier [20]

I.2 Les phases de dégradation

La dégradation du béton armé comporte deux phases successives [20] :

- Une phase d'incubation ou de latence (dite parfois d'amorçage) qui correspond à l'altération lente du béton, sans que ne se produisent encore des effets visibles,
- Une phase de développement (dite parfois de croissance) des dégradations du matériau.

La phase d'incubation s'arrête [20]:

- Soit lorsque les produits formés par les réactions internes du ciment atteignent un "volume critique" provoquant un gonflement néfaste du béton (par exemple, par réaction sulfatique),
- Soit lorsque l'enrobage de béton ne protège plus les aciers contre la corrosion (par exemple, si l'enrobage est carbonaté).

I.3 Conséquences des dégradations

I.3.1 L'aspect de l'ouvrage

Les efflorescences et les taches de rouille conséquence de la pénétration d'agents agressifs dans l'enrobage de béton, altèrent l'aspect de l'ouvrage. Ce point est parfois considéré comme

étant de peu d'importance, par le gestionnaire des ouvrages. Par contre, ce sont les fissurations et les fracturations du béton qui commencent à inquiéter le gestionnaire, car des éclats de béton peuvent se produire.

I.3.2 La sécurité vis-à-vis des usagers

Les éclats de béton présentent un risque pour les personnes qui circulent près de l'ouvrage. Leur prévention et leur élimination doivent donc être traitées avec soin.

I.3.3 La stabilité de la construction

Des essais effectués sur des éprouvettes ont permis d'estimer les valeurs des forces d'adhérence pour des éléments en béton dont les armatures sont corrodées. Il est apparu que ni la qualité du béton, ni le rapport enrobage/diamètre d'armature n'influe sur la force résiduelle d'adhérence, même si l'enrobage est fissuré par la corrosion de l'armature sans qu'il ne soit détruit par éclatement.

En ce qui concerne les moments fléchissants et les efforts tranchants, une recherche expérimentale a porté sur l'effet de la corrosion sur ces grandeurs mécaniques. Elle a montré que pour prévoir de façon conservatrice la tenue des éléments en béton armé, il suffit d'appliquer les modèles de calculs classiques, en considérant la section réduite des armatures ainsi que la section réduite du béton. Ainsi, tant que les diminutions de section des armatures restent faibles et que l'enrobage reste cohésif, la corrosion de ces armatures ne modifie pas significativement la tenue à la flexion ou au cisaillement. Mais lorsque la corrosion a atteint un stade avancé, des calculs plus précis doivent être faits pour évaluer la tenue résiduelle de l'ouvrage.

I.4 Processus de dégradation des ouvrages en béton armé

Pour évaluer la durabilité d'un béton, il est nécessaire de connaître les mécanismes susceptibles de conduire à sa dégradation, et d'étudier la résistance du matériau vis-à-vis de ses dégradations.

Si l'on exclut, d'une part les événements accidentels, et d'autre part les effets à long terme des sollicitations mécaniques, tels que la fatigue due à des sollicitations répétées ou le fluage pouvant engendrer des pertes de précontrainte ou encore l'abrasion, la durée de vie des ouvrages en béton armé peut être limitée par:

I.4.1 Dégradation des Matériaux

Les propriétés physiques et, plus particulièrement, le comportement mécanique du béton et des aciers sont susceptibles de se dégrader en fonction des conditions d'environnement définies par la localisation géographique de l'ouvrage. Les principales causes de vieillissement sont liées aux phénomènes suivants [28]:

- Chocs, érosion, abrasion : principalement sur les ouvrages se situent en milieu maritime ;
- Action des cycles de gel-dégel : dans les régions à climat froid ;
- Altération physico-chimique du béton : dans les milieux agressifs ;
- Retrait du béton : principalement dans les environnements chauds et secs ;
- Corrosion des armatures métalliques par manque d'enrobage, par carbonatation ou par attaque aux chlorures.

I.4.2 Dégradation dûe aux erreurs de conception ou d'exécution

Ce type de désordres peut être induit par des erreurs intervenant soit au stade du dimensionnement de l'ouvrage, soit au stade de son exécution.

Dans le premier cas, les causes de fissuration et de dégradation sont dues à des hypothèses erronées au niveau des conditions de chargement, d'environnement, ou de fonctionnement de l'ouvrage. Ces erreurs sont à l'origine, généralement, d'un mauvais dimensionnement des sections et d'une disposition non satisfaisante des armatures qui se traduisent par des localisations de fissures ou des ruptures non acceptables. Parmi les conditions particulièrement mal évaluées, il est possible de faire état de l'action des gradients de température sur un ouvrage, de la mauvaise estimation des efforts de précontrainte due à des erreurs de tracé mais aussi à des données erronées sur la relaxation des câbles et sur leur interaction avec la structure (frottement). Un mauvais dimensionnement des cadres et de leur espacement pour reprendre les efforts tranchants en béton armé est à l'origine de fissurations des ouvrages qui nécessitent une réhabilitation immédiate [11].

Des enquêtes statistiques, menées par le bureau Sécuritas de la SOCOTEC en France sur 2979 dossiers de structures en béton, ont montré que le nombre total de sinistres dûs à des erreurs de conception ou d'exécution est comme suit [29]:

✚ *Erreurs d'exécution et de réalisation*

En plus des spécifications données par le concepteur, il est important de considérer la mise en œuvre, car une mise en place incorrecte peut entraîner différents problèmes : ségrégation, adhérence déficiente entre les différentes couches de béton, défaut de surface, dommages aux coffrages ou à l'armature, fissuration, etc. Comme les tâches effectuées sur chantier sont nombreuses et constituent tout un enchaînement d'opérations, les erreurs rencontrées sont alors classées selon l'opération à exécuter [29]:

➤ *Défauts de mise en place de ferrailage:*

- Non-respect des plans de ferrailage;
- Mauvaise disposition des armatures.

➤ *Défauts de malaxage et de coulage:*

- Un malaxage trop court ;
- Un déchargement très lent des malaxeurs à tambour non inclinable qui cause la ségrégation ;
- Généralement l'équipe sur chantier essaye de couler le béton rapidement, laissant tomber librement le béton surtout lorsqu'on bétonne un élément d'une hauteur importante avec une forte densité de ferrailage, ce qui peut nuire à son homogénéité.



Fig I.3 Ségrégation due au mauvais de malaxage et coulage [15]

➤ *Défauts de coffrage et de décoffrage :*

- L'absence d'écarteurs de coffrage peut engendrer une insuffisance d'enrobage ;
- Un coffrage étanche permet à une partie de ciment de s'échapper ;

- Théoriquement, il faut laisser le coffrage le plus longtemps possible, car il conserve l'humidité nécessaire au mûrissement du béton. Mais en pratique, l'entrepreneur enlève le coffrage le plus rapidement possible pour les employer dans un autre ouvrage. Certains éléments dépendent uniquement des coffrages pour supporter les charges appliquées et leurs propre poids pendant les premiers jours, surtout le cas des éléments soumis à la flexion (les dalles et poutres). Avec un ciment portland normal une période de mûrissement est de l'ordre de 7 jours ; une période plus courte se traduit par une résistance et une durabilité amoindries.

➤ *Défauts de vibration :*

- Une vibration trop brève ou pas assez puissante peut provoquer des défauts d'homogénéité ;
- Une vibration trop forte, au-dessus des barres de diamètres importants placées trop près de la surface induit la fissuration précoce ;
- Une vibration excessive produira une certaine ségrégation dans le mélange particulièrement dans les bétons assez fluides ;

➤ *Défauts de cure :*

- La vitesse d'hydratation étant plus grande durant les premiers jours, c'est à ce moment qu'on a le plus besoin d'un mûrissement (cure) convenable, car l'évaporation de l'eau est très importante si la cure est inadéquate, surtout les éléments minces où le dimension de la surface exposée favorise l'évaporation.
- Fissures dues au : retrait plastique, retrait du au séchage, différences de température et à la combinaison de ces facteurs.

✚ *Erreurs de conception*

- Erreurs dans le bon choix du matériau constituant l'ouvrage.
- Erreurs dans le pré - dimensionnement des éléments.
- Négligence totale de la sismicité de la zone.
- Mauvais choix de la meilleure variante.
- Absence de l'étude comparative technico-économique.
- Structure instable.

✚ Erreurs de calcul (étude)

- Erreurs dans les hypothèses de calcul.
- Erreurs dans l'introduction des données dans un calcul automatique.
- Absence d'études.
- Mauvaise utilisation des règlements.
- Non vérification des états de service (déformations).
- Dessins incomplets ou insuffisants.

L'histogramme de la figure I.4 met en évidence la prépondérance des trois facteurs:

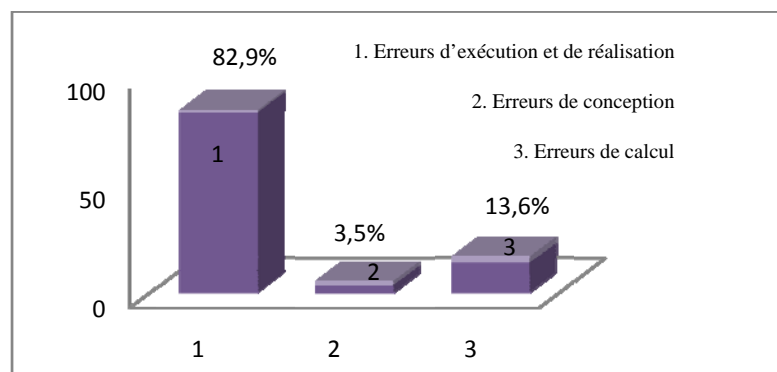


Fig I.4 Facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages en béton armé [29]

➤ Cas des ponts

Les facteurs influençants sur la dégradation des ponts sont illustrés sur l'histogramme de la figure I.5 où on remarque que ces facteurs sont liés aux défauts de conception et aux méthodes d'entretien, avec [28]:

1. Dans 40 % des cas, les facteurs d'influence sont liés aux défauts de conception ;
2. Dans 30 % des cas, les facteurs d'influence sont liés à l'absence d'entretien ;
3. Dans 10 % des cas, les facteurs d'influence sont liés à la mise en œuvre ;
4. Pour les facteurs liés à l'exploitation (8%), en fonction de l'évolution du trafic, ou la modification des charges réglementaires sur essieux, ou de la voirie, il est possible de justifier la nécessité de renforcer ou d'améliorer la portance d'un ouvrage. En plus les ponts sont appelés à être mis en conformité vis-à-vis des sollicitations sismiques ou vis-à-vis de sollicitations accidentelles telles que l'impact de véhicules.
5. Les facteurs liés à l'environnement (l'agressivité du sol et conditions climatiques) (7 %) ;
6. Les facteurs liés à la nature des matériaux (5%).

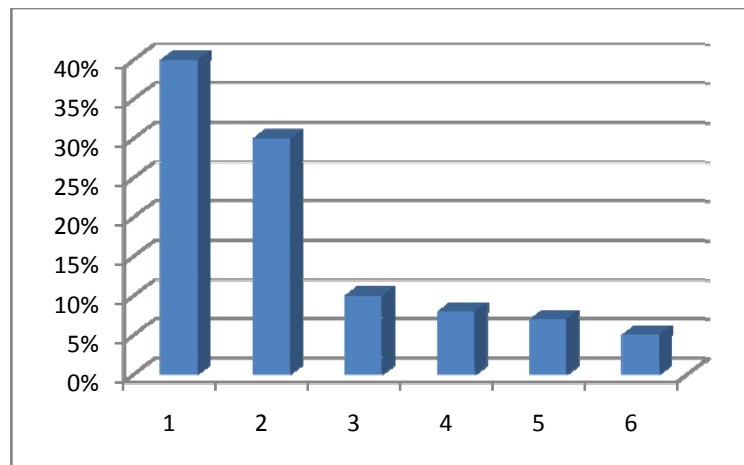


Fig I.5 Facteurs d'influence sur la dégradation des ponts [28]

I.5 Dégradations dues à la corrosion des armatures

I.5.1 Introduction

Au cours des deux dernières décennies, de nombreuses recherches ont été faites sur la corrosion des armatures dans le béton dans l'objectif d'en prédire l'influence. Les effets et conséquences de la corrosion sont divers et peuvent être représentés par la Figure I 6. La réaction de corrosion est un processus électrochimique qui se manifeste par la transformation graduelle du fer en oxydes de fer.

La figure I.6 montre les effets corrélés de la corrosion sur le comportement mécanique de structures corrodées ; la corrosion peut être engendrée par trois facteurs essentiels qui sont la perte de section d'acier, la dégradation de l'interface et l'expansion volumique.

Dans un premier temps, la réaction de corrosion engendre une perte de section d'acier. Cette perte de section se manifeste selon deux phénomènes : soit la corrosion par piqûre (locale), soit par la corrosion généralisée sur toute la longueur de la barre. Dans un premier temps, la corrosion provoque une dégradation de l'interface acier-béton. Cette dégradation fait diminuer l'adhérence entre les deux matériaux. L'expansion volumique des produits de corrosion provoque d'une part, la disparition des nervures et d'autre part, la fissuration du béton de recouvrement. Dans un second temps, ces pertes de section peuvent mener à une diminution de la ductilité et de la résistance des éléments armés.

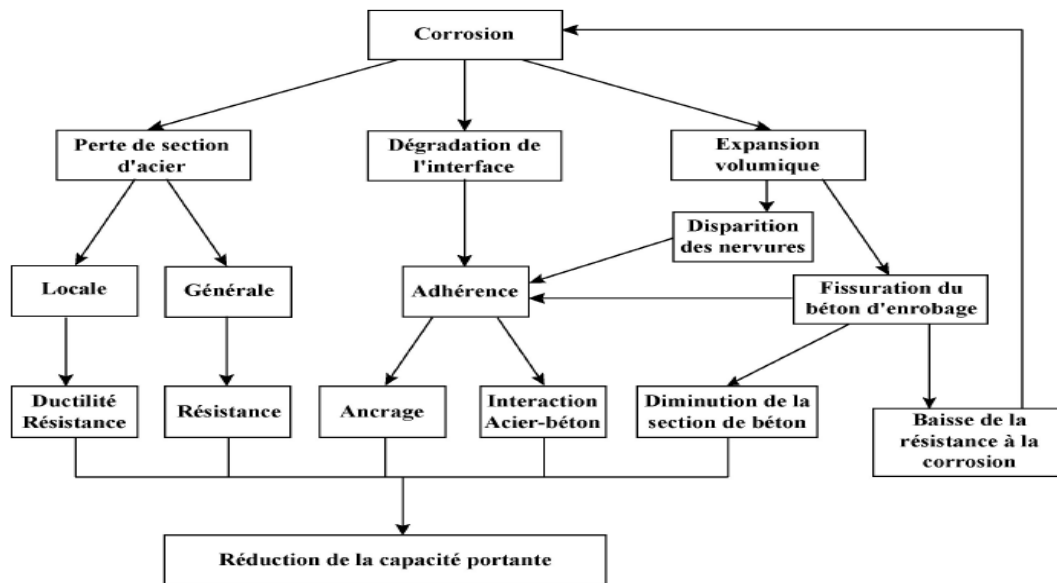


Fig I.6 Effets de la corrosion sur le comportement mécanique de structures corrodées [30]

I.5.2 Origines et mécanismes des désordres dus à la corrosion

I.5.2.1 Les agents corrosifs dans les milieux au contact du béton

La corrosion des armatures d'acier des ponts est un problème coûteux bien connu. En présence de chlorures, d'humidité et d'oxygène, la corrosion progresse assez rapidement. Les produits de corrosion, qui occupent deux fois le volume de l'acier original, exercent des contraintes de traction dans le béton environnant [15].

Les bétons armés sont au contact d'un milieu naturel : atmosphère, eaux ou sols. Ces milieux contiennent souvent des produits qui sont agressifs vis-à-vis du béton ou des armatures. Ainsi, les sulfates contenus par exemple dans l'eau de mer et les eaux séléniteuses peuvent provoquer le gonflement du béton, s'ils sont en quantité suffisante. Mais les agents qui sont à l'origine de la corrosion des armatures sont surtout le dioxyde de carbone et les chlorures.



Fig I.7 Dégradation du pont Front de mer Oran [15].

Le dioxyde de carbone CO_2 pénètre sous forme gazeuse dans le béton. Il provoque une réaction, dite de carbonatation, avec l'eau interstitielle. Le front de carbonatation avance progressivement à partir du parement. Il transforme les hydroxydes [surtout, la chaux $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en carbonate (CaCO_3) et abaisse le PH de la solution interstitielle depuis environ 13 jusqu'à environ 9. Ceci dégrade la passivation des armatures.

Les chlorures dissous dans l'eau (eau de mer, sels de déverglaçage, etc.) pénètrent à partir de la surface du béton. Ainsi, la teneur en chlorure dans le béton a un certain profil. Il s'agit d'une courbe " concentration-profondeur " qui est strictement décroissante, si les cycles humidification-séchage sont négligeables. Dans le cas contraire, ce profil n'est décroissant qu'à partir d'une profondeur où le béton est, de façon permanente, saturé d'eau (l'eau interstitielle ne s'évaporant pas) [14].

I.5.2.2 Les stades de corrosion

Le stade d'incubation de la corrosion correspond à la durée pendant laquelle les agents agressifs (dioxyde de carbone, chlorures) pénètrent dans l'enrobage de béton, sans corroder les armatures. Il s'arrête lorsqu'au niveau des armatures, la teneur en agent agressif atteint un certain seuil. La figure ci-après illustre ces stades de dégradation par corrosion due à des agents agressifs venant du milieu environnant. Dans le cas de la carbonatation, ce seuil correspond au fait que les armatures se trouvent dans un béton carbonaté et suffisamment humide.

Dans le cas des chlorures, le béton étant alors généralement humide et oxygéné, le seuil correspond très approximativement à un taux de 0,4% par rapport au poids de ciment. Cette valeur correspond à un rapport de concentrations $[\text{Cl}^-]/[\text{OH}^-]$ compris entre 0,6 et 1, suivant les ciments. Pendant le stade de développement de la rouille, la vitesse de dissolution (corrosion) de l'acier est significative. La rouille formée est le plus souvent gonflante et provoque une désagrégation de l'enrobage, par épaufrure, éclatement ou fissuration [14].

I.6 Moyens et procédures de diagnostic des désordres dans les ponts

I.6.1 Introduction

Le choix et application des produits de réparation et de protection des ponts en béton définissent six étapes dans le processus conduisant à une action de réparation. Le diagnostic intervient dans les deux premières étapes de ce processus.

La première étape, appelée « étape de mise en évidence de la dégradation », peut être déclenchée par une opération de surveillance, une opération d'entretien, ou à la suite d'un événement accidentel (chute de morceaux de béton par exemple). Elle débouche sur le transfert de l'information vers les responsables qui sont ainsi sensibilisés au problème observé.

La deuxième étape est le « diagnostic » proprement dit, ou recherche d'une pathologie à partir des symptômes. Il est demandé dans le cadre [15]:

- d'une étude spécifique,
- de travaux de réfection ou de rénovation, de renforcement,
- d'une inspection régulière mettant en évidence des désordres,
- d'une expertise,
- d'une démarche préventive...

Le diagnostic doit permettre d'obtenir un relevé de tous les désordres, même mineurs, qui affectent le tablier, les appuis y compris la fondation et même les superstructures et les accessoires d'équipement de l'ouvrage de façon à pouvoir traiter la réparation, où le renforcement, globalement et à éliminer, si possible le risque de voir surgir en cours de travaux un vice caché.

I.6.2 Les moyens de diagnostic

Les moyens d'investigation des désordres sont donnés comme suit [20;25] :

- Examen visuel (avoir une lampe de poche, paire de jumelle, appareil photo, un endoscope qui permet d'examiner des gaines de canalisation sans procéder à des travaux de démolition);
- Mesures qui peuvent être faites par : un métré précis, un niveau d'eau, un fil à plomb, un pied à coulisse, des jauges d'épaisseur ou une boussole;
- Contrôle de planéité, de niveau, d'alignement (par un cordeau de maçon, un jeu de règles métallique allant de 0.2 à 2m, un niveau de géomètre pour vérifier les niveaux de pentes et de flèche, ainsi qu'un inclinomètre);
- Examen de fissures, par une loupe graduée pour évaluer les ouvertures de fissure, des fissuromètres pour suivre l'évolution des ouvertures;
- Connaissance du taux d'humidité des matériaux, avec des hydromètres électriques fournis avec des échelles de conversion en tenant compte de la nature des matériaux;

- Mesure de climat et de température ;
- Déterminer la vitesse d'absorption d'eau ;
- Prélèvements d'échantillons en disposant de : burins, marteau, tournevis, jeu de clefs, une pince, scies à bois et métal, quelques seringues, une foreuse, de tampons de coton pour le prélèvement de dépôts;
- Pachomètre permettant d'évaluer l'enrobage du béton.

I.6.3 Procédures de diagnostic

La figure I.8 résume la procédure de diagnostic d'un pont

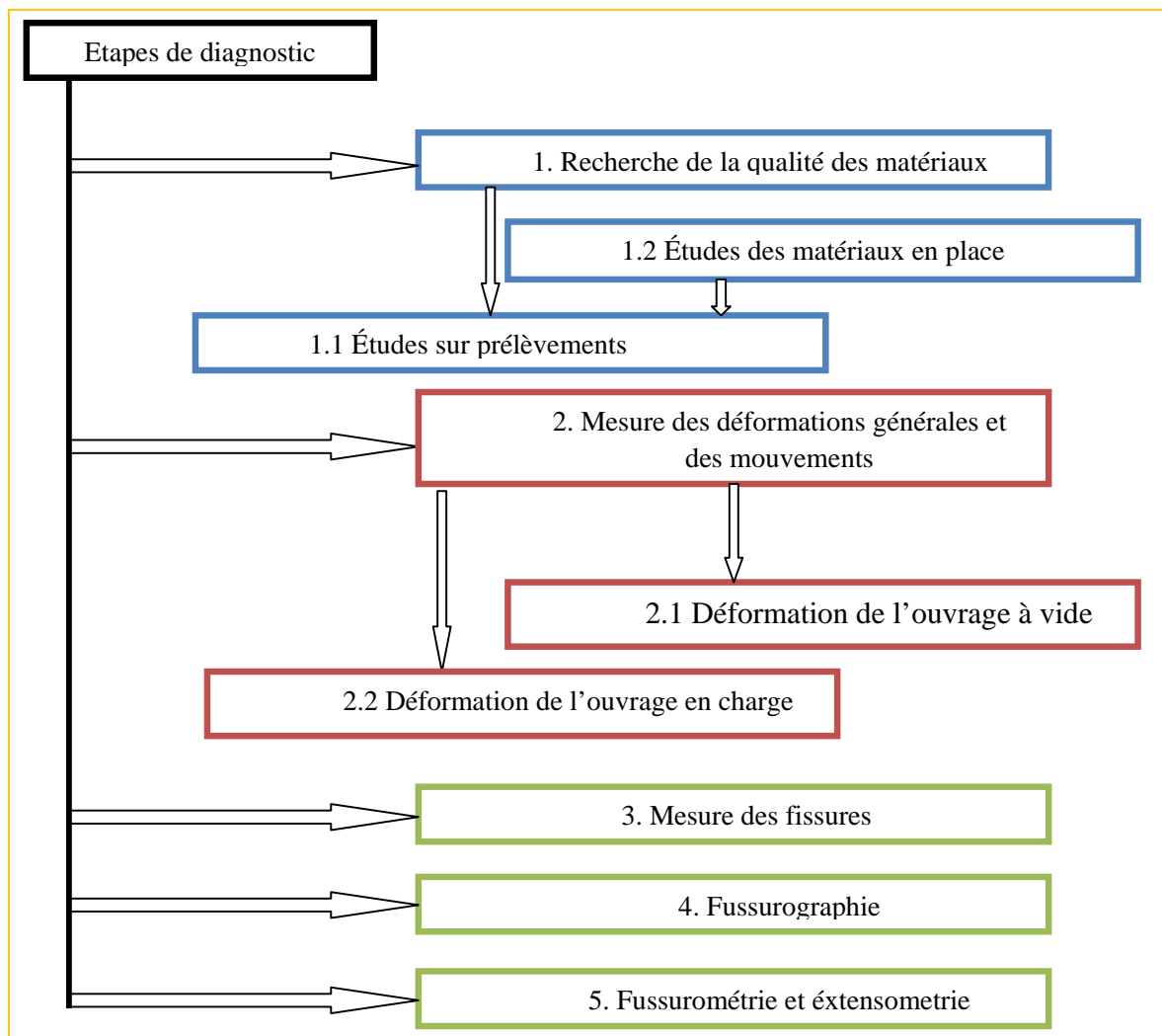


Fig I.8 Organigramme résumant les étapes de diagnostic [25]

I.6.4 Recherche de la qualité des matériaux

I.6.4.1 Les études sur prélèvements

- **Essais mécaniques :** Les essais effectués sur les prélèvements, sont (la compression, la traction...etc.). L'interprétation des résultats est sensible à toutes les constatations qui pourront être faites lors de l'extraction des éprouvettes jusqu'à la fin des essais [20].
- **Essais physiques :** Il s'agit principalement de mesures de densité, mais aussi de porosité, de teneur en eau, etc. on peut aussi appliquer la technique d'auscultation sonore (mesure de la vitesse de propagation d'ondes sonores) [20].
- **Essais chimiques :** Les phénomènes de détérioration chimique sont à bien des égards similaires aux mécanismes de dégradation des bétons par le gel (qui résultent de la formation de la glace dans les pores du matériau)

Dans certains cas, il arrive également que les matériaux cimentaires comme le béton se dégradent simplement par dissolution graduelle de la pâte de ciment hydraté sans que ce phénomène ne s'accompagne nécessairement d'une précipitation de nouvelles phases. C'est notamment le cas pour les structures exposées à d'importants mouvements d'eau. Ceux-ci favorisent le lessivage de certaines phases solides comme la portlandite et les silicates de calcium hydratés (C-S-H), ce qui contribue à augmenter la porosité du matériau et à en réduire les propriétés mécaniques [34].

Les études chimiques et physicochimiques peuvent faire appel à des moyens coûteux (diffraction aux rayons X (DRX), microscopie électronique à balayage (MEB)), (figures I.9 et I.10).

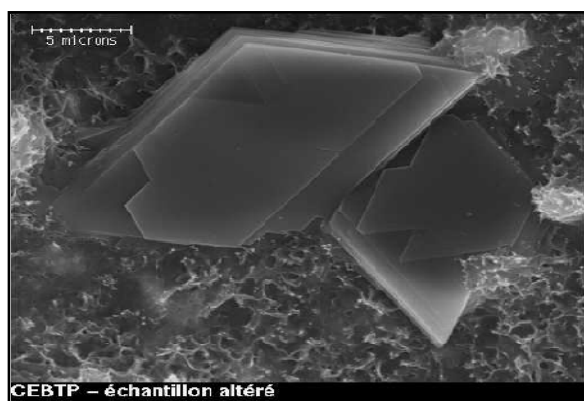


Fig I.9 Cristal de chloroaluminate [6]

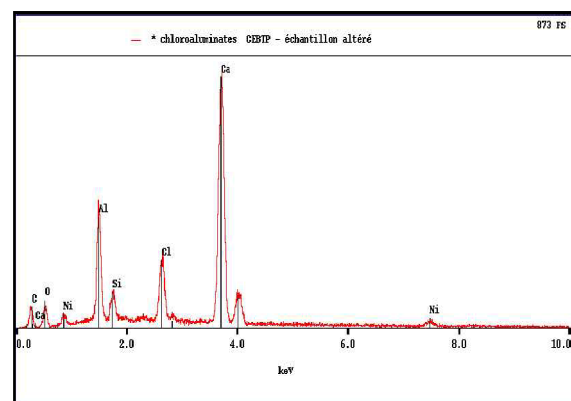


Fig I.10 Spectre EDS associé [6]

I.6.4.2 Mesures des déformations générales et des mouvements

➤ Déformation de l'ouvrage à vide

Des mesures topographiques ou de nivellement permettent, soit d'appréhender les mouvements des appuis ou fondations (tassements différentiels, déplacements), soit d'estimer les déformations permanentes d'un tablier. Il est noté que l'évolution des flèches, ne peut être obtenue qu'à partir de très nombreuses mesures étalées sur une longue période, de façon à éliminer les déformations thermique qui perturbent les résultats [35].

➤ Déformation de l'ouvrage en charge

La comparaison des déformations calculées à celles mesurées, permet d'en déduire le fonctionnement mécanique de l'ouvrage. Il est souhaitable, lorsqu'on fait de telles mesures sur un ouvrage, de reconstituer les essais de réception afin d'obtenir des recoupements [35].

- **Mesures des fissures**

Il s'agit des mesures dont le but est de suivre l'évolution des réactions d'appuis des tabliers en béton précontraint sur les effets des déformations différées gênées. Ces mesures sont effectuées, soit avec l'aide de vérins- plats, type Freyssinet, soit avec l'aide de vérins à piston extra-plats dont la précision, est meilleure [35].

I.7 Conclusion

La gestion du patrimoine est une problématique de plus en plus présente dans le domaine du génie civil. Economiquement, la réhabilitation des ouvrages s'avère généralement plus avantageuse que la reconstruction, d'où l'intérêt croissant que portent les maîtres d'ouvrages aux techniques d'auscultation.

Certains types de désordres ne peuvent pas être étudiés de manière classique (c'est à dire sur des prélèvements). La fissuration du béton armé est particulièrement concernée par ce cas.

CHAPITRE II

MATERIAUX

COMPOSITES

CHAPITRE II: MATERIAUX COMPOSITES

II.1 Généralités sur les matériaux composites

II.1.1 Définitions

II.1.1.1 Matériau composite

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont les performances sont supérieures à celles des composants pris séparément.

Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue, appelée renfort ou matériau renforçant, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue, appelée matrice [1].

Suivant les caractéristiques de la matrice et des renforts, on distingue généralement deux grandes familles : les composites de grande diffusion, peu onéreux, qui occupent une large part du marché et les composites à hautes performances. Ces derniers, généralement renforcés de fibres continues de carbone ou d'aramide, sont réservés à des secteurs de forte valeur ajoutée : aéronautique, médical, sports et loisirs [2].

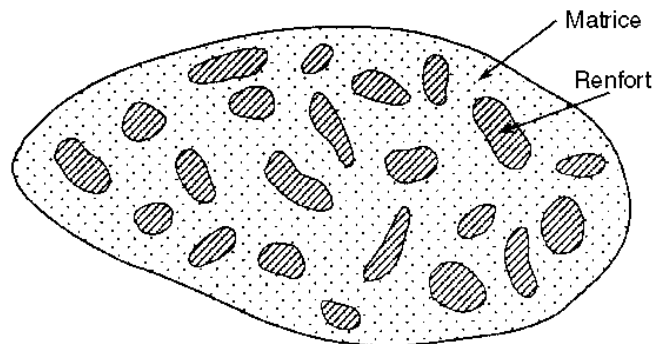


Fig II.1 Composition d'un matériau composite [2].

Il existe deux types de composites [11] :

- **Les composites « de grande diffusion » G.D :**
A un taux de renforcement voisin de 30% (en masse).
- **Les composites « hautes performances » HP :**

A base de fibres longues de verre R, carbone, ou aramide et taux élevés de renfort, supérieurs à 50%.

II.1.1.2 La matrice

La matrice a pour rôle de lier les fibres renforts, répartir les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit.

On peut classer les matrices en trois familles [12] :

- Organiques (thermodurcissables, thermoplastiques)
- Réfractaires (céramiques, verre, carbone)
- Métalliques

II.1.1.3 Le renfort

Le renfort est le squelette supportant les efforts mécaniques. Il peut se présenter sous de nombreuses formes : fibres courtes (mat) ou fibres continues (tissus ou textures multidirectionnelles) en fonction de l'application envisagée. Les fibres possèdent généralement une bonne résistance à la traction mais une résistance à la compression faible.

La fibre renfort, pouvant comporter plusieurs milliers de filaments, apporte donc toujours la tenue mécanique de la structure composite [11].

En fonction de la forme des renforts, les composites sont classés en deux grandes classes :

- Les composites à fibres : constitués de fibres continues ou discontinues (fibres coupées ou courtes). Leur orientation permet de moduler les propriétés mécaniques du matériau et d'obtenir des matériaux isotropes ou anisotropes .
- Les composites à particules : les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux [7].

II.1.1.4 Stratifié (laminé)

Ensemble de couches empilées et orientées de façon quelconque les unes par rapport aux autres (**Figure II.2**). En particulier, les structures stratifiées où le stratifié individuel est composé de matériaux hétérogènes, tels que les composites de fibre continue, peuvent être particulièrement utiles. Ces types de systèmes composites peuvent présenter beaucoup de caractéristiques favorables telles que le module spécifique haut, la résistance à la fatigue et aux dommages, la densité spécifique basse et les propriétés directionnelles [9].

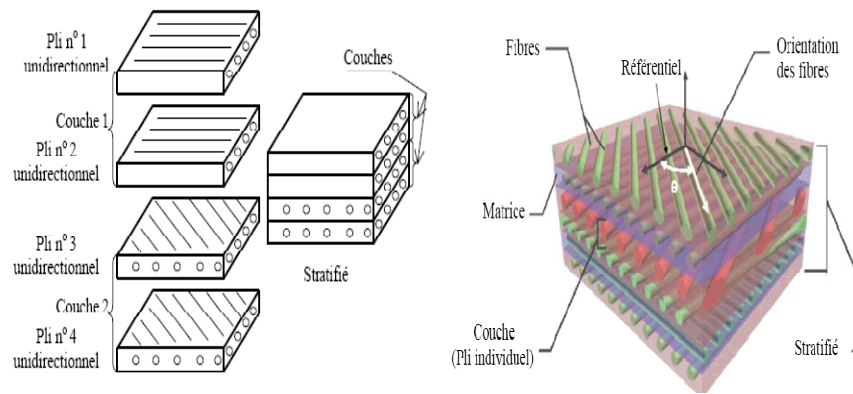


Fig II.2 Définition des termes : Pli, couche et stratifié [9 ; 6].

II.2 Les Matrices et les Fibres

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante "*matériaux composites*" des arrangements de fibres, les renforts qui sont noyés dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces.

Les propriétés des matériaux composites dépendent de beaucoup de facteurs et seront différentes selon les divers types de matériaux composites. Ces propriétés résultent [5]:

- Des propriétés, de la nature et de la quantité des matériaux constituants,
- De la géométrie et de la distribution du renfort,
- De leurs interactions, de la nature de l'interface matrice-renfort, etc.

II.2.1 Les matrices

La matrice a pour principal but de transmettre les efforts mécaniques au renfort. Elle assure aussi la protection du renfort vis à vis des diverses conditions environnementales.

Les matrices peuvent être de trois formes [4] :

Dans le cas des CMO (composites à matrices organiques) les principales matrices utilisées sont :

- Les résines polyester peu onéreuses qui sont généralement utilisées avec les fibres de verre et que l'on retrouve dans de nombreuses applications de la vie courante ;

- Les résines époxy qui possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques. Elles sont généralement utilisées avec les fibres de carbone pour la réalisation de pièces de structure et d'aéronautique ;
- Les résines phénoliques utilisées dans les applications nécessitant des propriétés de tenue au feu et flammes imposées par les normes dans les transports civils ;
- Les résines polyimides et bismaleimides pour des applications haute température ;

Dans le cas des CMC (composites à matrices céramiques), la matrice peut être constituée de carbone ou de carbure de silicium. Ces matrices sont déposées soit par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) par densification d'une préforme fibreuse, soit à partir de résines cokéifiables comme les résines phénoliques (dans le cas des matrices de carbone).

Dans le cas des CMM (composites à matrice métallique) le matériau composite est constitué :

- d'une matrice métallique (par ex. aluminium, magnésium, zinc, nickel,...) ;
- d'un renfort métallique ou céramique (par ex : fils d'acier, particules de SiC, carbone, alumine, poudre de diamant...).

II.2.2 Les fibres

II.2.2.1 Fibre de verre

Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). Les caractéristiques essentielles de la fibre de verre sont données dans le tableau II.1.

Tableau II.1 Caractéristiques essentielles des fibres de verre [23].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - rapport performances mécanique/prix - bonne résistance spécifique (pour verre R) - bonne adhérence avec toutes les résines - tenue à température élevée (50% de la résistance conservé à 350°C) - dilatation et conductivité thermiques faibles 	<ul style="list-style-type: none"> - faible module (par rapport à carbone ou aramide) - vieillissement au contact de l'eau

II.2.2.2 Fibre de carbone

C'est la fibre la plus utilisées dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

- fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C ;
- fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C.

Les caractéristiques essentielles, avantages et inconvénients, de la fibre de carbone sont données dans le tableau 2.2.

Tableau II.2 Caractéristiques essentielles des fibres de carbone [5].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - faible densité ; - propriétés mécaniques longitudinales; - l'absence de corrosion ; - très bonne tenue à la fatigue ; - facilité de manipulation. 	<ul style="list-style-type: none"> - une anisotropie très marquée ; - un comportement à la rupture de type fragile des composites ; - un prix de matière élevé comparé à celui de l'acier.

II.2.2.3 Fibre d'aramide

La fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes :

- les fibres bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles ;
- la fibre haut module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances.

II.2.2.4 Fibres de polyéthylène de haut module

Elles présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité. Pour des structures peu sollicités, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester [4].

II.2.2.5 Les fibres minérales artificielles siliceuses

Les fibres constituent de manière générale une grande famille subdivisée en une multitude de sous familles selon leur nature physico-chimique et leur origine. Elles sont utilisées principalement pour contrôler les pertes de chaleur, absorber l'énergie acoustique,

filtrer les impuretés dans les gaz et les liquides, renforcer d'autres matériaux ou contrôler la condensation [23].

Selon leurs caractéristiques physicochimiques, on distingue plusieurs types de FMA [23]:

- les fibres céramiques réfractaires (FCR) ;
- les fibres de verre à usage spécial ;
- les filaments continus de verre ;

II.3 Renforcement des poutres par matériaux composites de fibres de carbone

II.3.1 Généralités

La fibre de carbone est obtenue par pyrolyse d'une fibre organique appelée précurseur. Elle offre deux possibilités d'utilisation : la première en tant que carbone pour les propriétés de cet élément, la seconde en tant que fibre flexible et qui convient à toutes les formes de produits finis. Les propriétés caractéristiques du carbone sont liées à sa structure de type graphite : faible coefficient de frottement, bonne résistance à l'usure, faible coefficient de dilatation linéique, haute tenue en température en service continu, bonne conductivité électrique, très grande résistance aux produits chimiques et à la corrosion[24].

II.3.2 Comparaison avec les autres fibres de renforcement

L'avantage des fibres de carbone sur les autres fibres résulte de leurs propriétés mécaniques. Cet avantage est conservé dans les matériaux composites. On remarquera en particulier [5]:

- Le niveau très élevé des résistances et des modules en traction des fibres de carbone comparés aux fibres de verre, d'aramide et de bore ;
- Le haut niveau de résistance en compression des fibres de bore ;
- La faiblesse des fibres d'aramide en compression ;
- le niveau plus élevé de la résistance au cisaillement interlaminaire des fibres de carbone
- les fibres de verre ont un faible module et manquent de résistance aux solutions salines et/ou basiques les fibres aramides qui présentent un faible module, une résistance à la fatigue limitée en milieu aqueux et une tenue thermique très limitée.

II.3.3 Comparaison avec les matériaux métalliques

Le choix entre métal et matériaux composites doit tenir compte des conditions d'utilisation qui peuvent être, par exemple dans l'aéronautique :

- les conditions d'équilibre hygrothermique (baisse de la température de transition vitreuse de la résine du composite après vieillissement dans les conditions d'utilisation, se traduisant par un abaissement des propriétés mécaniques) ;
- l'endommagement par première rupture d'une couche, en général à 90° (first ply failure) ;
- l'endommagement consécutif à un choc.

Dans le cas d'un dimensionnement privilégiant les critères de rigidité, les composites carbone/résine époxyde de première génération (fibres de carbone de type T 300) sont déjà compétitifs en termes de propriétés spécifiques. Par contre, si les critères de tenue en compression et de résistance aux chocs sont privilégiés, l'avantage reste aux matériaux métalliques.

II.3.4 Procédés de Renforcement

Plusieurs procédés de renforcement sont apparus au cours de ces dix dernières années, les principaux utilisent directement les fibres de carbone sous forme de fil continu et d'autres font appel à un semi-produit plus ou moins sophistiqué tel que les tissus secs, les tissus préimprégnés ou des produits pultrudés.

a) *Fibres sèches*

La fibre de carbone est introduite sous forme de fibres continues de très grande longueur. Elle est déposée et enroulée régulièrement autour d'un mandrin, le poids des bobines varie de 500g à 4 kg, ce qui correspond à des longueurs de fibres continues de 600 m à 5 Km (soit 0,8g au mètre linéaire).

Pour renforcer directement une structure à partir d'une bobine de fibre de carbone, il est nécessaire de pouvoir tourner autour, ce procédé de renforcement est donc naturellement limité aux colonnes ou aux pylônes. Les bobines sont placées sur un dévidoir qui peut se mettre en mouvement dans deux directions (rotation autour de la structure à différentes hauteurs), lorsque l'ensemble se met en mouvement les mèches de carbone sont extraites des bobines et elles sont déposées automatiquement par enroulement autour du support à renforcer préalablement enduit d'une résine [5].

b) Tissus secs

Les fibres de carbone permettent, comme beaucoup de fibres longues de fabriquer des tissus de toutes formes et de toutes tailles, de même que des matrices. Le renforcement de structures à partir d'un tissu sec tissé uni ou multidirectionnel se fait directement par la pose de ce dernier sur une couche de résine qui recouvre l'élément à renforcer et qui sert de liant. Après marouflage une couche de résine de fermeture permet de parfaire l'imprégnation. Les pressions nécessaires appliquées pour cette méthode de renforcement sont faibles.

➤ Par rapport à d'autres méthodes de renforcement, son principal avantage est une manipulation très facile sur chantier avec une absence totale de matériel lourd à déplacer. En plus, cette technique permet le suivi parfait de la forme du support et la maîtrise de l'épaisseur du film de résine [5 ; 6].

c) Tissus préimprégnés

Les tissus préimprégnés sont obtenus en usine, à partir de tissus secs (cas des tissus multidirectionnels) ou à partir de fils de carbone joints sous forme de nappe (cas des tissus unidirectionnels), sur lesquels est déposé un excès de résine. L'excès de résines est éliminé par passage entre des rouleaux chauffés ou non. Le produit avant utilisation doit être conservé à froid, généralement -18°C , pour éviter la polymérisation de la résine.

Les tissus doivent être ramenés à la température ambiante pour être utilisables. A température ambiante, la souplesse du tissu préimprégné permet la pose de renforcements sur pratiquement n'importe quel type de surface. Ces renforcements sont posés et leur matrice immédiatement polymérisée sur les surfaces à renforcer, le principal problème d'un tel renfort réside dans la phase de remontée à la température ambiante et dans les difficultés matérielles pour assurer de bonnes conditions de polymérisation sur chantier.

➤ Les premières résines utilisées nécessitaient un matériel important, car la polymérisation était obtenue sous vide ou sous pression à des températures supérieures à 100°C . Par contre le principal avantage de cette méthode était la quasi-absence de bulles dans le renfort en composite après polymérisation. Cette technique de renforcement a surtout été développée au Japon, dès la fin des années 1980. Depuis, les fabricants de tissus préimprégnés et les formulateurs de résines ont accompli des progrès considérables, la température de polymérisation des résines est voisine de la température ambiante, ce qui a permis un gain

d'exploitation très important. Cependant, l'utilisation d'un préimprégné nécessite toujours une phase de conservation à très basse température et une phase de remontée en température avant la pose, qui sont difficiles à gérer sur des chantiers de travaux publics [5].

d) Produits pultrudés

Ces produits sont obtenus à partir de mèches de fibres continues qui sont enduites par passage en continu dans un bain de résine. Ces résines peuvent être de type époxyde, polyester, vinylester ou phénolique. L'ensemble des mèches préimprégnées passe ensuite dans une filière où l'excès de résine est éliminé, puis dans un four de polymérisation. Les produits finis se présentent sous forme de bandes ou de joncs, plus ou moins rigides suivant les épaisseurs et les diamètres.

La section des bandes les plus courantes est 100*1 mm, leur longueur, suivant la demande, varie de quelques centimètres à plusieurs centaines de mètres. D'autres types de profilés, y compris des tubes, peuvent être aussi fabriqués par le même procédé, ces produits sont utilisés depuis très longtemps dans les articles de sport : flèches d'arcs, bâtons de ski.

Ce procédé a l'avantage d'être continu, automatisé, rapide et donc de réduire le coût du composite. Il permet aussi de maîtriser les taux de fibres et de résine, et d'obtenir des formes profilées recherchées pratiquement de toutes les longueurs désirées. A partir de ces bandes pultrudées, la technique de renforcement est similaire à celle du plat collé métallique, selon le procédé l'Hermitte, mis au point en France vers 1965. Elle a démarré conjointement au Japon et en Europe, plus exactement en Suisse, à l'EMPA de Dübendorf à la fin des années 1980 sous la direction du Professeur U.Meier. L'avantage de cette méthode est la facile extrapolation des résultats obtenus par le collage de tôles d'acier.

➤ Comparée pour la technique utilisant l'acier, cette technique de renforcement permet de travailler avec des produits légers (1/5 de la densité de l'acier) ; elle a aussi l'avantage de nécessiter une pression de collage limitée et élimine les phénomènes d'oxydation. Cependant, l'utilisation de cette technique, comme celle du plat collé métallique, permet difficilement de maîtriser les épaisseurs de colle, en raison de la rigidité des aciers et des composites. L'application de ces renforcements sur des surfaces ayant des défauts de planéité ou sur des surfaces courbes ou non développables reste très limités. Dès les années 1980, des recherches ont démarré au Japon pour étudier le remplacement des structures en acier, formées de câbles toronnés et de treillis, par des structures résistant à l'oxydation. Les

composites, à base de fibres de verre, d'aramide ou de carbone, se sont avérés d'excellentes solutions pour ce remplacement [5].

II.3.5 Renforcement en flexion

Nombreux travaux ont utilisés le renforcement à l'aide d'un ou de deux lits de lamelles de carbone. Après préparation des supports béton et lamelles, et soigneusement enduit de colle les deux supports, les lamelles sont appliquées manuellement et pressées à l'aide d'un rouleau à pression afin d'évacuer l'excès de colle par les bords des lamelles (Figure II.3). Les poutres ont été testées en flexion quatre points.

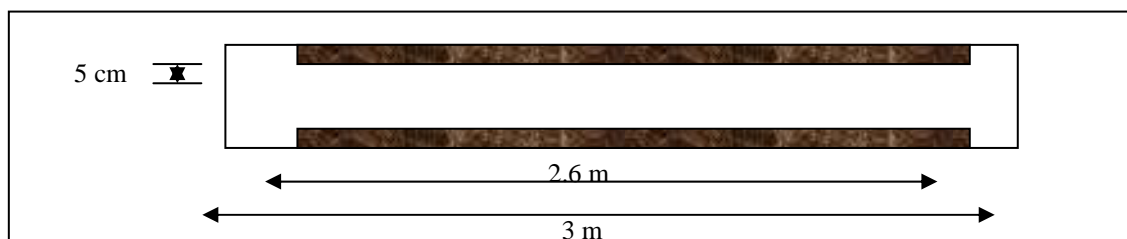


Fig II.3 Collage d'un lit de 2 lamelles [3]

La figure II.4 montre les variations de la charge en fonction de la flèche pour la poutre de référence et la poutre renforcées par un lit et celle renforcées par deux lits.

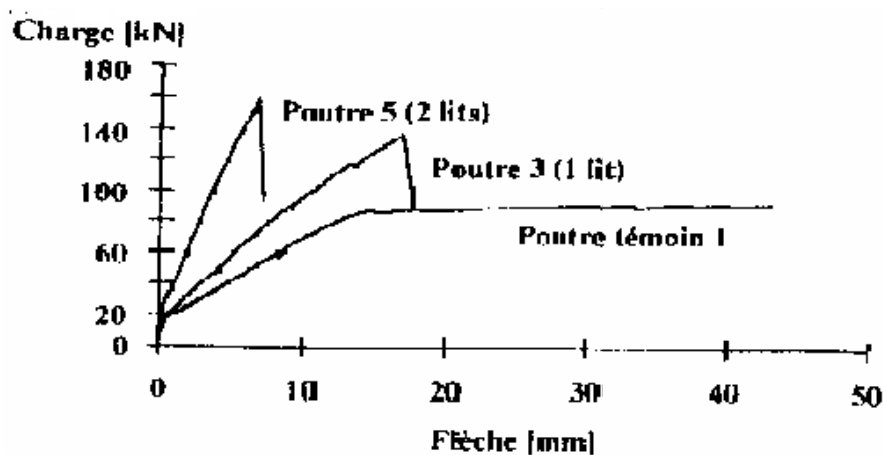


Fig II.4 Courbes charges flèche - influence du nombre de lits de lamelle- [3].

Les résultats des essais ont montré que de grandes différences de comportement apparaissent entre la poutre témoin et les poutres renforcées par 1 et 2 lits. Le palier plastique observé dans le cas de la poutre témoin est absent dans les poutres renforcées. De plus l'ajout d'un second lit de lamelles de carbone conduit à une élévation importante de la charge de rupture tandis que la flèche est fortement réduite [3].

II.3.6 Renforcement au cisaillement

Plusieurs recherches traitant du comportement des poutres renforcées à l'aide de plaques en matériaux composites ont été récemment entreprises. Mais il s'agit dans la grande majorité des cas de renforcement en flexion et peu de données sont disponibles sur la faisabilité du renforcement au cisaillement.

Dans une étude menée par C.Diagana et al, dix poutres en béton armé identiques ont été réalisées. Les deux premières sont des poutres de référence, elles ne sont pas renforcées, les huit autres poutres sont renforcées de différentes façons par collage de bandes de TFC. Les renforcements sont réalisés de telle sorte que la rupture par cisaillement soit prédominante.

Les poutres ont 1800 mm de portée et $130 \times 450 \text{ mm}^2$ de section. Elles sont armées par deux barres d'acier HA16 et deux barres HA14 dans la partie tendue et par deux barres HA8 dans la partie comprimée de la poutre. Pour les aciers verticaux (cadres en acier), on a utilisé un acier doux lisse de diamètre 6 mm, ils sont espacés de 300 mm. Pour toutes les poutres renforcées, la largeur et l'épaisseur des bandes sont respectivement égales à 40 et 0.43 mm. L'orientation et l'espacement des bandes et le mode d'ancrages du TFC sur la poutre sont présentés sur la figure (II.5) :

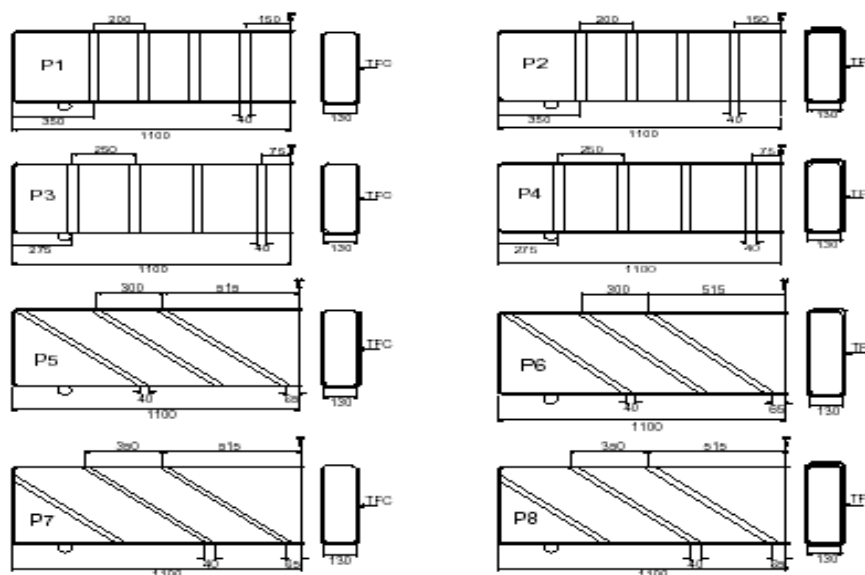


Fig II.5 Configuration des poutres renforcées [11]

Les poutres sont testées en flexion trois points sur un bâti avec un vérin d'une capacité maximale de 500 KN. La charge est appliquée au milieu de la poutre.

Les résultats des essais ont montré que par ce procédé on peut augmenter la charge de ruine des poutres. Les gains en charge par rapport à la poutre de référence varient entre 18% et 61% selon le mode de renforcement et l'orientation des bandes. Il a été constaté aussi que la contribution du TFC à la charge de rupture de la poutre varie avec l'espacement des bandes de TFC et le mode de renforcement. Les poutres renforcées par bandage présentent des charges de rupture plus élevées par rapport à celles renforcées par des bandes en forme de U. Ceci a été justifié par le fait que le renforcement par bandage exclut le problème d'ancrage. L'exclusion de ce problème fait que les bandes offrent le maximum de leur résistance à l'assemblage. Par contre, pour les poutres renforcées par des bandes inclinées, le TFC contribue plus dans le cas du renforcement en U. Il a été constaté lors des essais pour les poutres renforcées par bandage inclinées une torsion des bandes de TFC au niveau des fissures diagonales ce qui a pu provoquer la rupture de celles-ci avant qu'elles n'atteignent leur résistance maximale de traction [11].

II.4 Utilisations industrielles des composites à base de fibres de carbone dans différents Pays

a) Au Japon

Le Japon est une région particulièrement touchée par les tremblements de terre et regroupe plus de 1000 îles, et les phénomènes de corrosion saline sont souvent observés. Par conséquent, un intérêt particulier est donné au développement des composites à base de fibre de carbone pour le renforcement des structures. De nombreux ponts en béton précontraint ont dû être renforcés extérieurement en raison de la corrosion de aciers, ces renforcements ont été appliqués sur les piles ou sur les faces inférieures des tabliers en utilisant des préimprégnés à base de fibres de carbone comme renfort.

À partir de 1995, le nombre des réalisations a fortement augmenté. Les applications se trouvent dans tous les domaines industriels, renforcement extérieur de cheminées, de tunnels routiers, ferroviaires ou de métro, de sites de stockages naturels de pétrole ou de gaz, et mur de bâtiments.

b) Aux Etats-Unis

L'utilisation des composites pour le renforcement des structures a commencé suite aux études menées après le séisme Loma Prieta en Californie octobre 1989 et la destruction de plusieurs tabliers de ponts [5].

Parmi les cas de ponts réhabilités par l'utilisation des composites, on peut citer :

- Pont d'autoroute à Butler (Ohio) en 1996;
- Pont Foulk à Delaware (Californie) en 1997.

c) Au Canada

Au Canada, des études ont été menées pour renforcer extérieurement des ponts anciens corrodés ou ne pouvant supporter l'augmentation des surcharges de calcul. Le procédé l'Hermite devient peu applicable dans ce pays, du fait de la très forte corrosion saline liée aux énormes quantités de sels répandues sur l'ensemble du réseau routier pendant la longue période hivernale.

L'utilisation des fibres de carbone en génie civil a été d'environ 50 tonnes en 1997 au Canada et aux Etats-Unis. Parmi les chantiers expérimentaux on peut citer [5]:

- Le renforcement par frettage à l'aide de tissus préimprégnés de plusieurs colonnes de bâtiments dans l'enceinte de l'université Sherbrooke en 1995.
- Le renforcement d'un garage en sous-sols d'un parking, en utilisant des produits pultrudés en 1996.
- Le renforcement d'une structure de toiture dans le centre de Winnipeg (Manitoba) en 1997.

d) En Europe

En Europe, de nombreuses universités de la Communauté européenne ont travaillé sur les renforcements à base de matériaux composites. Et un projet « Brite » a réuni plusieurs pays sur ce sujet. Parmi les cas d'utilisation des fibres de carbone en génie civil on cite [5]:

- La construction d'un pont, au début des années 1990, avec des câbles de précontraint à base de composite en fibres de carbone, où passent toujours des dizaines de camions de livraison par jour dans l'usine de BASF à Ludwigshafen.
- Le remplacement de deux haubans en acier par deux câbles de fibres de carbone sur le pont de Winterthur en 1996. Chaque câble est constitué de 241 joncs de 5 mm de diamètre. La charge de rupture de chaque câble installé est supérieure à 1300 t.
- Fin 1996, plus d'une centaine de ponts ont été renforcés en utilisant le principe de renforcement par plats pultrudés et de tissus, dont le premier pont anglais, à Dales town of Skipton, au nord du Yorkshire, en octobre 1997.
- Fin 1997, le marché des BTP représentait en Europe un peu plus de 25 t de fibres de carbone et 50 t en 1997 avec un taux de croissance estimé à 30% par an.

e) En Algérie

Cette technique a été utilisée pour la première fois en 1998 sur un pont routier. Un grand nombre d'ouvrages d'art a été renforcé par les lamelles et tissus de fibre de carbone de SIKA et FREYSSINET, citons par exemple le pont routier voûté Sidi Rached, l'ouvrage rail PK 459 sur oued Bill Braguet à Constantine, le pont d'Oued Isser Tablat, L'autopont cinq maisons, Oued Djemaa Sidi-Moussa, le pont blanc d'El Harrach et le pont d'Ighezer Amokrane à Bejaia [11].

Le Pont Blanc d'EL Harrach a été aussi réparé et renforcé par le procédé (TFC). L'ouvrage permet le franchissement au niveau du centre ville, de l'oued EL HARRACH, construit au début du siècle (Figure II.6)



Fig II.6 Vue générale du Pont Blanc d'EL Harrach [27].

II.5 Conclusion

Les matériaux composites se développent de façon très significative notamment dans le domaine du génie civil et apportent sans cesse des performances croissantes permettant aux industriels d'envisager des solutions techniques innovantes et concurrentielles.

Les matériaux composites offrent de multiples avantages pour le renforcement des ouvrages en génie civil: rapport performances mécanique/prix, bonne résistance spécifique, bonne adhérence avec tous les matériaux...

Il existe un grand nombre de fibres, naturelles et synthétiques. Dans la pratique de la construction, ce sont surtout trois qualités de fibres qui se sont imposées: les fibres de verre, de carbone ou d'aramide [24].

En Algérie l'utilisation des fibres de carbone date seulement de 1998 et peu d'applications ont été réalisées mais la nécessité de renforcement des ouvrages vis-à-vis des modifications du trafic, ainsi que la mise en conformité parasismique des ouvrages entraînera probablement un développement rapide de cette technique [11].

CHAPITRE III

DIFFERENTES TECHNIQUES DE REPARATION ET DE RENFORCEMENT DES PONTS

CHAPITRE III : DIFFERENTES TECHNIQUES DE REPARATION ET DE RENFORCEMENT DES PONTS

III.1 Introduction

La durée d'exploitation d'un pont en béton armé est généralement de cinquante à cent ans, suivant son importance ou sa fonction. Durant une telle période, il est possible que des modifications importantes surviennent : changements d'affectation, dégradation par corrosion des aciers d'armature sont quelques-unes des causes les plus fréquentes d'une insuffisance de la capacité structurale. Par conséquent, un certain nombre des ponts nécessitera un renforcement ou des réparations afin de maintenir leur aptitude au service. Les techniques de renforcement et de réparation des structures en béton ont pris un essor considérable ces vingt dernières années.

Depuis les années 80-90, les techniques de renforcement utilisant le collage de plaques composites ou la stratification directe in situ de composite (renfort textile-polymère) ont remplacé les renforcements en acier. En effet, les plaques composites présentent de meilleures propriétés mécaniques, physiques et chimiques que les tôles d'acier [16].

III.2 Différentes techniques de réparation et de renforcement des structures en béton armé

III.2.1 Méthodes non structurales de réparation et de renforcement

Ces méthodes nécessitent autant de soin que l'application de techniques de réparation et/ou renforcement dites structurales. La réparation par reprise du béton dégradé suit généralement l'ordre chronologique suivant [18] :

- préparation de la surface de béton à réparer ;
- traitement des armatures éventuellement exposées ;
- mise en œuvre d'un ou plusieurs matériaux d'apport ;
- protection du parement ainsi réparé.

III.2.1.1 Préparation de la surface de béton

Avant de procéder à un ragréage, il est indispensable d'enlever toutes les parties de béton non adhérentes au support. Il est nécessaire de préparer avec soin les surfaces à traiter afin de

créer un support sain, propre, rugueux, de nature à favoriser une bonne adhérence au niveau de la surface de reprise. Les techniques les plus courantes sont l'hydrodémolition, le décapage au marteau pneumatique ou, dans les cas extrêmes, au brise-béton, le bouchardage, le burinage et le piquage au petit marteau pneumatique.

Dans des ordres consécutifs à la corrosion des armatures, il faut également effectuer un dégagement complet avec mise à nu de l'armature afin d'éliminer des zones de béton apparemment sain mais qui peuvent être polluées par chlorures ou atteintes de carbonatation. Différentes techniques existant pour éliminer le béton dégradé [16], les plus classiques sont le sablage (à sec ou humide) ainsi que le décapage à l'eau à très haute pression.

III.2.1.2 Protection des armatures

En présence d'aciers apparents corrodés, il est indispensable de les décaper (par sablage ou grenailage), puis de leur conférer une nouvelle protection à l'aide de produits hydrauliques ou de résines organiques, voire de les remplacer dans les cas extrêmes. Il est essentiel de dégager les armatures non seulement sur leur face apparente mais sur tout leur pourtour de façon à éliminer toute la partie dépassivée du béton [20].

III.2.1.3 Réparation du béton dégradé par apport de matériaux

III.2.1.3.1 Ragréage

Les produits de ragréages peuvent être classés en trois catégories [18] :

- ▶ les produits à base de liants hydrauliques, constitués par un mélange de sable, de ciment, de résines miscibles dans l'eau et, éventuellement de fibres ; ce sont les produits les plus utilisés ;
- ▶ les produits à base de résines de synthèse, constitués de sable (dans le cas de mortiers), de polymères organiques réactifs additionnés d'adjuvants spécifiques et, éventuellement, de charges minérales. Les produits les plus couramment utilisés sont ceux à base de résines époxy ou polyuréthanes ;

III.2.1.3.2 Traitement des fissures

Le traitement des fissures peut remplir plusieurs fonctions [18]:

- ▶ une fonction d'étanchéité, en obstruant la fissure de façon à empêcher la pénétration de tout corps étranger et, en particulier l'eau ;
- ▶ une fonction de scellement, l'espace vide est alors rempli par un matériau adhérent ou non, déformable ou non ;
- ▶ une fonction mécanique, le matériau injecté rétablit alors le monolithisme de la structure, ses caractéristiques sont élevées et il adhère aux surfaces

a) le traitement en surface

Il permet de rétablir l'étanchéité (cas de corrosion, de cycles de gel-dégel). Trois techniques existant : le calfeutrement, le pontage et l'imprégnation [14].

b) Traitements dans la masse

Le traitement dans la masse consiste à injecter en profondeur un produit liquide qui, après durcissement, a des caractéristiques mécaniques voisines de celles du matériau environnant. L'injection se fait par cheminement du produit liquide dans la fissure, de l'extérieur vers l'intérieur, après obturation de la partie visible de la fissure.

Deux grandes familles de produits existent, utilisables en traitement de surface comme en traitement dans la masse selon leur origine (minérale ou organique) [18].

III.2.2 Méthodes structurales de réparation et de renforcement

Les différentes techniques structurales de renforcement et de réparation correspondent soit à la projection de béton fibré ou non fibré, soit au collage de tôles d'acier, soit au collage des plaques composites ou à l'insertion de barres composites dans des engravure préparées sur la surface de la poutre.

III.2.2.1 Béton projeté

Un béton projeté est constitué d'un mélange de granulats, de ciment et d'eau avec parfois des ajouts, projetés grâce à l'air comprimé, sur une paroi. Il faut distinguer deux techniques de projection, suivant le moment d'introduction de l'eau dans la chaîne [18]:

III.2.2.1.1 Projection par voie sèche (avec ou sans pré-mouillage)

Avec cette technique, le mélange des constituants (à l'exception de l'eau) est introduit dans la machine à projeter, puis propulsé dans une canalisation par un flux d'air comprimé. Dans la projection sans pré-mouillage, l'eau est introduite au droit de la lance de projection, tandis qu'avec pré-mouillage l'eau est ajoutée dans la conduite deux à trois mètres avant la lance, ce qui a pour effet de diminuer l'émission de poussières.

III.2.2.1.2 Projection par voie mouillée

Le mélange de tous les constituants du béton, y compris l'eau, est introduit dans la machine à projeter. Le transport est effectué dans une canalisation, soit par un flux d'air comprimé pour la voie mouillée à flux dilué, soit par pompage pour la voie mouillée à flux dense. Dans les deux cas, une injection d'air comprimé à la lance de projection est nécessaire pour accélérer la vitesse de projection. Le béton peut être fabriqué dans une centrale à béton de chantier ou une centrale de béton prêt à l'emploi.

III.2.2.2 Ajout d'armatures

Cette technique consiste, après repiquage du béton existant (et éventuellement élimination du béton dégradé), à disposer des aciers et à les solidariser à la structure par du béton projeté ou du béton (voire du mortier) coulé en place. Ces aciers sont reliés à la structure à l'aide d'aciers de couture dimensionnés par application de la « règle des coutures », en assimilant l'interface entre le nouveau béton et la structure à une reprise de bétonnage. Si un pourcentage important de la section des aciers existants a disparu en raison de la corrosion, il peut être nécessaire de procéder à un remplacement ou un ajout d'aciers. Dans le cas des ragréages, lorsque les longueurs de recouvrement sont insuffisantes, il est alors possible de souder les nouvelles armatures sur les aciers existants, à condition que la soudabilité de ces derniers ait été vérifiée au préalable. Si les aciers existants ne sont pas soudables, on peut utiliser des coupleurs mécaniques dont l'encombrement peut nécessiter localement un dégagement plus important de béton.

Enfin, le scellement des connecteurs dans le béton support est assuré de façon pratique à l'aide d'une résine époxy spécialement choisie pour ses capacités de scellement. En cas de recours à du béton projeté, et dans le cas où le projet nécessite de superposer plusieurs lits

d'armatures ou plusieurs treillis, il faut éviter de poser toutes les armatures avant la projection en les mettant en place après enrobage de la nappe précédente. De même, il faut éviter de regrouper les barres par paquets et laisser un espace suffisant entre chaque armature (au moins 3 à 4 cm), sinon il se produit un phénomène d'ombre derrière l'armature où le béton présente de nombreux vides qui sont nuisibles à l'adhérence des aciers. En outre, pour éviter que la mise en vibration des armatures sous l'effet de la projection ne provoque une décohésion du béton projeté, il est nécessaire de les fixer par un nombre suffisant de points (4 points au mètre carré pour du treillis soudé) [20].

III.2.2.3 Renforcement des structures à l'aide de tôles métalliques collées

La technique des tôles collées, qui a été utilisée d'abord dans le domaine du bâtiment industriel, s'est vite répandue dans le domaine des ouvrages d'art où, dans bien des cas, elle a permis soit d'accroître la capacité portante d'un ouvrage, soit de renforcer localement une structure présentant des insuffisances de résistance. Elle est applicable aux structures en béton armé et aux zones fonctionnant en béton armé des structures précontraintes. Diverses conditions doivent être réunies pour la bonne réussite d'une opération de renforcement ou de réparation.

La surface du béton doit subir, avant tout, une préparation soignée (burinage, bouchardage, voire sablage à sec ou humide selon les conditions du chantier) ayant pour but d'éliminer toutes les parties peu adhérentes et de supprimer les imperfections locales afin de la rendre la plus plane possible. Le mortier de ragréage est destiné à pallier, dans certains endroits, le manque d'enrobage des armatures internes ou bien à reprofiler la surface qui n'aurait pu efficacement être traitée, en limitant la surface à ragréer à 20 % de la surface de collage et en s'assurant qu'il n'y a aucune zone ragréée en extrémité de tôles.

L'acier de renfort est constitué, dans la plupart des cas, de tôles en acier « doux » d'épaisseur de 3 à 5 mm. Le choix d'un acier de nuance supérieure ou d'épaisseur plus importante est à déconseiller car il faut que l'acier se plastifie avant son décollement de façon à obtenir une structure ductile et non fragile. La protection des aciers contre la corrosion sur leur face visible doit être assurée en utilisant les produits les plus classiques pour la protection des aciers de structures.

La colle est en général une résine époxy choisie pour ses propriétés d'adhérence à l'acier et au béton. L'épaisseur minimale de colle est de l'ordre du millimètre. Pour que l'adhérence entre l'acier et la colle ait une bonne tenue, les tôles utilisées doivent recevoir toute leur préparation en usine (découpage, préassemblage si besoin est, abattage des arêtes et enfin sablage) [20].

III.2.2.4 Renforcement des structures à l'aide de plaques composites collées

En complément des procédés de renforcements ou réparations classiques évoquées ci-avant sont apparus, depuis les années 80-90 des techniques de renforcement utilisant le collage de plaques composites ou la stratification directe in situ de composite (renfort textile-polymère). Les plaques composites présentent de meilleures propriétés mécaniques, physiques et chimiques que les tôles d'acier [15].

Le principe de la réparation peut être décrit par le schéma ci-dessous où il est possible d'identifier les différents éléments du procédé constructif, (figure III-1) :

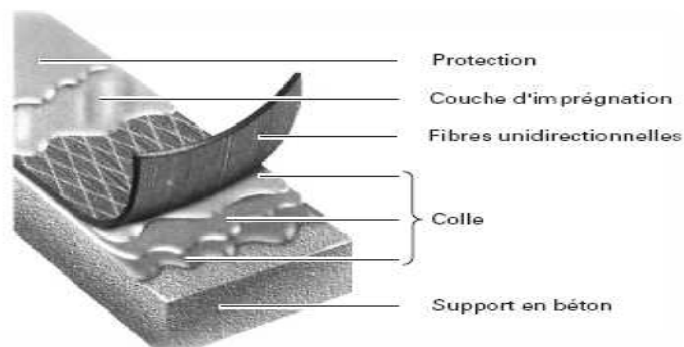


Fig III.1 *Conception du système multicouche [26].*

- le composite : association d'un tissu technique (en verre, carbone, aramide) avec une matrice (polymère thermodurcissable : résine époxy, résine vinyl-ester) ;
- l'interface est constituée soit de la colle soit de la résine d'imprégnation du tissu.
- le substrat correspondant à la couche de béton qui peut être traitée en surface (nettoyage, sablage, couche d'imprégnation, ragréage)

Les principales applications de renforcement, protection, réparation des ponts en béton armé portent sur le renforcement des poutres ou des dalles vis-à-vis de la flexion et de l'effort tranchant, sur le renforcement ou le confinement des piles en béton armé.



Fig III.2 Réparation des poutres du pont de Gagnac-France par matériaux composites [18].

III.2.3 Utilisation des matériaux composites pour renforcer les ponts en béton armé

III.2.3.1 Renforcement par collage de tissus de fibre de carbone

La technique consiste à préparer la surface du béton par un sablage à sec en vue d'obtenir un état de surface rugueux et uniforme en tous points avec des reliefs d'impact compris entre 0,5 et 1mm. Les dépôts de poussières et les particules non adhérentes sont éliminés par un brossage énergétique. Ensuite une couche de résine est d'abord appliquée au rouleau à poils ras. Le TFC, est ensuite appliqué si nécessaire, il est possible de juxtaposer plusieurs bandes bord à bord puis, une couche d'imprégnation de la même résine est mise en place à la spatule à raison de 700 g/m² environ. Cette opération peut être renouvelée pour une deuxième couche de TFC. Enfin, une couche de fermeture est appliquée à la spatule [5]. La figure III.3, montre un pont renforcé avec TFC [17].



Fig III.3 Renforcement à l'aide de TFC [17].

III.2.3.2 Remplacement des tôles métalliques par des fibres de carbone

Les opérations de maintenance des ouvrages d'art ou d'immeubles, se traduisent souvent par la nécessité de renforcement des structures, suite à des désordres ou de simple mise en conformité avec des codes de plus en plus exigeants. Le type de renforcement le plus utilisé est le

collage extérieur de plaques métalliques, selon le procédé l'Hermitte car n'exigeant que des interventions mineures sur la structure ; il est d'un emploi souple ; les renforts sont peu encombrants [5].

Toutefois, le collage de tôles métalliques présente aussi quelques difficultés :

- Sensibilité de l'acier à l'oxydation, impossibilité de mobilisation de toute la résistance en traction des tôles,
- Nécessité d'une préparation spécifique de la surface à traiter (la raideur des tôles nécessite une surface parfaitement plane pour assurer l'uniformité de l'épaisseur de l'adhésif),
- Nécessité d'un collage sous pression (vérins), pour assurer une adhésion suffisante et éviter les bulles d'air dans la couche de résine de collage.

Ces difficultés ajoutées aux besoins de renforcements de bâtiments dans certaines régions à risque sismique ont favorisé la recherche et le développement de l'utilisation de fibres de carbone, pour renforcer les structures de génie civil [5].

III.2.3.3 Utilisation des joncs composites pour armer les structures en béton

III.2.3.3.1 Technologie

Parmi les techniques disponibles depuis plus d'une décennie, et l'une des plus efficaces pour les désordres structurels, est la réhabilitation par matériaux composites des structures en béton par collage extérieur du renforcement (EBR : external bonded reinforcement). Le processus de l'introduction de ces matériaux a été accéléré par la mise au point de méthodes techniquement fiables et compétitives comparativement aux anciens procédés de renforcement à base d'acier. Ces fibres en carbone, en verre ou en aramide présentent en effet divers avantages : faible densité, absence de corrosion, propriétés mécaniques, très bonne tenue à la fatigue et facilité de manipulation.

Cependant, l'utilisation du procédé EBR dans le cas des poutres résulte dans plusieurs situations en une rupture prématurée provenant du décollement aux extrémités du tissu composite, empêchant ainsi le développement de sa pleine capacité en flexion. Ce délaminage aux extrémités est dû à la présence d'une importante contrainte de cisaillement dans la colle.

Pour y remédier, une nouvelle technique de renforcement nommée Near Surface Mounted (NSM) a été utilisée ces dernières années pour le cas des poutres fléchies. Elle consiste en l'insertion de bandes de polymères renforcées de fibres de carbone (CFRP) dans des gravures

effectuées préalablement dans le béton d'enrobage des surfaces tendues, remplies de résines époxydiques pour fixation.

Near-surface-mounted reinforcement (NSMR) est un développement supplémentaire de la technique de renforcement par les plaques de FRP. La méthode consiste à sceller les joncs ou bandes de polymères renforcées de fibres de carbone (CFRP) dans des engravures déjà préparées sur la surface de la poutre à renforcer. Par opposition à la technique de renforcement externe EBR, l'usage de NSMR protégera mieux la matière fortifiante de dégâts externes, tel que les chocs de véhicules, tout en assurant un bon encrage de renforcement NSM FRP.

Dans quelques cas, il peut être aussi plus facile d'en travailler que de le faire avec la méthode CFRP traditionnelle. Un autre avantage, la surface du béton ne sera pas complètement couverte, donc prévenir le piégeage de l'humidité de la structure et les problèmes de gel- dégel. Cependant, cette technique ne peut être utilisée que sur les structures avec un béton d'enrobage suffisant.

Comparant aux techniques traditionnelles, on constate une augmentation de la surface de collement avec NSMR, évitant ainsi la rupture préliminaire des lamelles avec la surface du béton. Une plaque FRP (d'une plus grande surface) se décollera du béton à sa moindre rupture, par contre plus d'énergie est demandée pour fracturer une bande NSMR [18].

On peut utiliser la technique NSM pour tous les renforcements et toutes les réparations de structure béton ou bois et plus particulièrement dans les zones d'accès difficile et sur les ouvrages de formes complexes, cela peut consister au [15] :

- Renfort à la flexion ;
- Renfort à l'effort tranchant ;
- Renfort en traction ;
- Renfort pour confinement.

III.2.3.3.2 Les avantages

- résistance en traction très élevée ;
- facilité et rapidité de la mise en œuvre dues à leur légèreté ;
- résistance à la corrosion élevée [14] ;
- bonne résistance électromagnétique.

III.2.3.3.3 Les inconvénients

L'application des joncs composites aux structures en béton armé relève quelques défis :

- leur anisotropie et la variété dans les propriétés physiques et mécaniques comparés à l'acier [14] ;
- des difficultés confrontées au niveau du transfert des charges du jonc de composite vers le béton;
- ces matériaux possèdent un module d'élasticité faible par rapport à l'acier. Le module plus faible des fibres mène à une augmentation du nombre de joncs composites pour conserver la rigidité de la structure ;
- leur ductilité est faible;
- leur coût est élevé [24];

III.2.3.4 Renforcements parasismiques au moyen de matériaux composites

Dans le cas d'une action gravitaire (poids propre, surcharges), les déformations de la structure restent dans un état élastique. Les sollicitations provoquant des déformations inélastiques ou plastiques ne sont prises en compte qu'aux états limites ultimes. En outre, les actions gravitaires agissent généralement dans une certaine direction.

Dans le cas d'un séisme, la structure porteuse subit des actions qui génèrent des déformations dépassant le domaine élastique. Ces déformations inélastiques et plastiques s'appliquent de façon cyclique; leur direction varie continuellement [13].

Renforcement de piles de ponts contre le choc de véhicules

Suite à l'effondrement accidentel de plusieurs piles de ponts en bordure d'autoroutes, une analyse générale de la résistance aux chocs de piles dans différents pays a montré que plusieurs centaines de piles doivent être renforcées pour prévenir de futurs accidents [13].

Un renforcement au moyen de tissus collés en aramide (Kevlar R) fut proposé comme alternative aux méthodes de renforcement traditionnelles. Pour prouver la faisabilité et l'efficacité de cette nouvelle méthode, une campagne expérimentale a été réalisée.

Ces différences fondamentales demandent une adaptation des méthodes de dimensionnement pour des actions dues aux séismes. Cette adaptation concerne les projets de constructions neuves, mais également les interventions sur des constructions existantes.

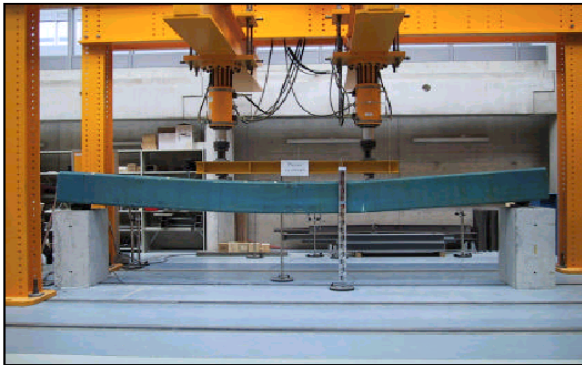


Fig III.4 Essais de flexion sur des colonnes [13] . **Fig III.5** Essais d'effort tranchant sur des colonnes en béton [13].

L'étude expérimentale était menée sur quatre colonnes de 5.20 m de long et d'une section de 400*400 mm. Ces colonnes étaient soumises à des moments de flexion (Figure III.5), des efforts tranchants (Figure III.6) et des efforts normaux. Les essais ont montré une forte augmentation de la résistance et de la déformabilité des colonnes renforcées, et par conséquent ce type de renforcement constitue une technique très efficace contre le choc de véhicules lourds [13].

III.3 Modélisation numérique du comportement des poutres et des ponts

III.3.1 Introduction

Plusieurs ponts et ouvrages ont été réparés et/ou renforcés par matériaux composites au Canada, Etats-Unis, Japon et en Europe. En Algérie, cette technique a montré son efficacité dans le domaine des ouvrages d'art depuis plus de dix ans puisqu'un nombre important d'ouvrages d'art a été renforcé par des matériaux composites comme le pont sur oued Bill Braguettz à Constantine, le pont blanc d'El Harrach, le pont d'Ighezer Amokrane à Béjaia, et le pont sur oued oumazer à Tipaza[11], le pont d'Oued Isser Tablat, l'autopont cinq maisons, et Oued Djemaa Sidi-Moussa.

Cependant, le calcul analytique ou par modélisation en éléments finis des éléments des structures renforcées permettant à l'ingénieur d'apprécier l'efficacité de cette technique n'est pas toujours disponible. D'une part, cette analyse peut constituer un outil sophistiqué pour la prévision du comportement des éléments des structures renforcées, et d'autre part, elle permet d'enrichir les résultats issus des études expérimentales en donnant accès à des endroits

difficilement mesurables. Actuellement, des logiciels de calcul extrêmement puissants, tels ANSYS, ADINA, ABAQUS et bien d'autres, nous permettant de modéliser le comportement de structures complexes sont disponibles [16].

III.3.2 Renforcement des poutres

III.3.2.1 Modèle des poutres renforcée avec tissu d'aramide

Pour analyser plus en détail ces nouvelles techniques de renforcement l'EIAF, l'Ecole d'Ingénieurs et d'Architectes de Fribourg, a entrepris une étude expérimentale sur des poutres de section carrée (400x400 mm) en béton armé renforcées par des tissus en aramides appliqués aux différentes couches dans les directions longitudinale et transversale.

Le but de l'étude consiste à déterminer l'augmentation de la capacité portante et de la déformation des poutres renforcées en fonction du nombre de couches d'aramides appliquées. Ces deux caractéristiques, la capacité portante et la déformabilité, permettent d'évaluer la faculté d'une pile de pont à absorber l'énergie cinétique produite par l'impact d'un véhicule lourd roulant à grande vitesse. Ensuite il est nécessaire de pouvoir prédire le comportement et la résistance d'une poutre renforcée. Les poutres d'une longueur de 5.20 m sont sollicitées par deux charges concentrées aux tiers de la portée (Figure III.7).

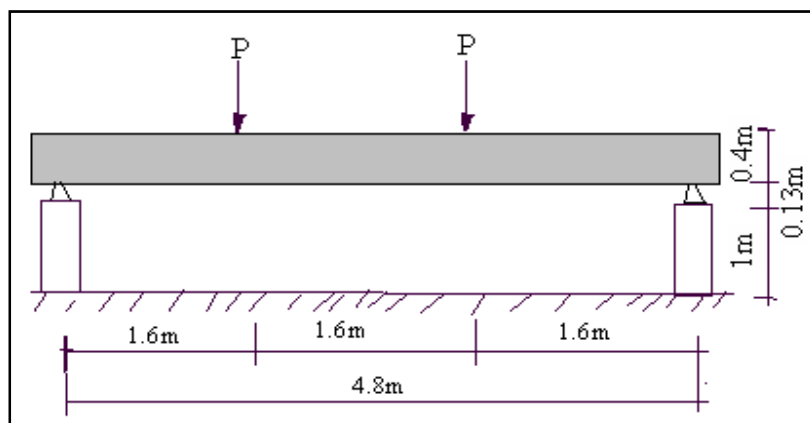


Fig III.6 Essai de flexion [16].

Les poutres d'essais se distinguent principalement par la quantité de tissu appliqué dans la direction longitudinale (Tableau III.1).

Tableau III.1 Renforcement des poutres d'essai [16].

	PK2	PK2	PK3	PK4
Armature	8Ø20	8Ø20	8Ø20	8Ø20
Etriers	Ø20	Ø20	Ø20	Ø20
Espacement (mm)	S=300	S=300	S=300	S=300
Renforcement	-	Kevlar® Type AK-60	Kevlar® Type AK-60	Kevlar® Type AK-60
Longitudinal	-	3 couches	3 couches	4 couches
Transversal	-	2 couches	2 couches	2 couches

La poutre PK1 constitue l'élément de référence, non renforcé. Les poutres PK2, PK3, PK4, sont renforcées par 2, 3 et 4 couches de tissus en aramide (Kevlar AK-60) dans la direction longitudinale et de 2 couches de tissus dans la direction transversale. Les tissus unidirectionnels en Kevlar AK-6 ont une épaisseur théorique de 0.29 mm. La résistance garantie des fibres est de 2100 N/mm² et le module d'élasticité de 120 kN/mm².

A la suite des essais, une modélisation numérique en 2D a été effectuée à l'aide du logiciel d'élément finis ADINA, la poutre étant symétrique, seule une moitié a été modélisée (Figure III.8). Le modèle est composé de 24 éléments plans à 8 nœuds représentant le béton et 18 éléments de d'aramide. Le mode de chargement choisi est d'imposer un déplacement vertical à l'endroit du point d'appui du vérin. Le déplacement imposé est divisé en pas de 1 mm jusqu'à la plastification de l'acier, puis de 0.2 mm jusqu'à ce que le programme détecte la rupture de l'élément.

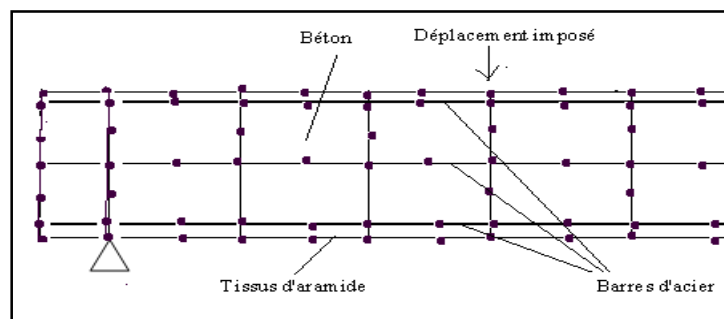


Fig III.7 Modélisation numérique d'une poutre [16]

Le comportement des différents matériaux a été modélisé à partir des résultats expérimentaux obtenus sur des échantillons. Le modèle du béton utilisé dans cette étude est un modèle élastoplastique avec prise en compte de la résistance à la traction. La figure III.9 montre le comportement contrainte-déformation du béton utilisé dans la modélisation.

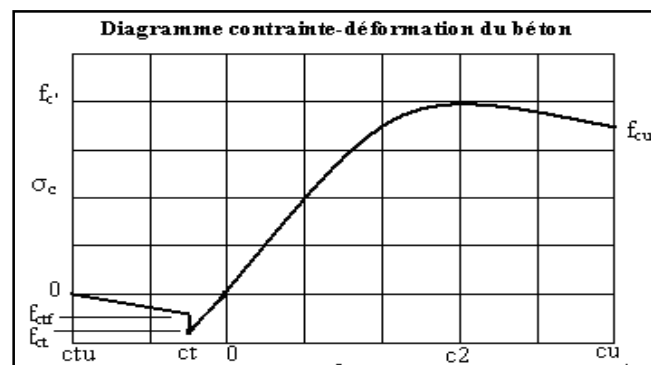


Fig III.8 *Modèle du béton utilisé [16].*

Les caractéristiques mécaniques du béton ont été ajustées pour chaque poutre afin de tenir compte de l'âge du béton au moment de l'essai et du confinement transversal par les tissus d'aralide disposé perpendiculairement à l'axe de la poutre. Ces caractéristiques sont présentées dans le (Tableau III.2). Le modèle de l'acier utilisé est un modèle élastoplastique bilinéaire, les caractéristiques principales, basées sur des essais de traction sur les barres d'armature sont les suivantes: $*F_y = 550 \text{ N/mm}^2$ $*\epsilon_y = 2.68 \text{ ‰}$ $*E_s = 205000 \text{ N/mm}^2$ $*F_u = 650 \text{ N/mm}^2$ $*\epsilon_u = 10 \text{ ‰}$.

Tableau III.2 *Caractéristiques du béton [16]*

	PK1	PK2	PK3	PK4
$f_c' \text{ (N/mm}^2\text{)}$	25	30	38	38
$f_{cu} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	20	22	28	28
$\epsilon_{c2} \text{ (‰)}$	2.0	2.8	3.0	3.0
$\epsilon_{cu} \text{ (‰)}$	3.5	5.0	5.0	5.0
$E_c \text{ (N/mm}^2\text{)}$	30000	30000	32000	32000
$f_{ct} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	4.0	4.0	6.0	6.0
$f_{ctf} \text{ (N/mm}^2\text{)}$	2.0	2.0	3.0	3.0
$\epsilon_{ct} \text{ (‰)}$	0.13	0.13	0.30	0.30
$\epsilon_{ctu} \text{ (‰)}$	8.00	8.00	8.00	8.00

Le comportement d'aramide est parfaitement linéaire avec rupture sans aucun palier d'écoulement. La figure 3.5 montre le modèle d'aramide utilisé.

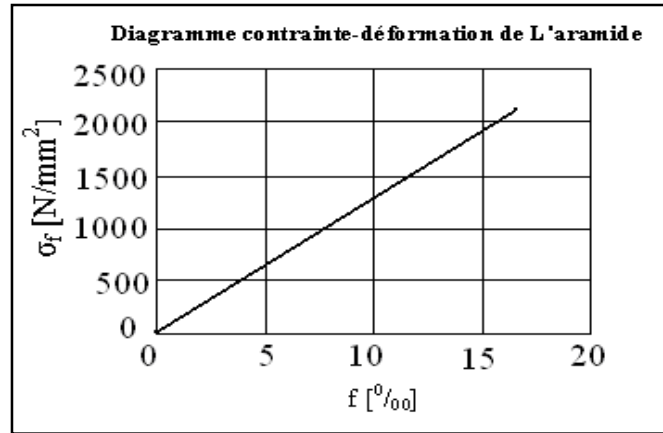


Fig III.9 Modèle de l'aramide utilisé [16].

Les courbes de la figure III.10 comparent les résultats numériques et expérimentaux. On constate que le comportement global de la modélisation numérique est proche de celui des essais en laboratoire pour les différents stades de chargement des poutres. Par contre, l'étude numérique détecte une rupture bien en deçà des valeurs trouvées lors des essais des poutres renforcées.

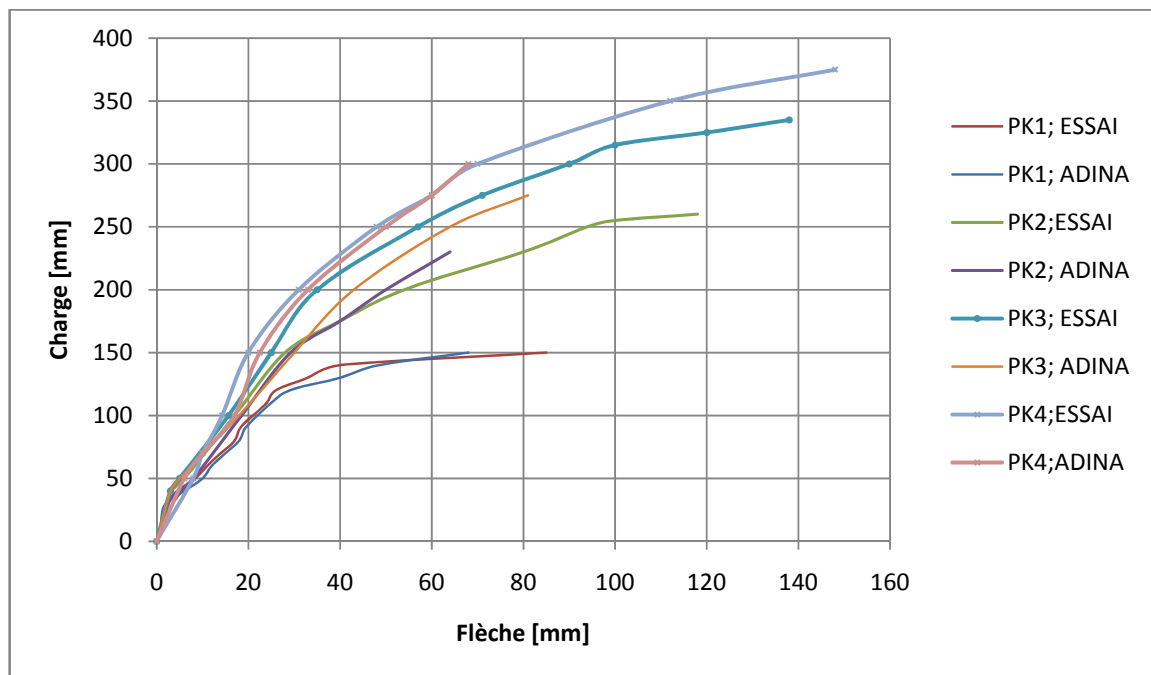


Fig III.10 Comparaison entre les essais et le calcul numériques [16].

On remarque que dans cette étude statique du comportement des poutres renforcées par matériaux composites à base de fibre d'aramide que ces derniers augmentent la résistance à la traction et à la déformation. Le modèle numérique a été identifié par l'application du logiciel ADINA, néanmoins ce logiciel travail à deux dimensions. La modélisation numérique prise se rapproche de la réalité, du fait que la connectivité prise en compte est nœud à nœud. Le logiciel utilisé sousestime le comportement réel des poutres testées [16].

III.3.2.2 Poutres renforcées par matériau composite à base de fibres de carbone (CFRP)

Une étude numérique à l'aide du logiciel ANSYS a été menée par KACHALKEV [20] sur des poutres en béton renforcées, à la flexion par CFRP, et au cisaillement par GFRP. Les résultats obtenus ont été validés par des résultats expérimentaux. Un appui simple a été utilisé pour permettre la rotation aux appuis, les poutres ont été soumises à la flexion quatre points et le maillage a été raffiné immédiatement sous la charge.

Aucun renfort du type étrier n'a été employé (Figure III.10). L'approche non-linéaire de Newton-raphson a été utilisée pour tracer la courbe d'équilibre Charge-déformation pendant la réponse. Il a été constaté que la convergence des solutions pour le modèle était difficile à réaliser en raison du comportement non-linéaire du béton renforcé [20;25].

Les courbes de charge-déplacement pour les poutres de références et les poutres renforcées par CFRP et GFRP montrent une bonne concordance avec les résultats expérimentaux (Figure III.13 et III.14).

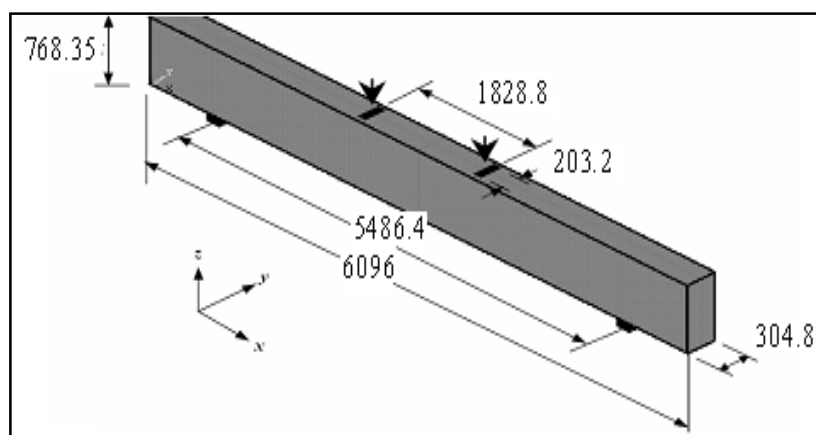


Fig III.11 Géométrie de la poutre [20]

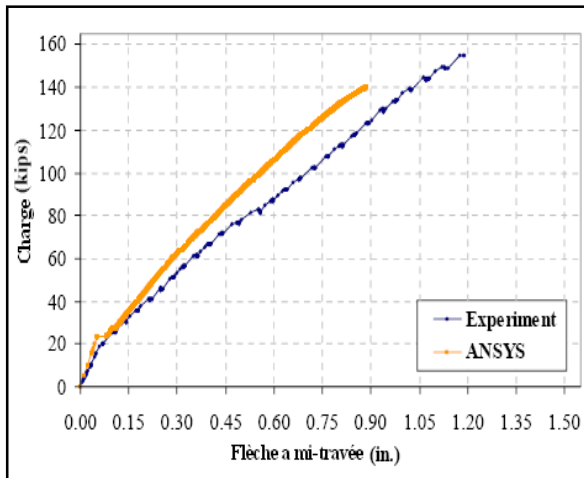


Fig III.12 Courbe charge-flèche pour les poutres renforcées à la flexion [20].

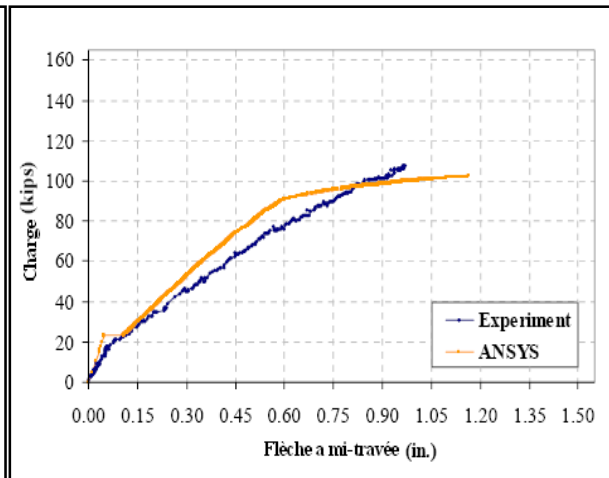


Fig III.13 Courbe charge-flèche pour les poutres de références [20].

Ce travail de modélisation du comportement des poutres en matériaux composites à base de fibres de verre a montré que le logiciel ANSYS est très fiable. L'auteur a utilisé la connectivité nodale confirmant le choix établi par l'étude précédente. La comparaison numérique-expérimentale a montré aussi que ce modèle est en concordance avec les résultats expérimentaux [20;15].

III.3.3 Renforcement d'un pont

Un modèle d'éléments finis tridimensionnel a été développé [21], pour examiner le comportement structural du pont d'Oregon (USA), avant et après renforcement.

Le pont a été réalisé en 1914 avec une longueur de 18,28 m, et une largeur de 7,315 m, avec trois travées de 6,96 m. L'analyse non linéaire est exécutée par l'utilisation du logiciel ANSYS, où les matériaux : Solid65, link8 et Solid 46, représentent, le béton, l'acier et le matériau composite respectivement. Deux types de renforcement ont été constatés, un renforcement à la flexion par le composite à base de fibres de carbone (CFRP), et un renforcement au cisaillement assuré par matériau composite à base de fibres de verre (GFRP). Les résultats obtenus sont comparés aux données expérimentales [21 ; 17].

Les propriétés matérielles des matériaux utilisés, sont récapitulées dans le tableau 3,5.

Tableau III.3 Propriétés matérielles des matériaux utilisés [21].

Types des	Module	ν	G	Epaisseur
Béton	19650	0.2	-	-
Acier	199900	0.3	-	-
CFRP	$E_x=62000$	$\nu_{xy}=0.216$	$G_{xy}=3270$	1.067
	$E_y=4800$	$\nu_{yz}=0.216$	$G_{yz}=3270$	
	$E_z=4800$	$\nu_{xz}=0.3$	$G_{xz}=1860$	
GFRP	$E_x=20680$	$\nu_{xy}=0.216$	$G_{xy}=1517$	1.321
	$E_y=6895$	$\nu_{yz}=0.216$	$G_{yz}=1517$	
	$E_z=6895$	$\nu_{xz}=0.3$	$G_{xz}=2654$	

La répartition du chargement mobile du camion sur le tablier du pont est donnée comme par la figure 3.12.

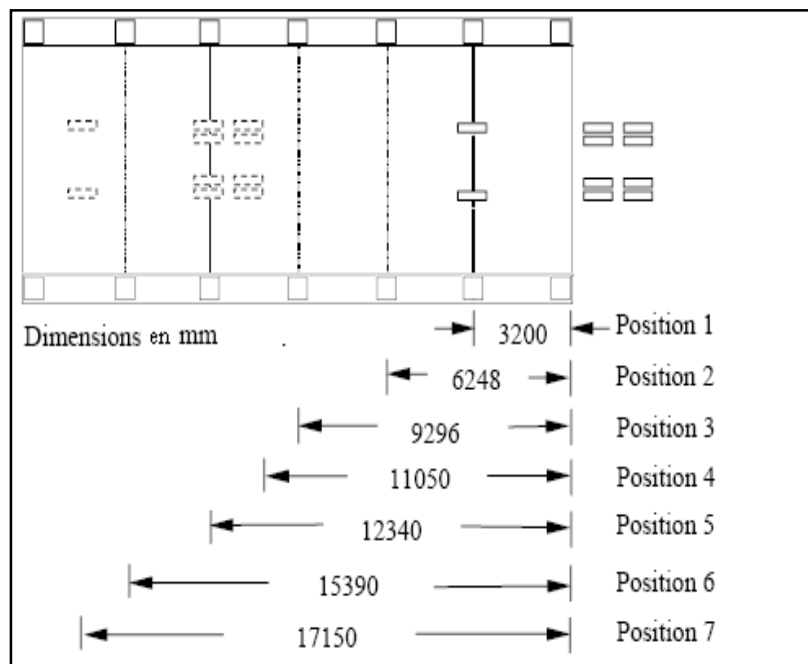


Fig III.14 Les positions du chargement du camion le long du tablier (mm) [21].

Le modèle élément fini obtenu par le logiciel ANSYS, est présenté dans la figure suivante.

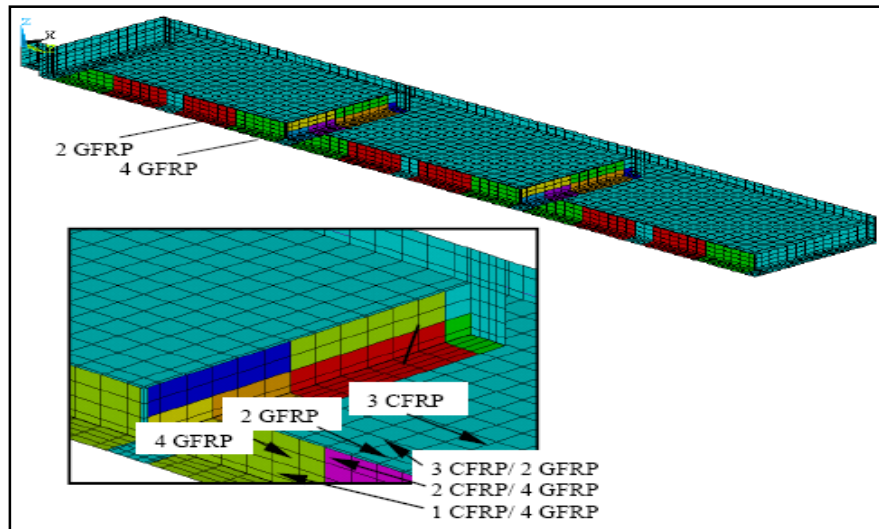


Fig III.15 Modèle élément fini du tablier [21]

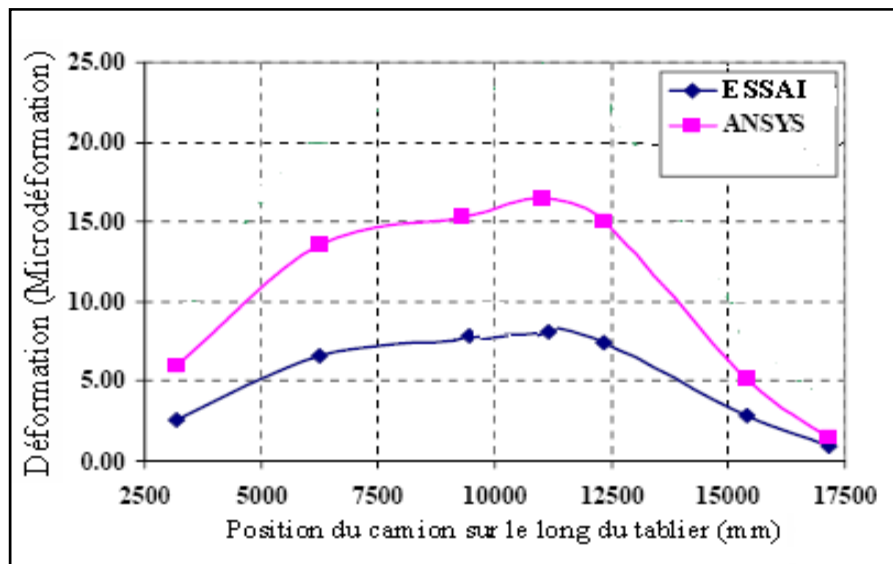


Fig III.16 Courbes positions-déformations [21].

La comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux en terme de déformations, montre que ce modèle représente bien la structure en vue la concordance entre les résultats expérimentaux et ceux du modèle (Figure III.16).

III.4 Conclusion

La technique de renforcement des ouvrages en génie civil par matériaux composites est déjà largement employée dans le domaine de la réparation de structures en béton armé.

Des recherches importantes ont été menées sur cette nouvelle technique, renforcement par matériaux composites, en particulier sur l'application de cette technique dans le renforcement des structures en béton armé. L'étude du comportement des ouvrages d'art et des structures en béton armé renforcés par différents matériaux composites réalisés a montré les effets bénéfiques de ces matériaux et de cette technique comparativement aux techniques traditionnelles.

Les études ultérieures de la modélisation numérique, ont montré la possibilité de prédire le comportement non linéaire des structures renforcées par matériaux composites. La modélisation des ouvrages en béton armé renforcés par matériaux composites se déroule en plusieurs étapes :

- Pré-modélisation ;
- Etablissement d'un modèle numérique ;
- Validation du modèle numérique par des essais expérimentaux.

CHAPITRE IV

MODELISATION NUMERIQUE DES POUTRES EN BETON ARME RENFORCEES PAR MATERIAUX COMPOSITES DE FIBRES DE CARBONE 'CFRP'

CHAPITRE IV : MODELISATION NUMERIQUE DES POUTRES EN BETON ARME RENFORCEES PAR MATERIAUX COMPOSITES DE FIBRES DE CARBONE 'CFRP'

IV.1 Introduction

La méthode des éléments finis développée depuis une quarantaine d'années est devenue un outil d'utilisation quotidien dans les industries. Cette méthode permet de traiter des problèmes de plus en plus complexes et de nature très variée. La méthode des éléments finis est une méthode numérique qui permet de prévoir le comportement de structures avant leur réalisation effective. La résolution se déroule en plusieurs étapes :

- L'analyse mathématique du problème:
 - existence de la solution
 - unicité de la solution
 - propriétés de convergence
- l'implémentation
 - la création de la triangulation (le maillage) du domaine à considérer ;
 - la définition du ou des éléments finis c'est-à-dire la construction de l'espace de dimension finie;
 - la génération des tableaux élémentaires correspondants à la contribution de chaque élément;
 - la formation du système à résoudre (ou assemblage) ;
 - la prise en compte de conditions aux limites;
 - la résolution du système;
 - la présentation et l'exploitation des résultats [37].

Des logiciels de calcul basés sur la méthode des éléments finis sont très nombreux. En général, un logiciel d'analyse se compose de trois modules essentiels : pré-processeur, calcul et post-processeur comme dans ANSYS, ABAQUS.

On s'intéresse en particulier à la dynamique non linéaire des structures qui conduit à de nombreuses difficultés, tant au niveau de la modélisation (lois de comportement, loi de frottement, ...) qu'au niveau de la simulation numérique (équations non linéaires, problèmes transitoires, ...).

Dans notre étude, nous avons maintenu les mêmes dimensions que celles des spécimens d'A.Laichaoui[11]. Les données recueillies durant la phase expérimentale ont permis de simuler numériquement le comportement des poutres étudiées. Ces simulations numériques ont été réalisées à l'aide du logiciel ANSYS.

IV.2 Présentation du logiciel "ANSYS" et principe du choix

Le logiciel ANSYS est un programme de simulation basé sur la méthode des éléments finis. Le logiciel ANSYS a été développé afin de répondre à différents problèmes : problèmes de contact et d'impact entre des solides élastiques et/ou hyperélastiques, dynamique du système multicorps.

❖ Principaux produits et capacités

- **ANSYS Structural** : permet d'effectuer des simulations mécaniques en calcul de structures. Ses principales capacités sont l'analyse statique, l'analyse modale, l'analyse harmonique (réponse forcée), l'analyse temporelle et la gestion de différentes situations non-linéaires (contacts, plasticité matériaux, grands déplacements ou grandes déformations) ;
- **ANSYS Mechanical** : ce produit dispose des mêmes capacités que ANSYS structural ;
- **ANSYS CFX et Fluent** : Ces deux logiciels permettent d'effectuer des simulations en matière de mécanique des fluides ;
- **ANSYS AUTODYN et ANSYS LS-DYNA** : Leur domaine d'application est réservé aux modélisations mettant en jeu des situations mécaniques aux très larges déformations ;
- **ANSYS Electromagnetics** : permet de résoudre des modélisations mettant en jeu des phénomènes électro-magnétiques ;
- **ANSYS Multiphysics** : Ce produit rassemble l'ensemble des capacités d'ANSYS en matière de simulation numérique implicite.

❖ Plates formes ou environnements

Deux environnements logiciels permettent de mettre en œuvre le code ANSYS :

- **ANSYS Classique** : Chronologiquement, c'est la première solution logicielle développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques. À

partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en se basant sur les commandes disponibles dans le code ANSYS.

- **ANSYS Workbench** : Cette plate forme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en ré-utilisant le code ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièce) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul. Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. Le modèle éléments finis généré reste néanmoins manipulable en insérant des commandes propres au code ANSYS.

Les résultats sont donnés sous forme de listes, tableaux (déplacements nodaux, contraintes, déformations...etc.), et sous forme graphes, modèles 3D (contours des contraintes, déformations, fissuration....etc.). Le logiciel ANSYS 11, contient plus de neuf processeurs dont l'utilité, le chemin d'accessibilité et les commandes sont résumées dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1 *Processeurs disponibles dans le logiciel ANSYS 11 [32].*

Processeur	Fonction	Chemin GUI	Comm ande
PRER 7	Création du modèle (géométrie, matériaux....)	Main Menu>pre-processor	/PREP 7
Solution	Application du chargement et obtention de la solution.	Main Menu>solution	/SOLU
Post 1	Revue des résultats du modèle entier à un temps spécifié.	Main Menu>général post pro	/Post1
Post 26	Revue des résultats à des points spécifiques du modèle fonction du temps.	Main Menu>time hist postpro	/Post26
OPT	Conception initiale	Main Menu>design opt	/OPT
AUX 2	Transformation des fichiers binaires en forme exploitable.	Utility> Menu>File>List>BinarFiles	/AUX2
AUX 12	Spécifique aux analyses thermiques (calcul et génération de la matrice de radiation)	Main Menu>Radiation Matrix	/AUX1 2
AUX 15	Translation des fichiers CAD	Utility Menu>File>import	/AUX1 5
RUNSTAT	Statistiques	Main Menu>Run-time stats.	/RUNS

IV.3 Non linéarité des structures

En mécanique linéaire, il y a une proportionnalité entre la charge appliquée et le déplacement résultant. Tandis qu'en mécanique non-linéaire, si on double la charge le déplacement n'est plus multiplié par deux et la raideur de la structure n'est plus une constante [32].

IV.3.1 Types de non-linéarités

On distingue deux types de non-linéarités, globales et locales [32] :

IV.3.1.1 Non-linéarités globales

On distingue deux types de non-linéarités globales: les non-linéarités structurales, qui dépendent des propriétés propres au matériau utilisé ; et les non-linéarités géométriques, qui se rencontrent plus fréquemment dans les systèmes constitués de corps multiples rigides ou flexibles.

- **Non-linéarités des matériaux**

Le comportement non-linéaire peut être induit par les propriétés élastiques ou dissipatives du matériau. Un premier exemple est donné par les déformations élasto-plastiques lorsqu'une partie de la structure est en déformation plastique tandis que l'autre reste dans le domaine élastique. Un autre exemple est donné par certains matériaux qui ne se comportent pas de la même manière en compression ou traction, ce qui se traduit par un module de Young différent selon le mode de chargement. Parmi les différents types d'amortissement des matériaux, l'amortissement hystérétique, dépendant de l'amplitude de la déformation, ou encore l'amortissement visqueux qui suit une loi non-linéaire en la vitesse de déformation.

- **Non-linéarités géométriques**

Les structures sont soumises à de petites déformations et à de grands déplacements, présentant un comportement non-linéaire. Ainsi, les systèmes de corps rigides (ou mécanismes) sont non-linéaires de part leurs relations cinématiques. De même, les systèmes subissant de grandes déformations, tels les poutres ou les plaques, ont un comportement non-linéaire dû à la distribution non-linéaire des charges aux grandes déformations.

IV.3.1.2 Non-linéarités locales

De nombreux systèmes sont constitués de sous-structures linéaires, reliées entre elles par certains composants non-linéaires. Il est possible de scinder ces non linéarités locales en deux groupes distincts : les éléments élastiques et dissipatifs.

- **Non-linéarités élastiques**

L'élément réel qui se rapproche le plus d'une non-linéarité locale élastique est le ressort. Les ressorts sont très souvent utilisés dans l'industrie et sont souvent naturellement non-linéaires. Selon le design rencontré, la raideur du ressort peut augmenter ou diminuer en fonction de la déformation, la plupart du temps, une modélisation polynomiale de la raideur est adoptée mais certains comportements linéaires par morceau peuvent également être observés.

- **Non-linéarités dissipatives**

Les contacts entre corps, souvent présents dans la conception de machines, génèrent très souvent un comportement non – linéaire dissipatif dû à la friction générée par le mouvement relatif de deux surfaces. L'exemple le plus courant est le frottement de Coulomb, dont les effets, contrairement à la plupart des non-linéarités, se font sentir aux faibles niveaux d'excitation.

IV.3.2 Solution par les itérations de Newton-Raphson

Dans l'analyse non linéaire, la charge totale appliquée à un modèle d'éléments finis est divisée en une série d'augmentations de charge appelée prises en charges '*load steps*'. À la fin de chaque solution progressive, la matrice de rigidité du modèle est ajustée pour refléter les changements non linéaires dans la rigidité structurale avant de procéder à l'augmentation de la charge suivante. Le programme d'ANSYS s'appuie sur l'équilibre des itérations de Newton-Raphson pour mettre à jour la rigidité du modèle. La figure IV.1 montre l'utilisation de Newton-Raphson approche dans un seul degré de liberté d'analyse non linéaire.

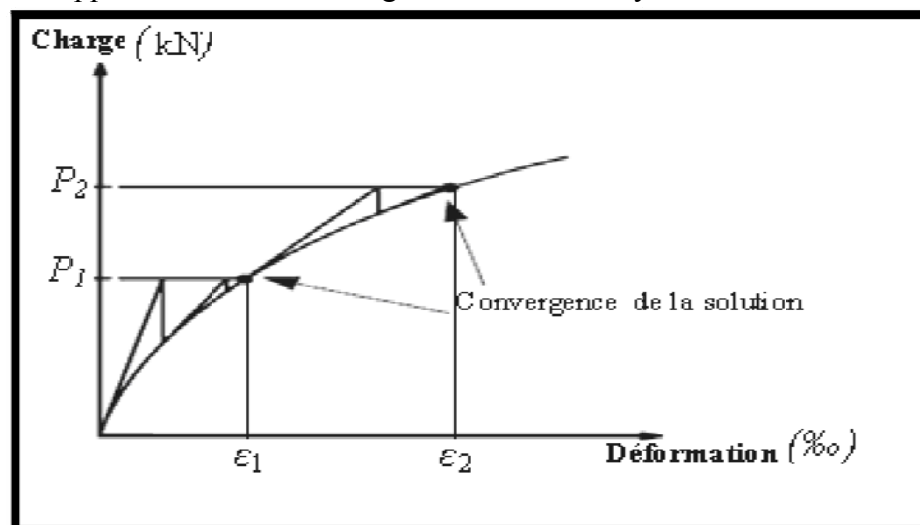


Fig IV.1 Solution par d'itération de Newton-Raphson (2 incréments de charge) [21].

Avant chaque solution, l'approche de Newton-Raphson évalue le vecteur de l'équilibre de charge, qui est la différence entre les forces de rappel et les charges appliquées. Par la suite, le programme effectue une solution linéaire, en utilisant la réalisation d'équilibre des charges et le contrôle de la convergence. Si les critères de convergence ne sont pas remplis, le vecteur de l'équilibrage de charge est réévalué, la matrice de rigidité est mise à jour, et une nouvelle solution est atteinte. Cette procédure itérative se poursuit jusqu'à la convergence du problème [21].

Dans cette étude, pour les éléments massifs en béton armé, les critères de convergence ont été basés sur la force et le déplacement. Il a été constaté que la convergence de la solution pour les modèles est difficile à réaliser compte tenu du comportement non linéaire du béton armé.

D'après l'exposition de modèle numérique on peut conclure que le logiciel ANSYS est capable de résoudre des problèmes non linéaires et munie d'une interface graphique qui facilite la tâche à l'utilisateur, et elle est dotée d'une bibliographie d'éléments assez riche capable à satisfaire pratiquement tous les problèmes de modélisation, et nous permet d'introduire les différents modèles des matériaux employés dans la modélisation des poutres en béton armé renforcées par composites.

IV.4 Modélisation des poutres renforcées par matériaux composites

IV.4.1 Introduction

Les activités du Laboratoire Construction et de l'Environnement de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique ont trait à la modélisation des phénomènes complexes en mécanique des matériaux et des structures. Parmi ces recherches a été fait, LCE entrepris à analyse expérimentale du comportement des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites à base de fibres de carbone fait par A.Laichaoui dans le cadre d'obtention d'un diplôme de magister[11].

On s'intéresse à la modélisation de ces phénomènes et possède la capacité d'utiliser le logiciel ANSYS pour les mettre en œuvre, notamment dans le cadre de la discrétisation par la méthode des éléments finis, les résultats du modèle numérique sont comparés aux résultats expérimentaux de ce dernier.

IV.4.2 Modélisation par éléments finis

Toutefois, dans l'offre logicielle, il manque un maillon essentiel, à savoir le lien entre les modèles géométriques et nos codes de calcul. Ce maillon consiste à discrétiser la géométrie, ce que l'on nomme habituellement "mailler la géométrie". Dans le cadre de la méthode des éléments finis, la génération de maillages est une étape cruciale de la préparation des calculs. La précision des résultats numériques obtenus dépend en effet de la qualité des maillages utilisés.

IV.4.2.1 Le béton

➤ Introduction de l'élément dans l'ANSYS

L'élément **Solide 65** est utilisé pour modéliser le béton et les pièces massives dans une structure renforcées par ferrailage en général, cet élément ayant huit nœuds, chaque nœud contient trois degrés de liberté, des translations dans les trois directions nodales, l'élément est capable d'une déformation plastique et de se fissurer dans les trois directions [36].

La géométrie et la position des nœuds de ce type d'élément sont indiquées dans la Figure IV.2.

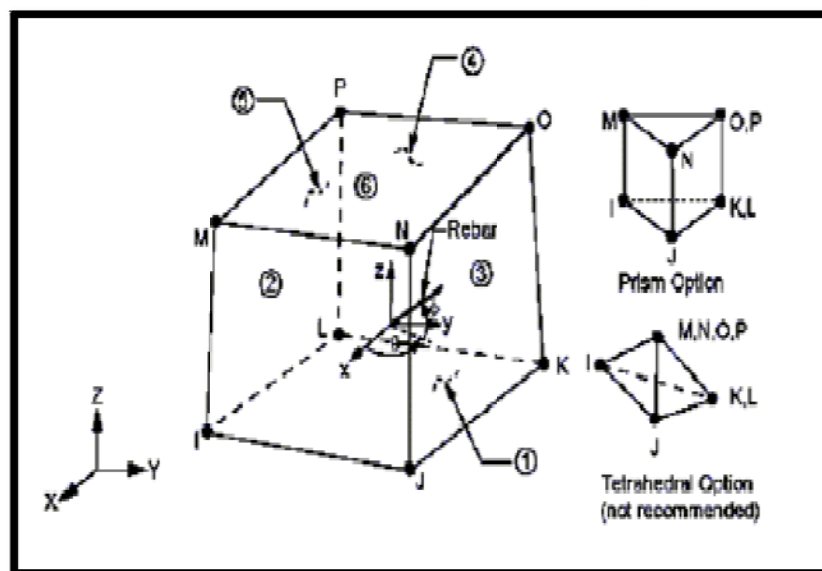


Fig IV.2 Solid 65 à 3D [36].

➤ **Propriétés de l'élément**

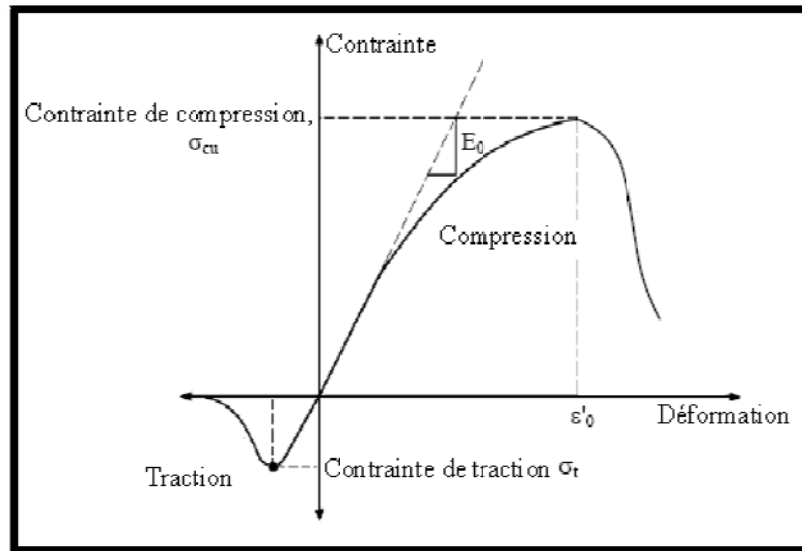


Fig IV.3 *Comportement typique du béton sous un chargement uniaxial [36].*

En compression, la courbe contrainte-déformation pour le béton est linéairement élastique jusqu'à environ 30 pour cent de la contrainte maximale à la compression. Au-dessus de ce point, la contrainte augmente graduellement jusqu'à la contrainte maximale à la compression (σ_{cu}). Après avoir atteint la résistance à la compression maximale (σ_{cu}), la courbe descend, et se produit l'écrasement et la rupture à une déformation ultime ϵ_{cu} .

En traction, la courbe contrainte-déformation pour le béton est approximativement linéaire élastique jusqu'à la contrainte maximale à la traction. Après ce point, la résistance du béton diminue graduellement à zéro [36].

Les résistances ultimes du béton à la compression et à la traction ont été calculées par les équations (1), et (2), respectivement [21]:

$$f'_c = \left(\frac{E_c}{4730} \right)^2 \tag{1}$$

$$f'_r = \sqrt{f'_c} \tag{2}$$

Où : E_c , f'_c et f'_t en MPa.

Le programme d'ANSYS exige la relation contrainte-déformation pour le béton dans la compression uniaxiale. Les équations suivantes ont été utilisées pour calculer la courbe multilinéaire isotropique de contrainte-déformation pour le béton.

$$f = \frac{E_c \varepsilon}{1 + (\varepsilon/\varepsilon_0)^2} \quad (3)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c} \quad (4)$$

$$E_c = \frac{f}{\varepsilon} \quad (5)$$

Avec :

f : contrainte à n'importe quelle déformation ε , en MPa.

ε : déformation à la contrainte f .

ε_0 : déformation à la résistance ultime de compression f'_c

La courbe contrainte-déformation est constituée par six points connectés par des lignes droites, la figure IV.4 montre la courbe contrainte-déformation simplifiée de béton en compression uniaxial qui a été employé dans cette étude.

► **Calcul les points 1 à 5:**

- **Point 1** : défini comme $0.30 f'_c$, est calculé par la relation contrainte-déformation du béton dans la partie linéaire (équation 5).
- **Les points 2, 3, et 4** : sont obtenus à partir de l'équation (3), où ε_0 est calculé à partir de l'équation (4).
- **Le point 5** : est défini par f'_c et ε_0 .

Dans cette étude, un comportement parfaitement plastique après le point 5 est supposé.

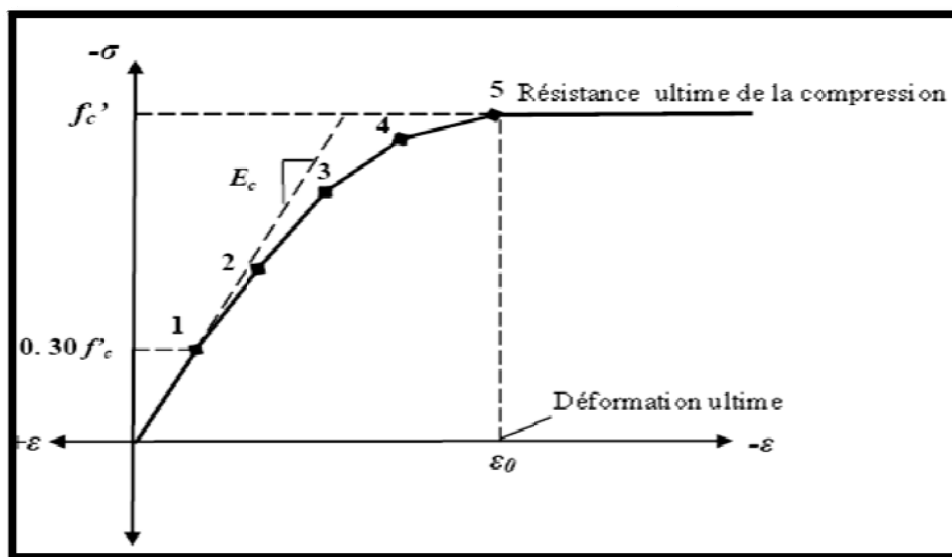


Fig IV.4 Diagramme contrainte-déformation simplifié du béton en compression uniaxiale [22].

Les propriétés linéaires isotropiques et multilinéaires isotropiques pour le béton sont [22]:

- Module élastique (E_c) ;
- Résistance à la compression uniaxiale ultime (f_c') ;
- Résistance à la traction uniaxiale ultime (f_t) ;
- Coefficient de poisson (ν) ;
- Coefficient de transfert de cisaillement (β_t) ;
- La relation contrainte-déformation pour le béton en compression uniaxial.

Le tableau IV.2 récapitule les différentes propriétés du béton utilisées dans cette études, sont ceux pour l'étude expérimentale, y compris le module d'élasticité, la résistance à la compression, la résistance à la traction et les six points concernant la courbe contrainte déformation.

Tableau IV.2 *Propriétés du béton*

Prescription du matériau	Type d'élément	Propriétés du Béton			
1	Béton "Solide 65"	Linéaire isotropique			
		E_c (MPa)		25000	
		PRXY= ν		0.2	
		Multilinéaire isotropique (courbe σ-ϵ)			
			Déformation (ϵ) 10^{-3}	Contrainte (σ) MPA	
		Point 1	0	0	
		Point 2	0.336	8.4	
		Point 3	0.672	15.43	
		Point 4	1.008	20.98	
		Point 5	1.344	24.73	
		Point 6	2.44	28	
		Béton			
		ShrCf-Op (β_t)	0.2	BiCompSt	0
		ShrCf-CI (β_c)	0.2	HydroPrs	0
		UnTensSt (f_{t28})	3.3	BiCompSt	0
		UnCompSt (f_{c28})	28	UnTensSt	0
TenCrFac		0			

IV.4.2.2 L'acier

Dans cette étude, le comportement de l'acier est supposé parfaitement élasto-plastique identique en traction et en compression. La figure IV.5 montre la relation contrainte-déformation utilisée dans cette étude.

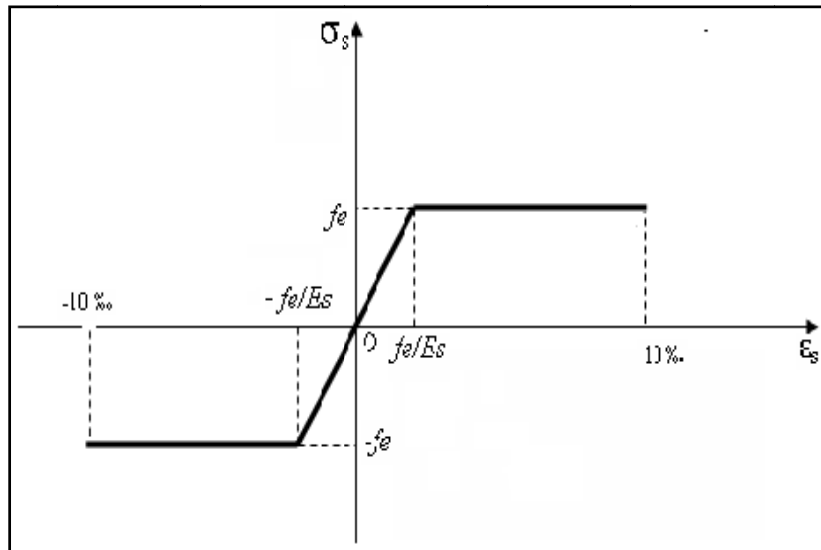


Fig IV.5 Courbe contrainte-déformation pour l'acier de renforcement [31].

➤ Introduction de l'élément dans l'ANSYS

L'élément (Link 8, 3D Spar) de la bibliothèque des matériaux dans L'ANSYS, est utilisé pour la modélisation de l'acier. Cet élément ayant deux nœuds, chaque nœud contient trois degrés de liberté et trois déplacements dans les directions X, Y, Z.

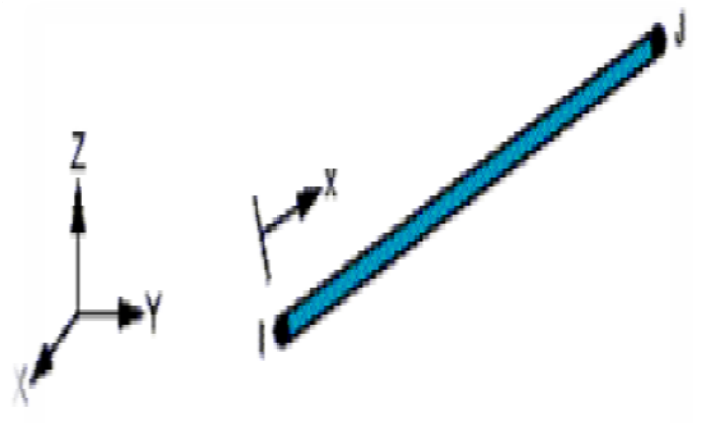


Fig IV.6 Link8 – 3-D spar [32].

Les propriétés de l'acier introduit dans L'ANSYS sont résumées dans le tableau IV.3.

Tableau IV.3 *Propriétés de l'acier (l'élément link 8)*

<i>Numéro du matériau</i>	<i>Type d'élément</i>	<i>Propriétés du matériau</i>	
2	L'acier du béton armé (link 8)	Linéaire isotropique	
		E_x (MPa) = E_s	200000
		$PRXY=v$	0.3
		Bilinéaire isotropique	
		f_y (MPa)	410
		E'_s	0
		Diamètre	
		Φ (mm)	12
3	L'acier du béton armé (link 8)	Linéaire isotropique	
		E_x (MPa) = E_s	200000
		$PRXY=v$	0.3
		Bilinéaire isotropique	
		f_y (MPa)	410
		E'_s	0
		Diamètre	
		Φ (mm)	10
4	L'acier du béton armé (link 8)	Linéaire isotropique	
		E_x (MPa) = E_s	200000
		$PRXY=v$	0.3
		Bilinéaire isotropique	
		f_y (MPa)	210
		E'_s	0
		Diamètre	
		Φ (mm)	6

IV.4.2.3 Matériaux composites

Les fibres de carbones imprégnés dans la résine époxydique constituent le matériau composite qui contient deux éléments la matrice et la fibre. Les deux constituants sont arrangés microscopiquement, comme l'illustre la figure suivante.

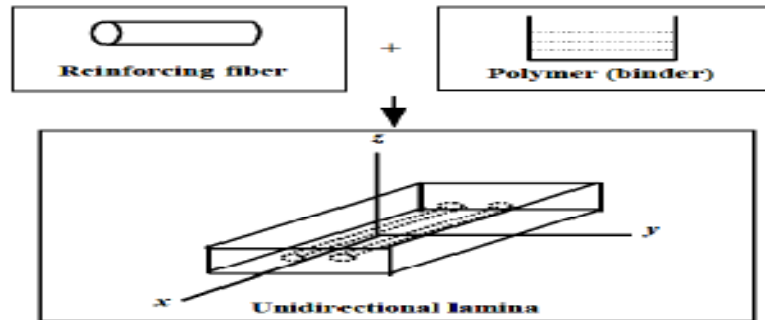


Fig IV.7 Constituants d'un matériau composite [19].

Les composites de FRP sont les matériaux anisotropes car ses propriétés ne sont pas les mêmes dans toutes les directions de x, y, et z. La direction de x est identique à la direction de fibre, et les directions de y et de z sont perpendiculaires à la direction de x. C'est un matériau particulièrement orthotropique est également transversalement isotropique, où les propriétés des composites de FRP sont presque les mêmes dans n'importe quelle perpendiculaire à la direction des fibres. Ainsi, les propriétés dans la direction de y sont identiques à celles dans la direction de z (Fig IV.7).

Les fibres de carbone sont utilisées généralement pour le renforcement de flexion grâce à leur grande contrainte de traction, le comportement des matériaux composites est donné par la figure par la figure IV.8. Le comportement montre la partie élastique caractérisée par une contrainte de traction de 965 MPa, et une déformation de 1.5%.

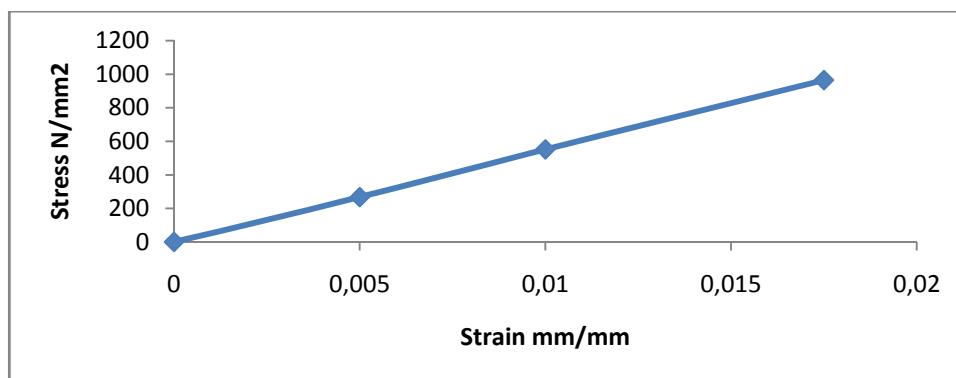


Fig IV.8 Courbe Contrainte – Déformation de CFRP [19].

Les données d'entrée nécessaires pour les composites de FRP dans les modèles d'élément finis sont comme suit [19]:

- Nombre de couches ;
- L'épaisseur de chaque couche ;
- L'orientation de la direction de fibre pour chaque couche (θ) ;
- Module d'élasticité du composite de FRP dans les trois directions (E_x , E_y , et E_z) ;
- Coefficient de poisson major pour les trois plans (ν_{xy} , ν_{yz} et ν_{xz}).
- Module de cisaillement du composite de FRP dans les trois plans (G_{xy} , G_{yz} et G_{xz}) ;

$$G_{xy} = \frac{E_x E_y}{E_x + E_y + 2E_x \nu_{xy}}$$

➤ **Introduction de l'élément dans l'ANSYS**

L'élément solid46 (figure IV.9) est employé pour modéliser les composites de FRP. L'élément a trois degrés de liberté à chaque nœud et des translations dans les directions nodales de x, de y, et de z.

Solid46 tient compte de jusqu'à 100 couches différentes avec différentes orientations et propriétés orthotropique dans chaque couche.

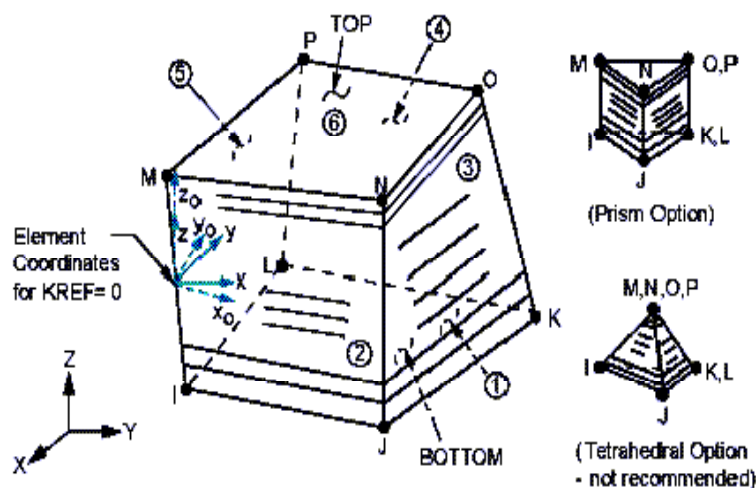


Fig IV.9 L'élément solid46 [18].

Le tableau IV.4 résume les différentes propriétés du matériau composite de fibre de carbone utilisées dans cette étude.

Tableau IV.4 Différentes propriétés du matériau composite (solide 46)

Numéro du matériau dans les modèles	Composites FRP	Module d'élasticité (MPa)	Coefficient de poisson	Résistance à la traction (MPa)	Module de Cisaillement (MPa)	Epaisseur (mm)
5	CFRP	$E_x=6200$	$\nu_{xy}=0.2$	958	$G_{xy}=3270$	1.5
		$E_y=4800$	$\nu_{yz}=0.2$		$G_{yz}=3270$	
		$E_z=4800$	$\nu_{xz}=0.3$		$G_{xz}=1860$	

IV.4.3 Analyse numérique

IV.4.3.1 La géométrie

Les poutres ont les dimensions suivantes : une longueur totale de 1700 mm avec une longueur entre nus d'appuis de 1500 mm, par contre la section transversale est de (160*180 mm²). La figure IV.10 donne une illustration du schéma statique équivalent des poutres d'essai [11].

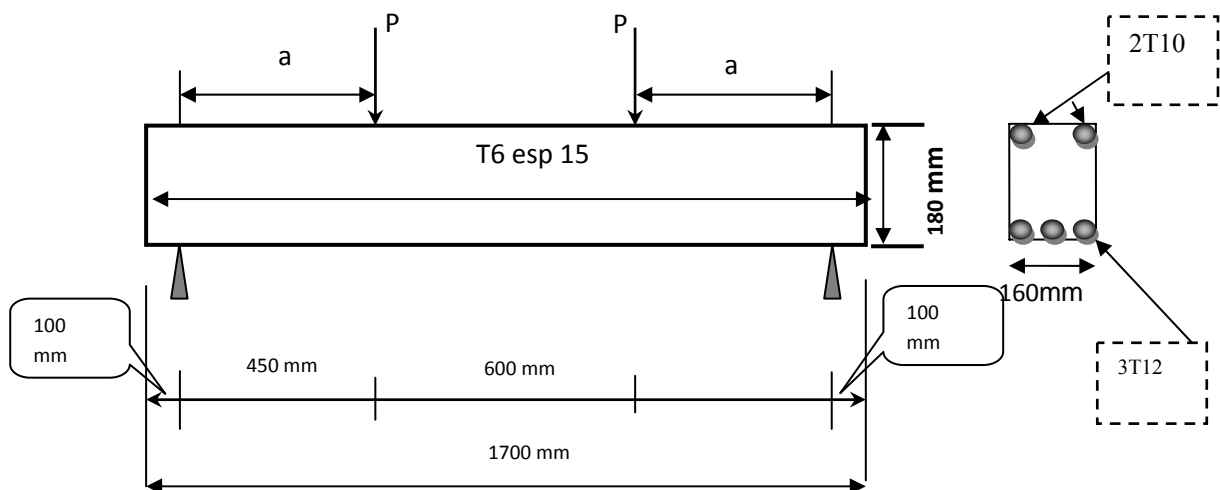


Fig IV.10 Schéma statique de chargement

La géométrie du béton (solid 65), et du matériau composite (solid 46) est construite par un élément volume (bloc), l'acier est présenté par des éléments barres (link8). Pour établir la bonne distribution de la charge, et pour garantir la meilleure connectivité entre les différents éléments discrétisés, ces éléments sont connectés avec le béton nœud par nœud.

IV.4.3.2 Le ferrailage

Le ferrailage de la poutre dans le modèle d'élément fini adopté par ANSYS, est représenté par l'élément Link 8. Le ferrailage contient des barres longitudinales et des armatures transversales (étriers). La figure IV.11 représente le ferrailage modélisé par le logiciel ANSYS.

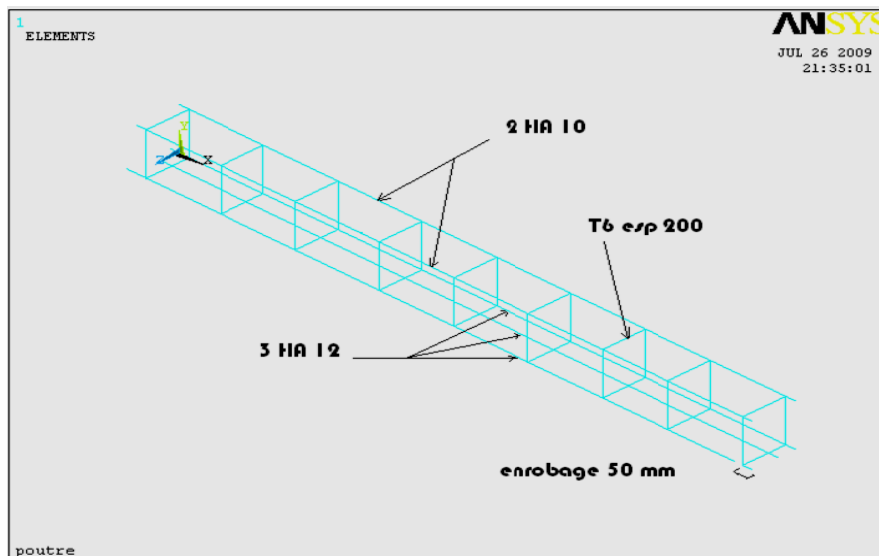


Fig IV.11 ferrailage de la poutre.

IV.4.3.3 Modes de renforcement modélisés

Parmi les poutres testées expérimentalement, on a choisi la poutre RA4 qui a été renforcée par une lamelle de fibre de carbone (Sikacarbodur) et de tissu SikaWrap à 2/5 de la hauteur (7 cm) [11].

C'est le mode appliqué en pratique pour poutres de ponts : le renforcement de la poutre par une lamelle de fibre de carbone en bandes sur toute la hauteur de chaque face latérale plus la face inférieure. La figure IV.10 représente mode de renforcement modélisé par le logiciel AYNSS.

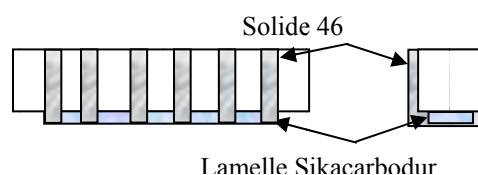


Fig IV.12 Mode renforcement de la poutre [11].

IV.4.3.4 Discrétisation par éléments finis

Dans une première étape, une analyse par éléments finis nécessite le maillage du modèle. En d'autres termes, le modèle est divisé en un certain nombre de petits éléments, et après le chargement, les contraintes et les déformations sont calculées aux points d'intégration de ces petits éléments.

La formulation de la géométrie du matériau béton (solid 65), qui est considéré comme un élément de volume (block), le nombre de maille de cet élément est pris égal à 2176 éléments.

Le deuxième matériau est l'acier (link 8), qui est considéré comme un élément barre. Cet élément est discrétisé par des éléments barres connectés nœud par nœud dans le béton, pour assurer la connectivité nodale. Le ferrailage contient des barres longitudinales de haute adhérence qui sont divisé en 1848 éléments et des armatures transversales qui sont divisé en 40 éléments. (La construction de phrase).

Tableau IV.5 *Nombre d'éléments discrétisés*

Modèle	Nombre d'éléments			
	Solide 65	Link 8	Layer 46	Total
Poutre non renforcée	2176	1888	//	4064
Poutre renforcée	2175	1888	224	4288

Les nœuds de l'élément de couche de FRP (solid46) et les pièces discrétisées de l'élément de l'acier (link 8) sont reliés aux nœuds des éléments béton (solide65) adjacents afin de fournir le lien parfait (*glue*) entre les deux matériaux. La figure IV.11 illustre la connectivité des éléments. Dans cette étude, la liaison parfaite entre des matériaux a été assumé. Pour fournir le lien parfait, l'élément de liaison pour l'acier d'armature (link 8) était relié entre les nœuds de chaque élément en béton (solide65) adjacent, si les deux matériaux partage les mêmes nœuds. La même approche a été adoptée pour les matériaux composites CPRF (solid46).

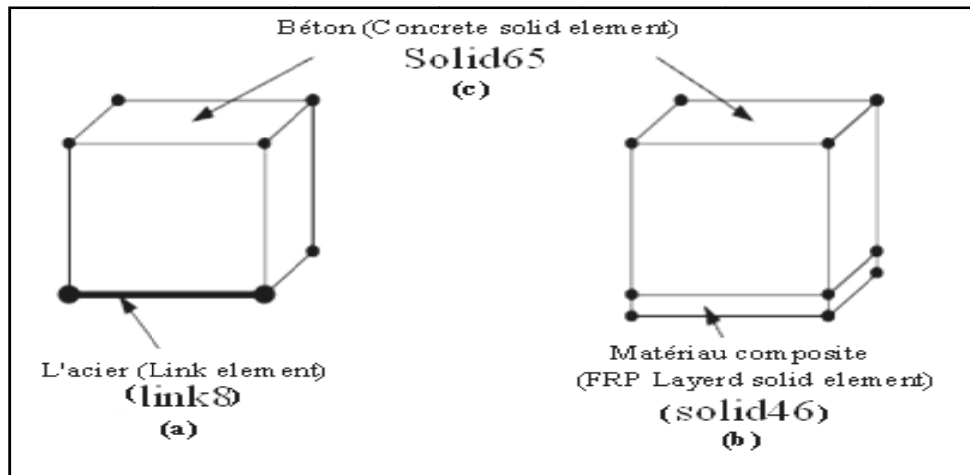


Fig IV.13 *Connectivité d'élément, (a) connections de l'élément béton et l'acier, (b) connections de l'élément béton et la couche de FRP [36].*

IV.4.3.5 Chargement et condition aux limites

Les deux poutres, qui sont testées en flexion par quatre points sont données dans la figure IV.14 Le modèle est chargé avec les mêmes conditions que l'essai expérimental.

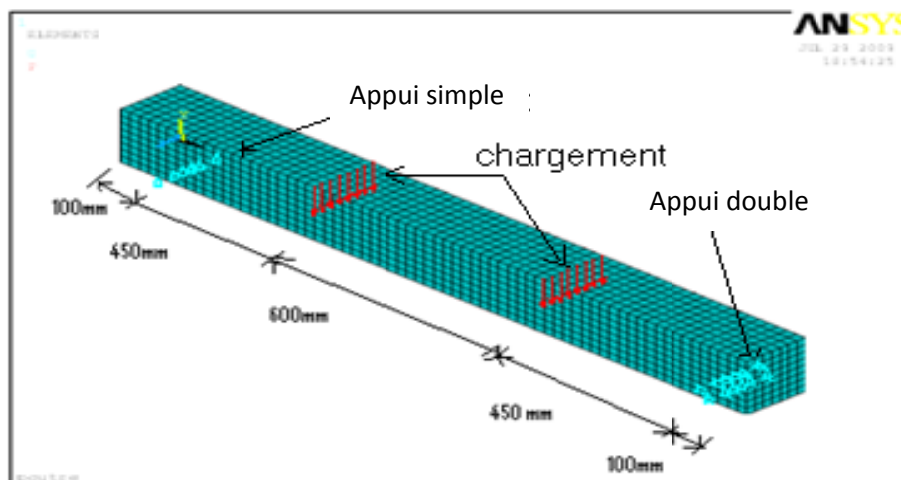


Fig IV.14 *chargement et condition aux limites*

IV.5 Résultats Numériques et discussion

Dans ce paragraphe, on présentera les résultats de l'étude numérique réalisée sur les spécimens de poutres décrits aux paragraphes précédents. Puis on va discuter ces résultats et les faire comparer aux résultats expérimentaux. A partir des caractéristiques mécaniques et

géométriques de chaque matériau, le logiciel ANSYS, calcule les contraintes, les déformations et les déplacements.

IV.5.1 Poutre en béton armé non renforcée

➤ Courbe Force – Flèche

La courbe force –flèche de la poutre non renforcée au milieu est donnée dans la figure IV.15. Cette courbe montre qu'il y a trois phases à caractériser :

- Une augmentation considérable de la flèche jusqu'à une charge de 40 KN, correspondant expérimentalement à *une phase de béton armé non fissuré*, où la flèche croît linéairement avec la charge; la flèche atteinte est d'environ 2.35 mm.
- Une augmentation rapide de la flèche allant jusqu'à 4.95 mm pour un chargement de 75 KN, correspondant expérimentalement à *une phase de béton armé fissuré*, due à la propagation des fissures.
- Au delà d'une charge de 80 KN, une évolution rapide de la flèche correspondant expérimentalement à *une phase de béton armé fissuré plastique* due à un écoulement plastique, la flèche mesurée à mi-travée est de 11 mm et la charge de rupture était de 95 KN.

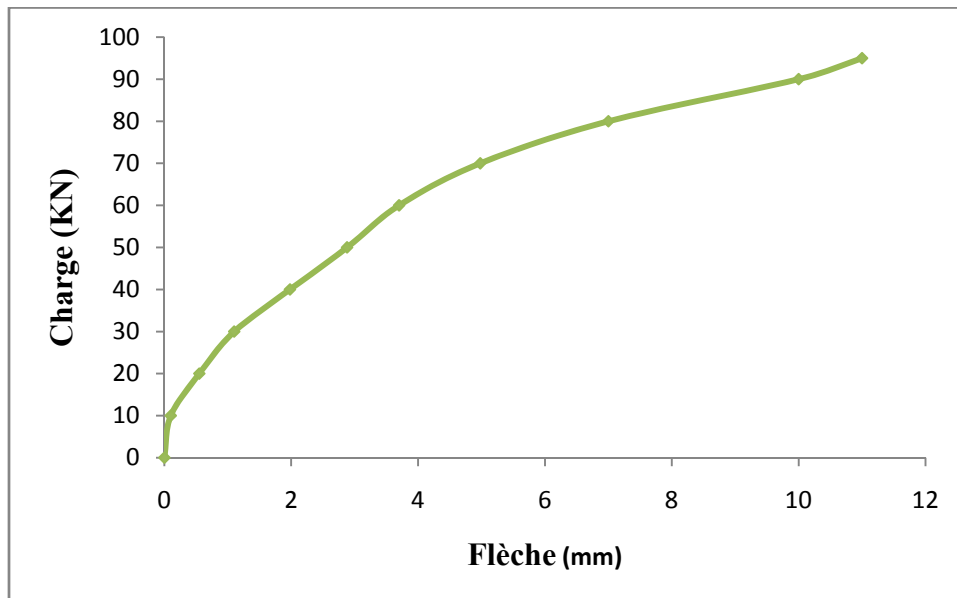


Fig IV.15 Courbe Force -Flèche au milieu de la poutre Non Renforcée ANSYS

➤ **Courbe Force- déformation**

Les figures IV.16, IV.17 donnent la déformation et la courbe charge-déformation de la poutre non renforcée. D'après la figure IV.16, On remarque deux couleurs essentielles :

- La couleur rouge représente la partie la plus dangereuse, Ces déformations sont dues due aux contraintes de traction
- La couleur bleue aux niveaux de l'application de la charge due aux contraintes de compression.

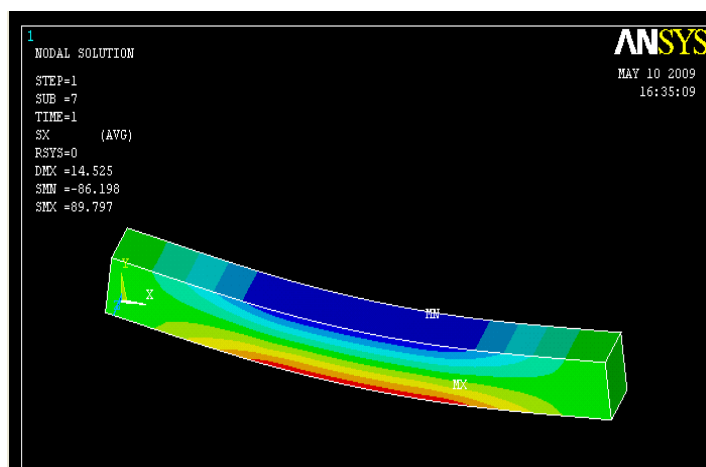


Fig IV.16 Déformation de la poutre.

Les déformations du béton et des armatures tendues pour les poutres témoins sont données dans la figure IV.17.

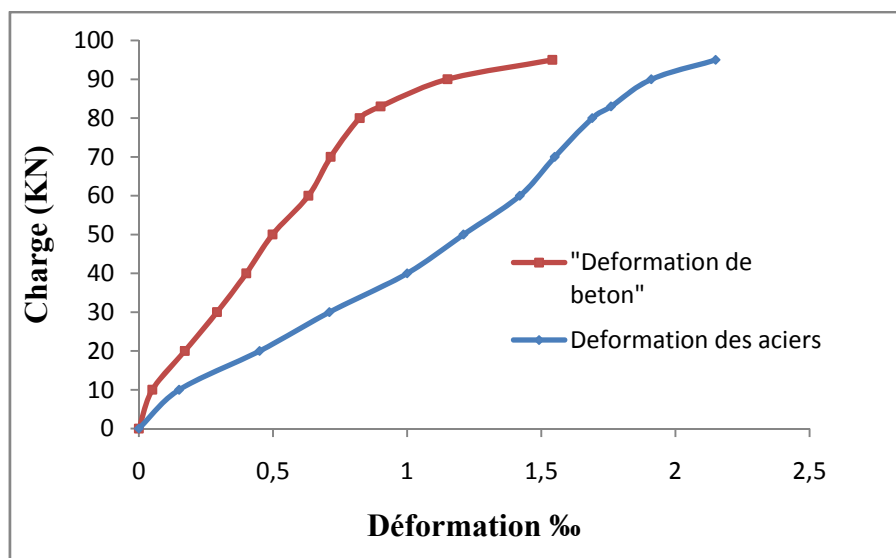


Fig IV.17 Force -Déformation du béton et de l'acier pour la poutre témoin

IV.5.2 Résultats obtenu par ANSYS pour la poutre en béton armé renforcée par matériaux composites à base de TFC

Ce type de renforcement est généralement le mode utilisé dans la pratique surtout pour le cas de renforcement des ponts. Ce mode de renforcement est limité à la partie inférieure de la poutre sur une longueur de 120 cm puis le collage de bandes de tissu de nombre de six (6) de 10 cm de large et de 52 cm de longueur sont placées sur les faces latérales et la face inférieure espacées entre elles de 12 cm. Ce mode de renforcement est illustré sur la figure IV.18.

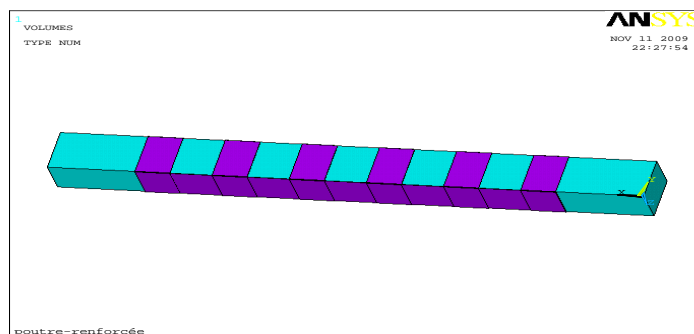


Fig IV.18 Poutre renforcée par matériaux composites

➤ **Courbe Charge-Flèche**

La figure IV.19 représente les courbes force –flèche au milieu des poutres renforcées, la rupture se fait simultanément par *cisaillement* (effet de l'effort tranchant) et par *décollement de matériaux composites* à 150 KN avec un gain de 57.89% à celles de référence. La flèche mesurée à mi-travée est de 7.43 mm.

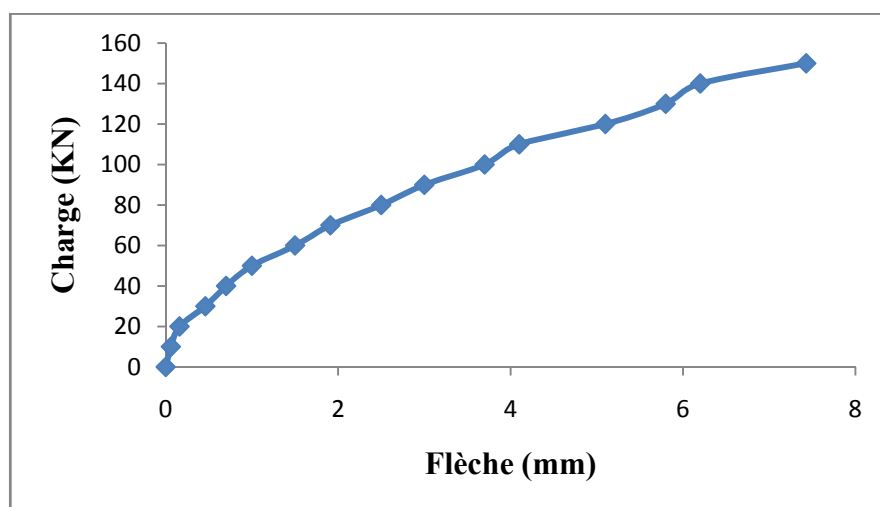


Fig IV.19 Courbe Force -Flèche au milieu de la poutre renforcée

➤ Courbe Force- déformation

Les figures IV.20, IV.21 donnent respectivement les courbes charge-déformation du béton, des aciers et les matériaux composites au milieu de la poutre.

Le raccourcissement maximal du béton est de l'ordre de 1.36‰, et l'allongement maximal des aciers est de 2.75‰.

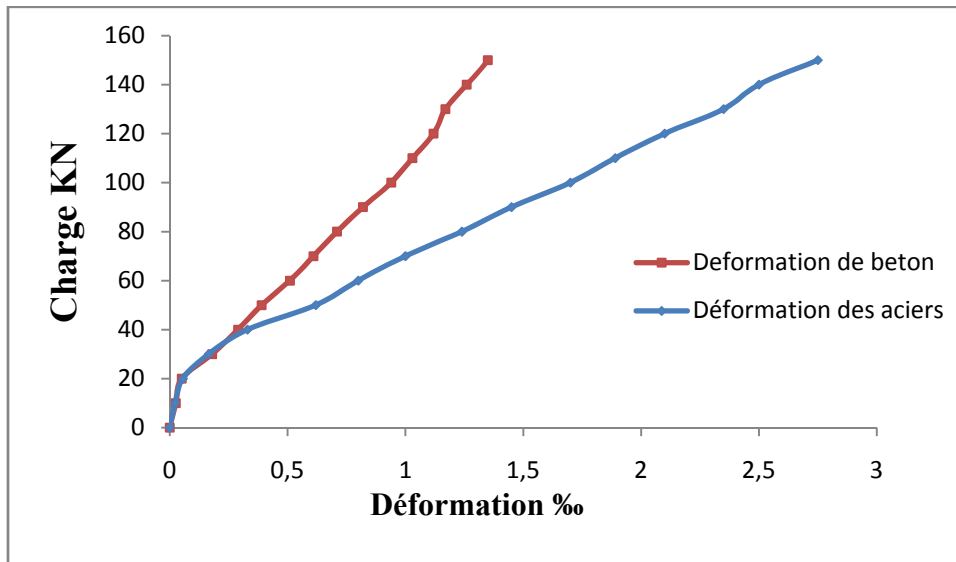


Fig IV.20 Force -Déformation du béton et de l'acier pour la poutre renforcée

La déformation maximale des matériaux composites est de l'ordre de 1.49‰.

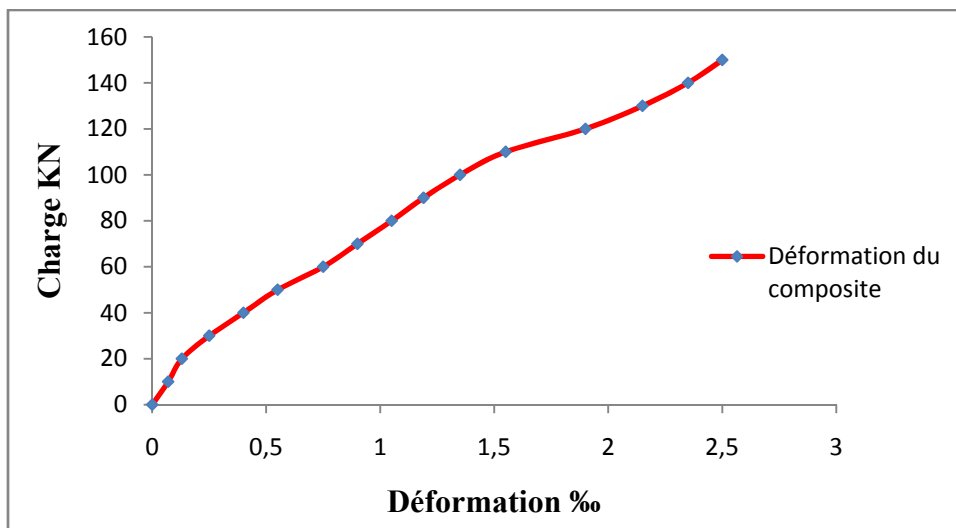


Fig IV.21 Force -Déformation des matériaux composites pour la poutre renforcée

IV.5.3 Comparaison entre les poutres renforcées et la poutre de référence

IV.5.3.1 Comparaison Numérique/Numérique

➤ **Charge-Flèche** La figure IV.22 compare les deux modèles éléments finis en terme Charges-Flèches obtenues par la modélisation des poutres renforcée et non renforcée. La rupture observée pour la poutre renforcée par matériaux composite, à base de fibres de carbone (solide 46) et la poutre non renforcée est respectivement à une charge de 150 KN, 95 KN. Le gain en termes de capacité portante est d'environ 57.89 %, la flèche de rupture est de 7.43 mm en comparaison à 11 mm pour les poutres de référence, soit une diminution de 67% environ. Dans ce mode, on constate une nette augmentation du module d'élasticité ainsi qu'une augmentation de la plage élastique, ce qui indique le rôle joué par le composite de rigidifier la poutre.

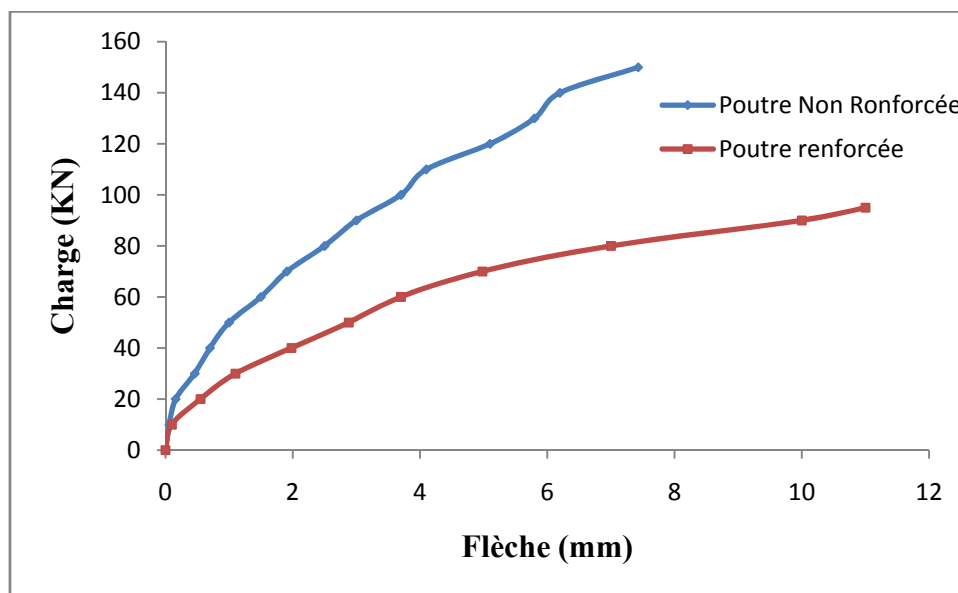


Fig IV.22 Charge –Flèche poutres renforcée et non renforcée modélisées par ANSYS

➤ **Force- Déformation :** La figure IV.23 compare les courbes charge-Déformation pour le béton et les aciers issus de la modélisation numérique pour chacune des deux poutres. En ce qui concerne la déformation du béton, On constate que des gains négligeables dans les poutres renforcées par rapport à la poutre de référence (0.18% à 0.31%). Cependant, des gains très significatifs sont observés pour les déformations des aciers dans les poutres renforcées par rapport à la poutre de référence.

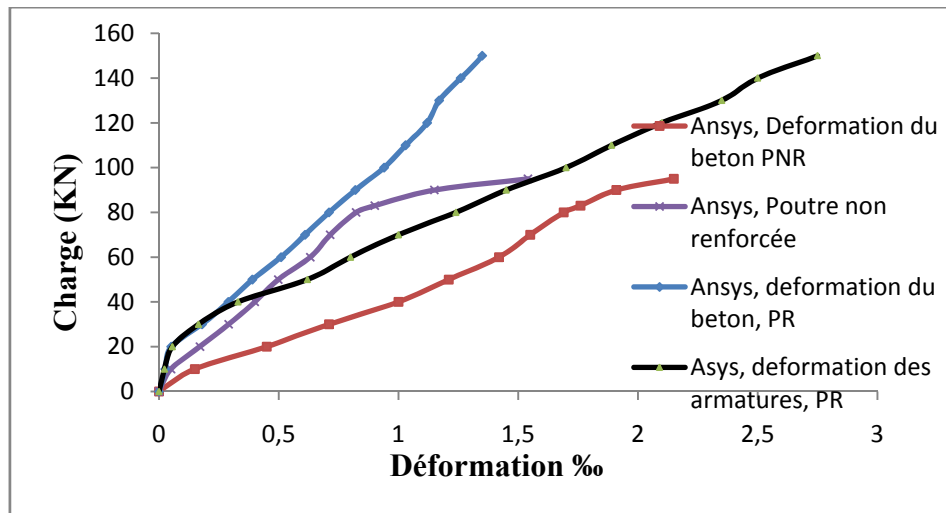


Fig IV.23 Charge –Déformation poutres pour les deux poutres modélisées par ANSYS

IV.5.3.2 Confrontement Numérique/Expérimentale

➤ Charge-Flèche

Les figures IV.21, IV.22 comparent les courbes charge-flèche issu de la modélisation et des essais expérimentaux pour chacune des deux poutres. Les courbes montrent une bonne concordance dans l'analyse par éléments finis avec les résultats expérimentaux.

Dans la plage linéaire, la courbe des résultats de l'analyse d'éléments finis est plus raide que celle des résultats expérimentaux, ce qui montre que la poutre modélisée par éléments finis est plus rigide que celle à partir des résultats expérimentaux. Pour la poutre non renforcée, la charge finale est de 95 KN pour le modèle est supérieure à la charge finale de 88 KN pour la poutre expérimentale par 7.95%.

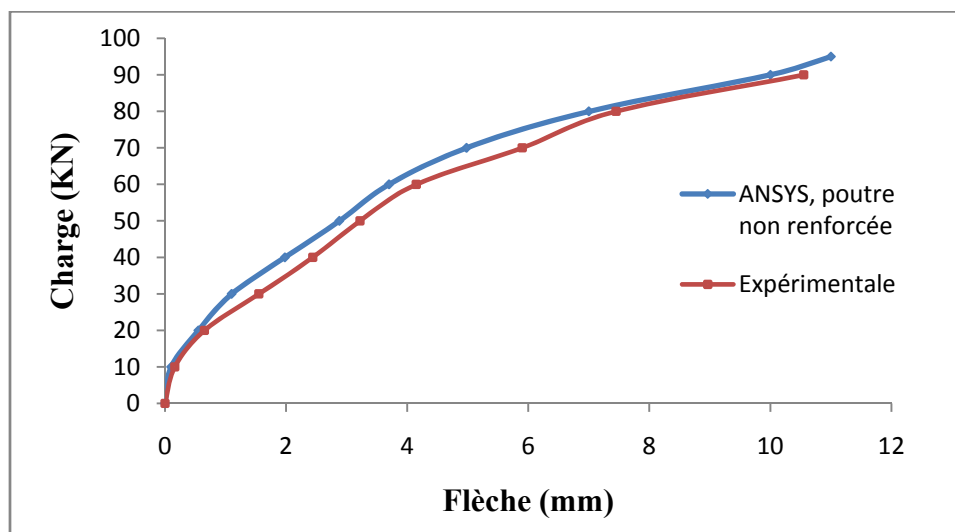


Fig IV.24 Courbes Charge –Flèche de la P N R Comparaison Numérique / Expérimentale

La courbe IV.20 montre que La charge de rupture de la poutre renforcée a été modélisée par éléments finis (150 KN) est supérieure à celle de l'expérimentation (140 KN).

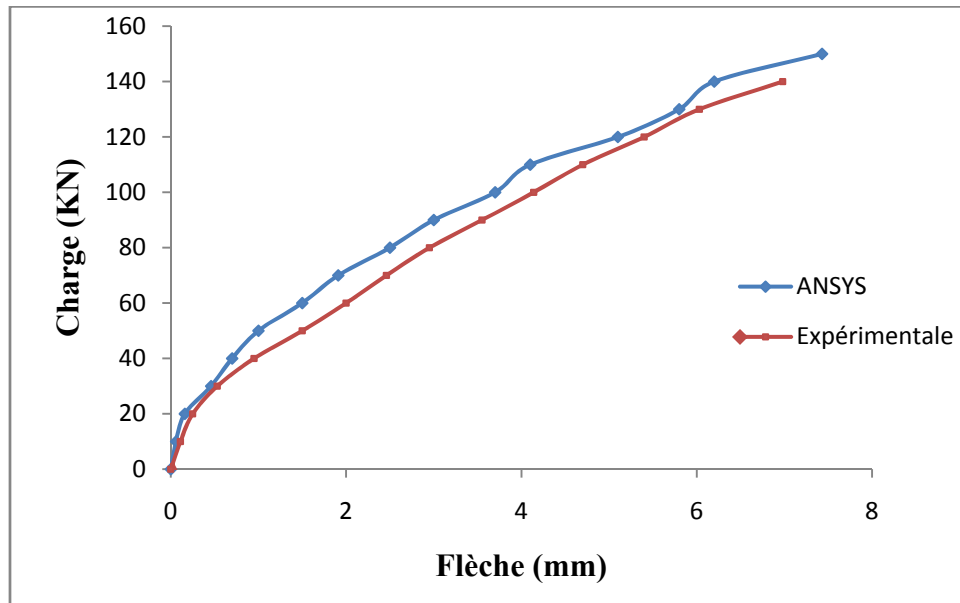


Fig IV.25 *Courbes Charge –Flèche de la PR Comparaison Numérique / Expérimentale.*

➤ **Force- Déformation :** Les figures IV.26, IV.27 comparent les courbes charge-Déformation issu de la modélisation et des essais expérimentaux pour chacune des deux poutres. Les courbes montrent une bonne concordance dans l'analyse par éléments finis avec les résultats expérimentaux.

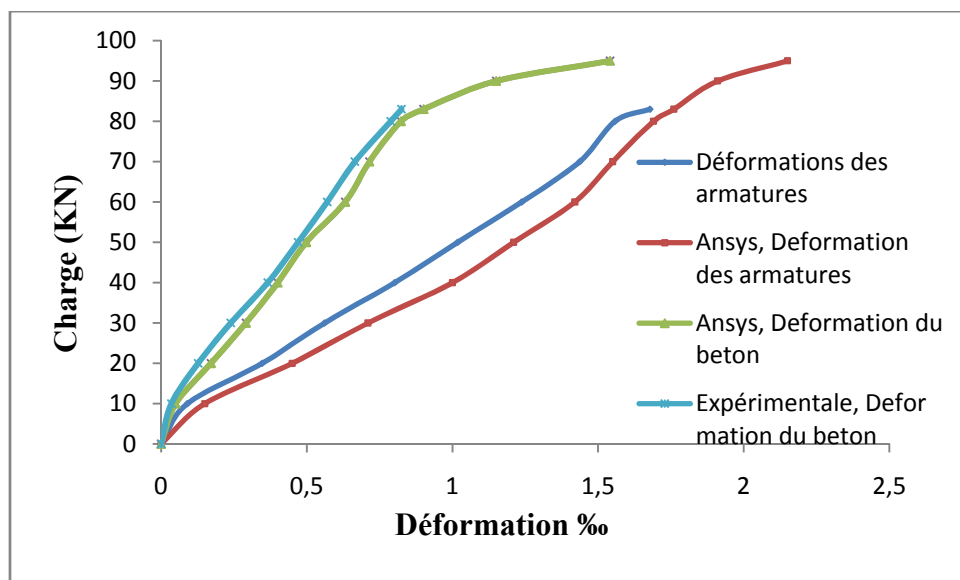


Fig IV.26 *Courbes Charge –Flèche de la PNR Comparaison Numérique / Expérimentale.*

On remarque que le béton et l'acier sont loin de leurs limites ultimes qui sont respectivement 3.5‰ et 10‰. Donc on constate que les poutres n'ont pas été exploitées à son maximum.

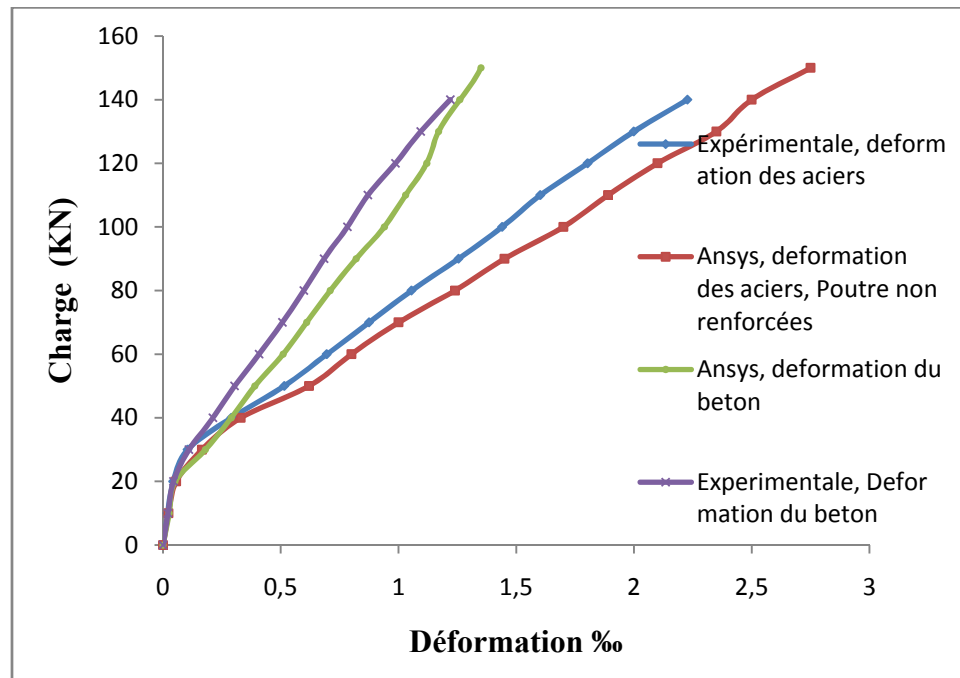


Fig IV.27 Courbes Charge –Flèche de la PR Comparaison Numérique / Expérimentale.

IV.6 Conclusion

En général, les courbes charge-flèche pour chacune des deux poutres de la modélisation par d'éléments finis sont comparables aux résultats expérimentaux. Un léger décalage entre les résultats numériques et expérimentaux est observé.

Les courbes charge-flèche montrent que toutes les poutres du modèle éléments finis est plus rigide que celles de l'expérimentation, Plusieurs facteurs provoquent la plus grande rigidité dans les modèles éléments finis :

- L'adhérence entre les matériaux (acier-béton-composites) est supposé parfaite (pas de fuite) dans les modèles d'éléments finis, mais cette hypothèse n'est pas vérifiée pour les poutres expérimentales ou un glissement peut se produit et l'action composée entre les matériaux est perdue.
- les microfissures produites par le retrait au séchage et de manutention sont présents dans le béton dans une certaine mesure, il s'agirait de réduire la rigidité des poutres de

l'expérimentation, tandis que les modèles éléments finis ne comprennent pas les microfissures en raison de facteurs qui ne sont pas intégrées dans les modèles.

L'analyse des résultats numériques nous permet de tirer les conclusions suivantes :

- Les résultats numériques obtenus montrent globalement une concordance raisonnablement bonne avec les résultats d'essais expérimentaux, et confirment clairement l'effet bénéfique du renforcement sur le comportement des poutres, qui se traduit notamment par la réduction des flèches, et l'augmentation des charges de rupture.
- Des gains de rigidité et de résistance à la flexion par le renforcement par matériaux composite à base de fibre de carbone CFRP.
- La comparaison entre les résultats expérimentaux et numériques a démontré que les prédictions obtenues avec le logiciel ANSYS 11 étaient réalistes et fiables en ce qui concerne le comportement des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites de fibre de carbone.

CHAPITRE V

MODELISATION DU COMPORTEMENT

DYNAMIQUE D'UN PONT EN BETON AVANT ET APRES LE RENFORCEMENT

CHAPITRE V : MODELISATION DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE D'UN PONT EN BETON AVANT ET APRES LE RENFORCEMENT

V.1 Introduction

Les méthodes d'analyse modale sont des méthodes d'investigation relativement récentes, qui ont été mises en œuvre pour établir et améliorer la connaissance du modèle dynamique des structures réelles. En effet, les paramètres significatifs permettant de représenter le comportement dynamique d'une structure linéaire quelle que soit sa complexité sont « concentrés » dans un nombre de paramètres modaux réduits : fréquences propres, amortissements et formes propres associés. Le comportement dynamique de la structure sous des conditions d'excitation particulières en l'absence de toute modélisation ne requiert que la seule connaissance de ces paramètres.

Pour éviter les problèmes d'amplification dynamique souvent synonymes d'un confort voir de rupture, on peut souhaiter lors de la définition de la structure qu'elle n'ait pas de fréquence propre dans une bande donnée. La base modale, doit donc être calculée et la conception de la structure doit parfois être modifiée. Par ailleurs, même si la notion n'a pas de sens physique immédiat car les modes propres calculées ont une amplitude indéterminée. L'équation des vibrations libres sous une forme discrétisée est [38] :

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{c}\dot{\mathbf{y}} + \mathbf{K}\mathbf{y} = 0 \quad \text{V.1}$$

Où : **M** : La matrice de masse ;

K : La matrice de raideur ;

C : Coefficient d'amortissement

La solution de l'équation V.1 s'écrit : $y(t) = Ge^x$ V.2

En substituant cette expression dans l'équation V.1 on obtient un système d'équations différentielles couplées sans seconde membre, à coefficient constante. Conformément à la théorie de cette classe d'équations, on peut rechercher alors des solutions sous la forme :

$$(M s^2 + C s + K) G e^x = 0 \quad \text{V.3}$$

En simplifiant par $M G e^x$ et en posant $\omega^2 = K/M$. Il en résulte une équation polynomiale de degré n en ω^2 . Cette équation polynomiale est appelée équation caractéristique du système.

ω_i : est la pulsation propre associée au vecteur propre a_i et s'exprime en radian par seconde (rd/s),

$f_i = \omega_i / 2\pi$, est la fréquence propre associée au vecteur propre x_i et s'exprime en Hertz (Hz).

V.2 Modélisation du comportement dynamique d'une poutre en béton armé avant et après renforcement

Avant d'entamer la modélisation du pont, nous avons étudié le comportement dynamique de la poutre de l'expérimentation, avant et après le renforcement par matériaux composite à base de fibre de carbone (solide 46), afin de voir l'influence dynamique u renforcement par matériaux composites ainsi une étude comparative globale, statique et dynamique.

V.2.1 Introduction des données dans L'ANSYS

➤ Propriétés géométriques de la poutre

Dans cette étude, On a conservé les mêmes spécimens des poutres telles qu'étudiées statiquement dans le chapitre précédant. La figure V.1 représente les Propriétés géométriques de la poutre.

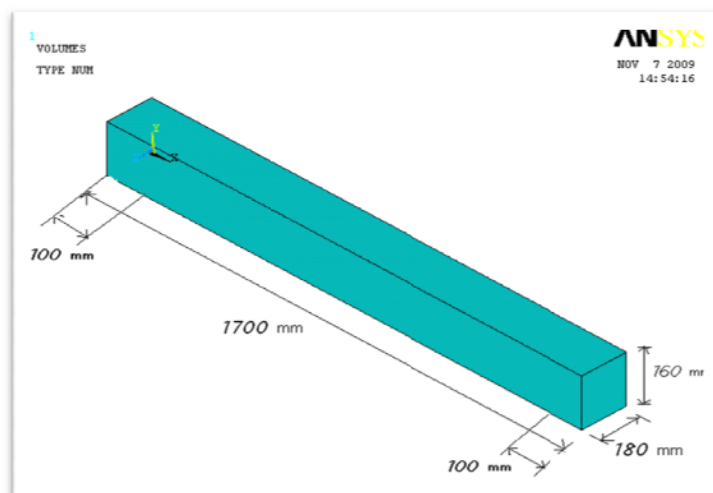


Fig V.1 Propriétés géométrique de la poutre étudiée.

➤ **Propriétés mécaniques des matériaux**

Le tableau 4.1 récapitule des différentes propriétés mécaniques des éléments introduisant dans l'ANSYS.

Tableau V.1 Propriétés mécaniques des matériaux

Elément	Prescription du matériau	Propriétés de matériau
Béton (Solide 65)	1	E = 25000 MPa ; v = 0.2 ; ρ = 2.5 t/m3.
Acier (Link 8)	2	E = 210000 MPa ; v = 0.2 ; A _i = 3φ12.
	3	E = 210000 MPa ; v = 0.2 ; A _i = 2φ10.
	4	E = 210000 MPa ; v = 0.2 A _i = φ6 Espacées de 0.17 m L'enrobage est de 20 mm.
Matériaux composites (Layerde 46)	5	E _x = 62000, E _y = 4800, E _z = 4800. v _{xy} = 0.2, v _{xz} = 0.2, v _{yz} = 0.3 f _t = 958 MPA G _{xy} = 3270, G _{xy} = 3270, G _{xy} = 1860 E _p = 2 mm

➤ **Condition aux limites**

La figure V.2 illustre la position des appuis, il s'agit de deux appuis dont l'un est simple et l'autre double avec une longueur entre nus d'appuis de 150 cm.

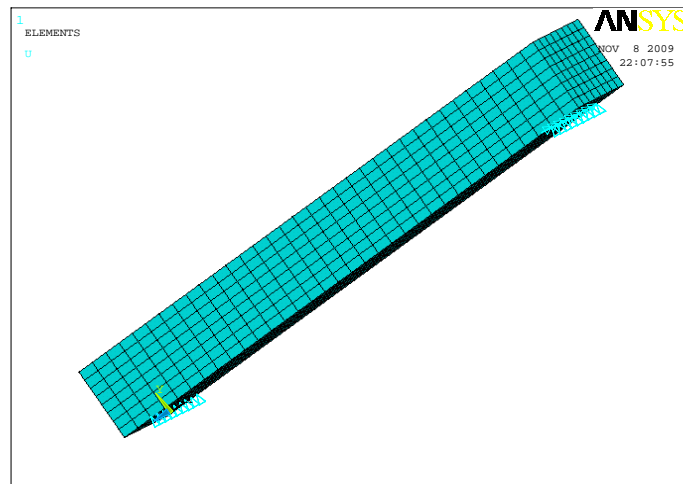


Fig V.2 Conditions aux limites des poutres étudiées

Mode de renforcement

La manière de renforcement des poutres par le composite est illustrée dans la figure V 3.

- 120 cm sur la partie inférieure de la poutre ;
- collage de bandes de tissu de nombre de six (6) de 10 cm de large et de 52 cm de longueur sont placées sur les faces latérales et la face inférieure espacées entre elles de 12 cm.

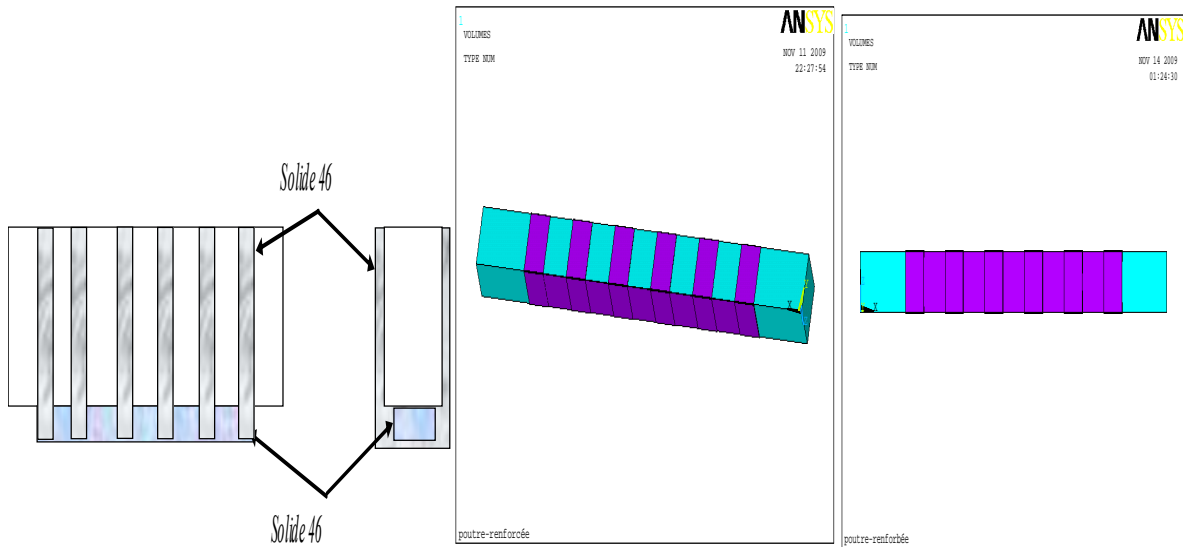


Fig V.3 Mode de renforcement de la poutre étudiée

➤ **Maillage, et ferrailage de la poutre :** La figure V.4 donne le maillage et le ferrailage de la poutre. Le nombre d'éléments pris dans ce maillage est donné comme suit:

- Béton (*Solide 65*): 2176 éléments,
- Armatures (*link 8*) : 1848 éléments (armatures longitudinales), 40 éléments (armatures transversales)
- Matériau composite (*layerd 46*) : 224 éléments

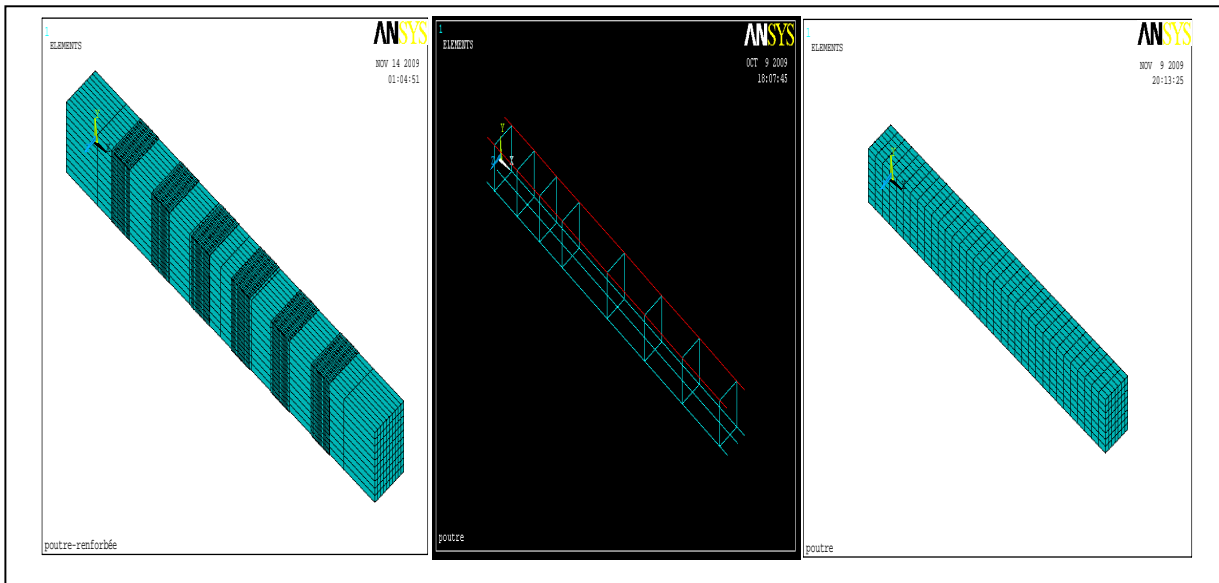


Fig V.4 *Discretisation par éléments finis 1. Matériaux composite 2. Acier 3. Béton*

V.2.2 Résultats obtenus et discussion

Puisque le type de l'analyse est modal, on s'intéresse aux fréquences propres. Les fréquences modales de l'analyse par MEF de la poutre avant, et après renforcement par matériaux composites sont données dans le tableau V.2 avec les formes des modes correspondantes illustrées dans les figures V6 à V11.

Tableau V.2 *Fréquences modales de la poutre avant et après renforcement*

Mode	Fréquence Avant renforcement (Hz)	Fréquence Après renforcement (Hz)	Différence %	Classification du mode
1	32.07	36.40	12.37	Fléchissement longitudinal
2	46.51	51.36	10.24	Fléchissement Vertical
3	92.67	102.64	10.75	Fléchissement latérale
4	115.61	119.25	3.11	2 ^{ème} Fléchissement Vertical
5	131.50	149.76	13.88	Torsion
6	173.24	191.66	10.63	3 ^{ème} Fléchissement Vertical

Les modes de fréquences obtenues par de la modélisation de la poutre, avant et après renforcement par matériaux composites CFRP, donnent toujours une nette augmentation de la fréquence allant de 3.11 jusqu'au 14%.

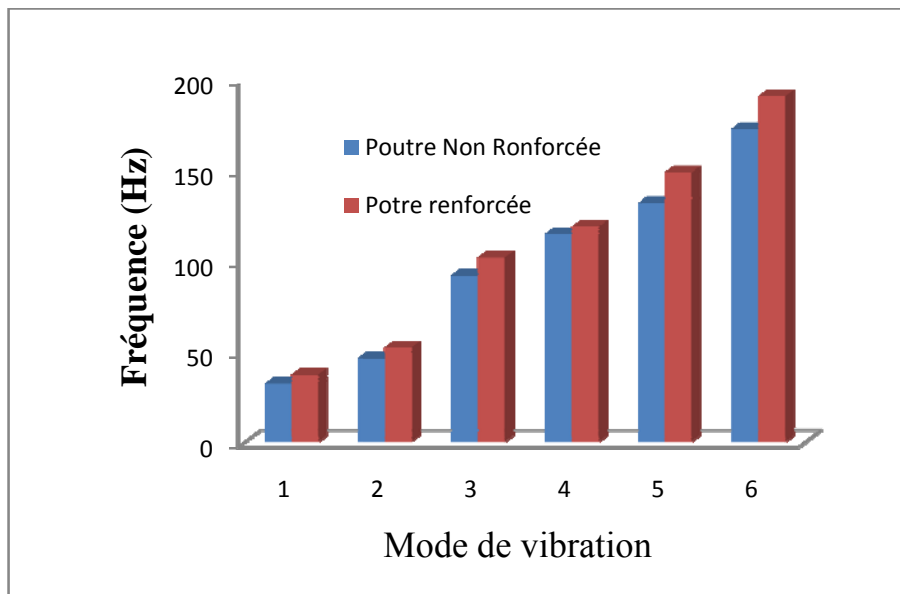
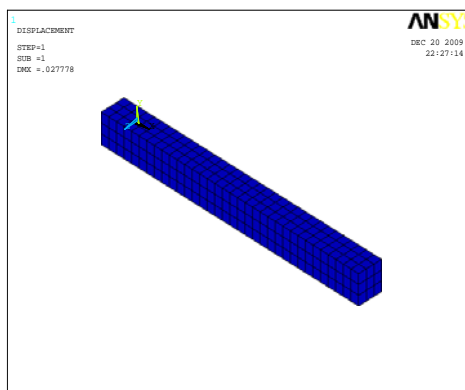
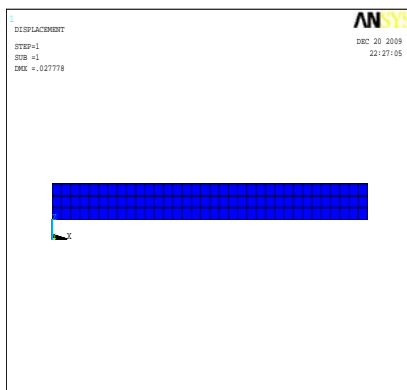


Fig V.5 *Histogramme des fréquences de poutres*

Les matériaux composites à base de fibres de carbone influent par excès sur les fréquences propres des modes prépondérantes de la poutre, et cela est dû à la variation de la rigidité K de la poutre.

La comparaison des résultats obtenus de la modélisation des deux poutres, renforcée et non renforcée, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Les matériaux composites jouent un grand rôle dans la diminution de l'effet dynamique sur les poutres, par l'augmentation de la rigidité et par conséquent la diminution de la période de l'ouvrage.
- Les matériaux composites participent à la stabilité dynamique des ouvrages par leur grand module d'élasticité.

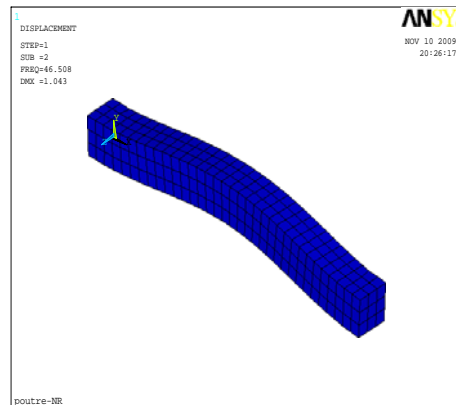
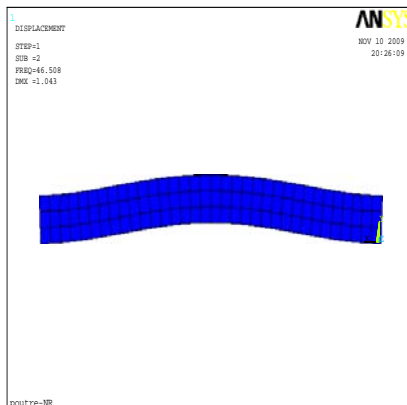


FPNR= 32.07

FPR= 36.4

D % = 12.37

Fig V.6 forme du premier mode

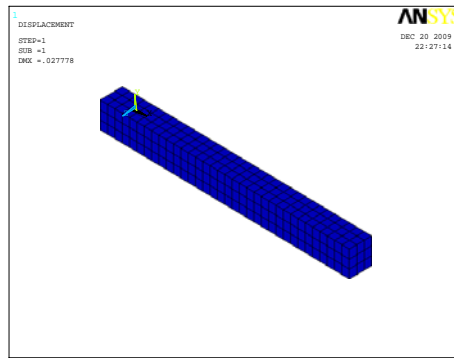
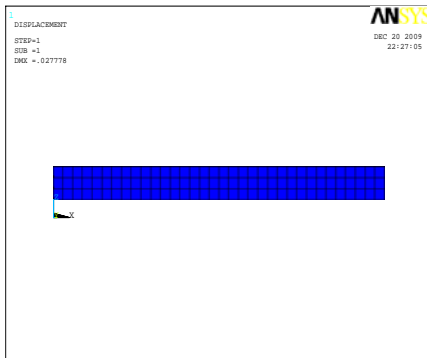


FPNR= 46.51

FPR= 51.36

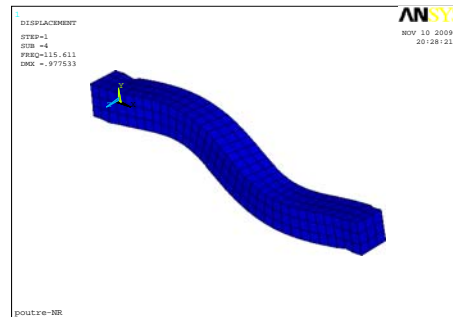
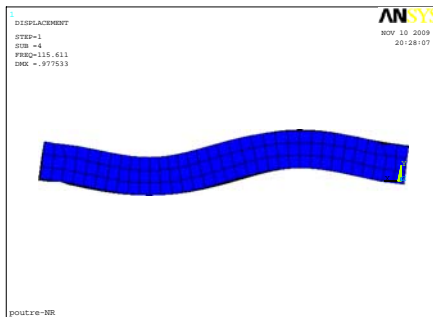
D % = 10.24

Fig V.7 forme du deuxième mode



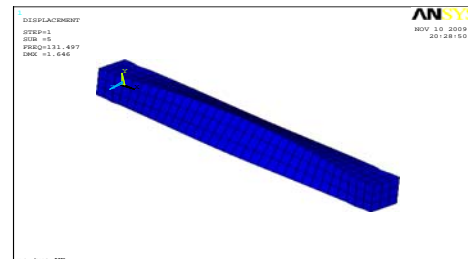
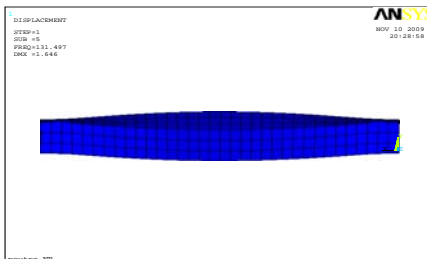
FPNR= 115.6
 FPR= 119.25
 D % = 3.11

Fig V.9 forme du quatrième mode



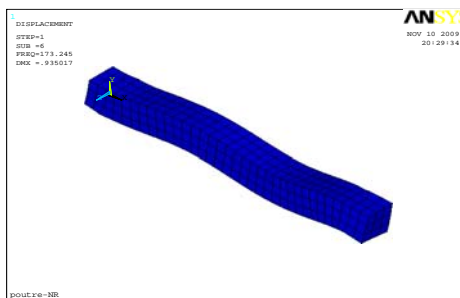
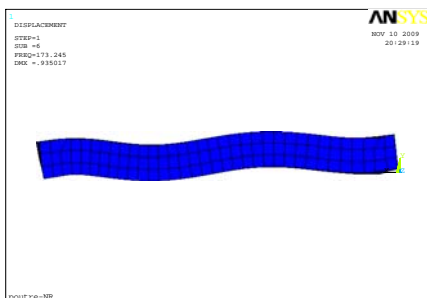
FPNR= 92.97
 FPR= 102.64
 D % = 10.75

Fig V.8 forme du troisième mode



FPNR= 131.5
 FPR= 149.25
 D % = 13.88

Fig V.10 forme du cinquième mode



FPNR= 173.24
 FPR= 191.66
 D % = 10.63

Fig V.11 forme du sixième mode

V.3 Modélisation du comportement dynamique d'un pont en béton avant et après le renforcement

V.3.1 Introduction

Un modèle numérique a été développé dans le but d'estimer les fréquences propres ainsi que les modes de vibration associés d'un pont à poutres en béton armé sur l'Oued Oumazer dans la ville de Cherrhell en Algérie.

Par ailleurs une étude expérimentale a été réalisée sur ce pont [33]. Le traitement des mesures obtenues lors de ces tests permet de déterminer les caractéristiques dynamiques de l'ouvrage, Les fréquences obtenues par le modèle 3D sont comparées à celles obtenues expérimentalement.

ANSYS a été utilisé pour modéliser le pont Oued Oumazer. En raison de la géométrie beaucoup plus complexe et le renforcement de détails par rapport à la pleine dimension des poutres, plus de temps et d'efforts de modélisation sont néanmoins nécessaires.

Une étude paramétrique, avec ANSYS, a été menée dans le but de mettre en évidence les avantages et les inconvénients liés à l'utilisation des matériaux composites pour le renforcement. Le pont mentionné précédemment a été inspiré par la modélisation de la poutre étudiée précédemment.

V.3.2. Description du cas d'étude et diagnostic

Le pont en question est un passage supérieur sur Oued Oumazer se trouvant à Cherrhell dans la wilaya de Tipaza, distante de 80Km à l'ouest d'Alger, se localisant dans la zone III caractérisée par des fortes activités sismiques.

L'ouvrage est un pont hyperstatique à trois travées, le tablier est constitué de quatre poutres maîtresses en béton armé, à inertie variable, liées par des entretoises et longrines surmontées d'une dalle en béton armé, tandis que l'infrastructure est composée de deux piles, qui sont constituées de quatre poteaux reliés par voiles, et de deux sommiers sous forme d'appuis simples en béton armé (Figure V.12) [33].



Fig V.12 *Vue d'ensemble du pont [33].*

La structure du pont de Cherchell avec une configuration géométrique complexe est modélisée en éléments finis à l'aide du logiciel ANSYS 11.

V.3.3 Introduction des données dans l'ANSYS

➤ Propriétés géométrique du pont

Les caractéristiques géométriques du pont sont :

- Longueur totale 70,00m ;
- Longueur de la travée d'accès 15,00m ; la travée intermédiaire 40,00m ;
- Longueur de la chaussée 7,00m ;
- Longueur des trottoirs 1,00m ;
- Hauteur de la pile 10,00m ;
- Largeur du tablier 0.2 m.

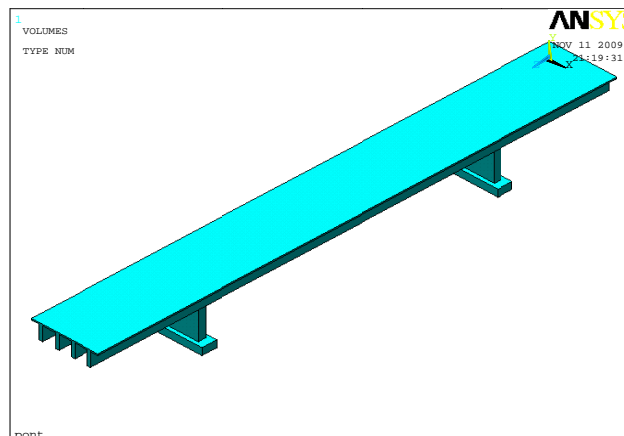


Fig V.13 *Propriétés géométrique du pont*

➤ **Maillage du modèle**

L'ouvrage est discrétisé automatiquement, car la complexité de la géométrie du pont comme, la figure V.14 illustre le maillage automatique du modèle. Le modèle comprend 7076 éléments.

Les piles sont supposées être encastrées au niveau du sol, faisant abstraction de toute interaction avec le sol et du fluide avec les piles.

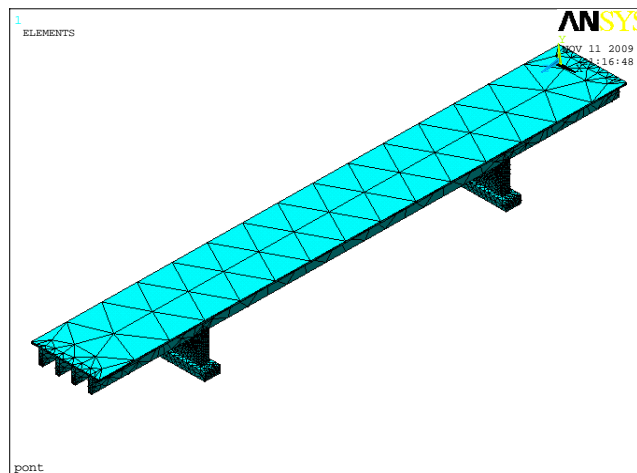


Fig V.14 *Maillage du modèle*

➤ **Condition aux limites**

Les conditions aux limites sont présentées dans la figure V.15, où on remarque que le pont est encastré aux niveaux du culée, et au niveau des appuis.

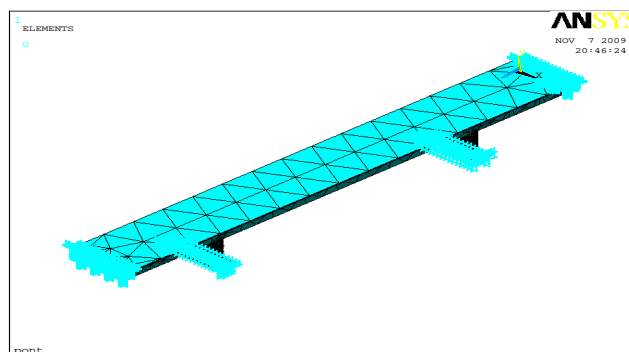
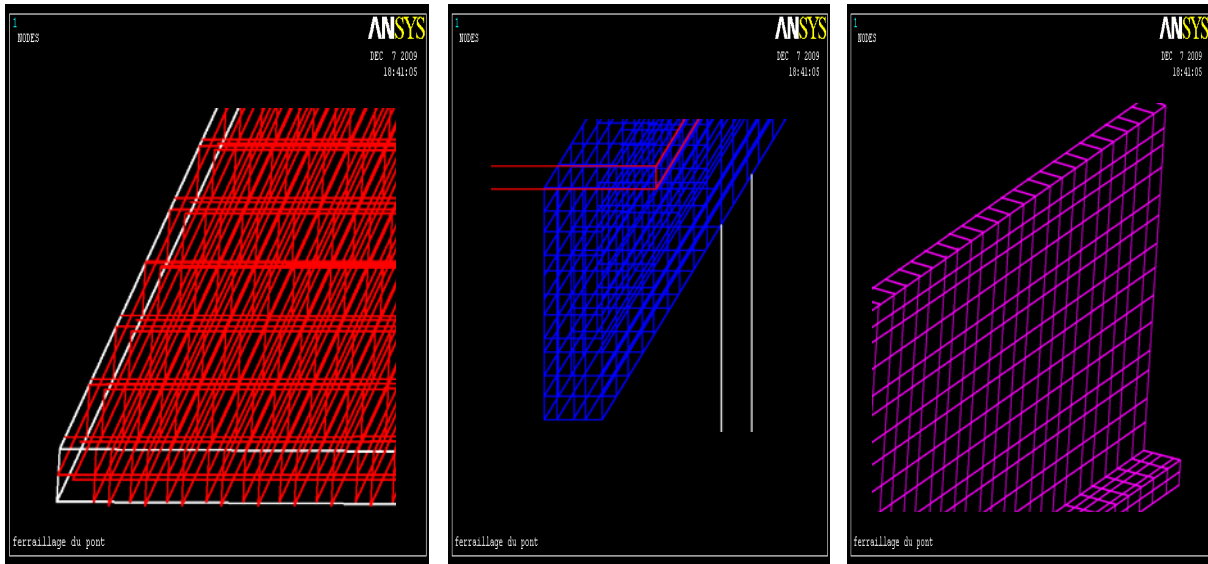


Fig V.15 *Condition aux limites*

➤ **Le ferrailage**

Le ferrailage du pont dans le modèle d'élément fini adopté par ANSYS, est représenté par l'élément Link 8. La figure V.16 représente le ferrailage modélisé par le logiciel ANSYS.



Tablier

poutre de pont

pile du pont

Fig V.16 Mode de renforcement des poutres de pont

➤ **Mode de renforcement**

La figure V.17 illustre le mode adopté pour le renforcement des poutres du pont.

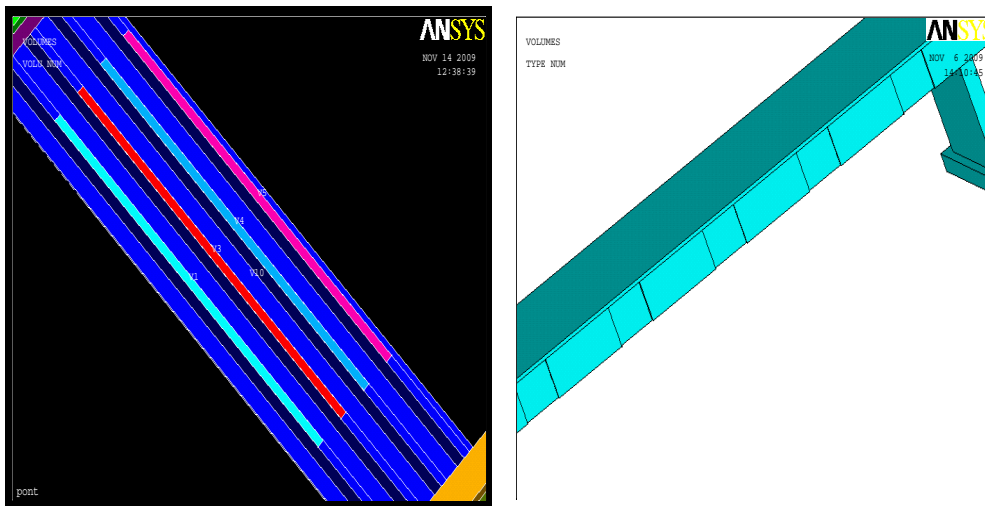


Fig V.17 Mode de renforcement des poutres de pont

V.4 Résultats obtenus et discussion

L'analyse dynamique du modèle calibrée a conduit à l'obtention des paramètres modaux du pont, les fréquences modales de l'analyse par MEF sont données dans le tableau V.3 avec les formes des modes correspondantes illustrées dans les figures V18 à V.23.

Un total de 6 modes de vibration du pont *d'Oued Oumazer ChercHELL* a été identifié à partir de la modélisation par MEF (ANSYS 11). Le premier mode est un mode horizontal avec une fréquence de 3.68 Hz avant le renforcement et de 4.06 après le renforcement. Le deuxième mode vertical s'est avéré se produire à la fréquence de 5.06 Hz avant le renforcement et de 5.47 après le renforcement. Le troisième mode est un mode *torsion* une fréquence de 6.00 Hz avant le renforcement et de 6.48 après le renforcement.

On remarque que les fréquences du pont renforcé par matériaux composite à base de fibres de carbone sont augmentées par rapport au modèle du pont non renforcé, et par conséquent la période est réduite.

Tableau V.3 *Fréquences modales du pont avant et après renforcement*

Mode	Fréquence Avant renforcement (Hz)	Fréquence Après renforcement (Hz)	Différence %	Classification du mode
1	3.68	4.06	7.9	translation longitudinal
2	5.06	5.47	8.10	fléchissement vertical
3	6.00	6.48	8.00	Torsion simple
4	7.96	8.59	7.94	2 ^{ème} fléchissement vertical Z
5	11.12	11.97	7.64	double Torsion
6	11.33	12.23	7.94	translation latérale

L'histogramme ci-dessous représente la différence dynamique en termes de fréquence entre les deux ponts, renforcé et non renforcé. On remarque une nette augmentation de la fréquence pour les six modes de vibration du pont renforcé par rapport au pont non renforcé.

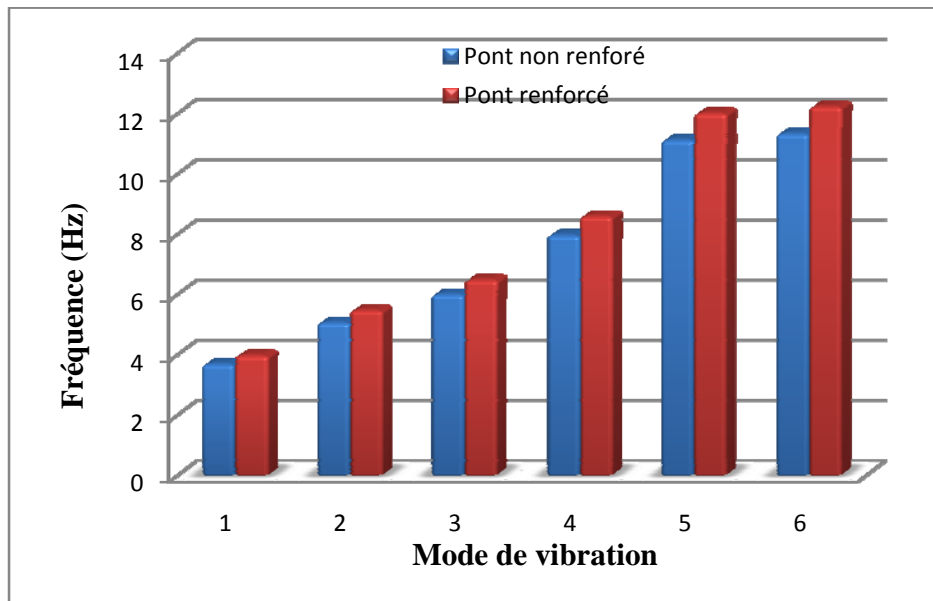


Fig V.18 *Histogramme des fréquences de poutres*

D'après les résultats obtenus, les matériaux composites à base de fibres de carbone influent par excès sur les fréquences propres des modes prépondérantes du pont en béton armé renforcé avec des pourcentages allant jusqu'à 8.1 %. Les figures V.19 à V.24 représentent les formes des modes correspondantes.

CHAPITRE V: Modélisation du Comportement Dynamique d'un Pont en B.A Avant et Après Renforcement

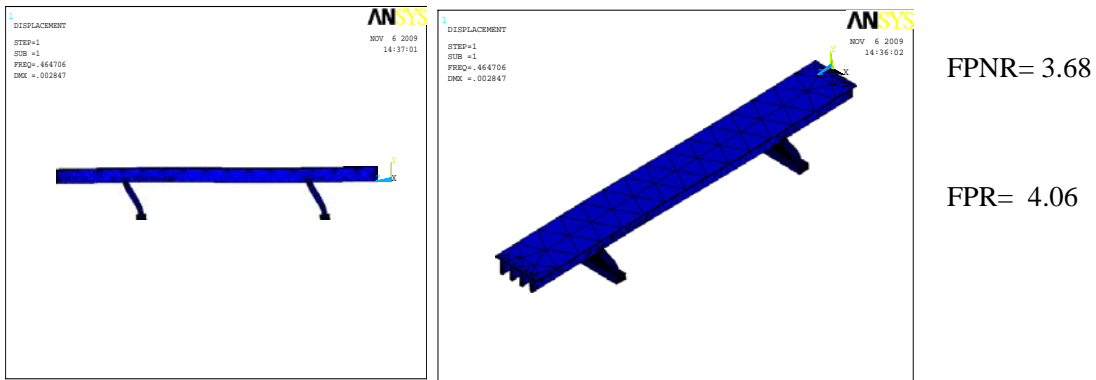


Fig V.18 forme du premier mode (translation longitudinal)

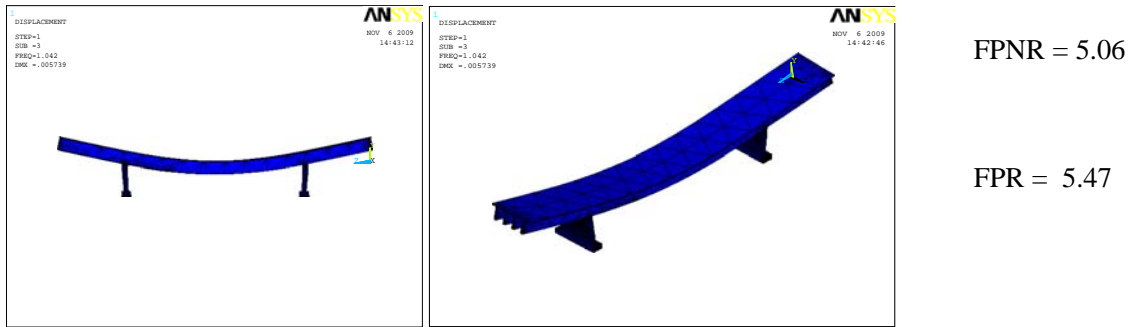
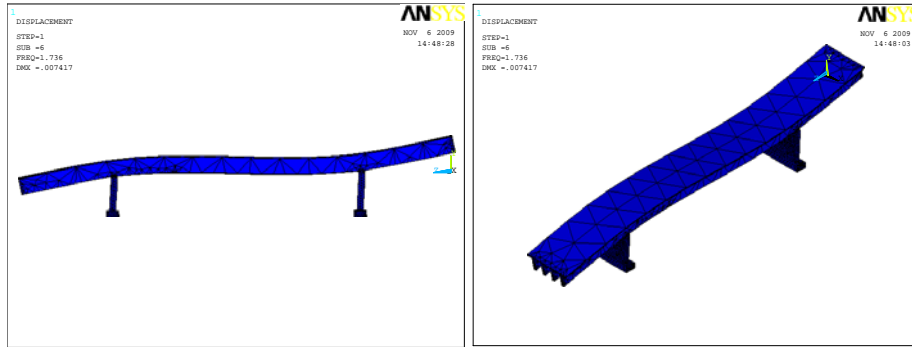


Fig V.19 forme du deuxième mode (fléchissement vertical)



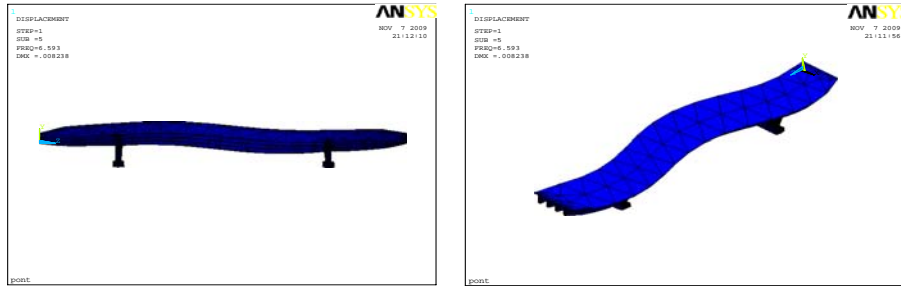
CHAPITRE V: Modélisation du Comportement Dynamique d'un Pont en B.A Avant et Après Renforcement



FPNR= 7.96

FPR= 8.59

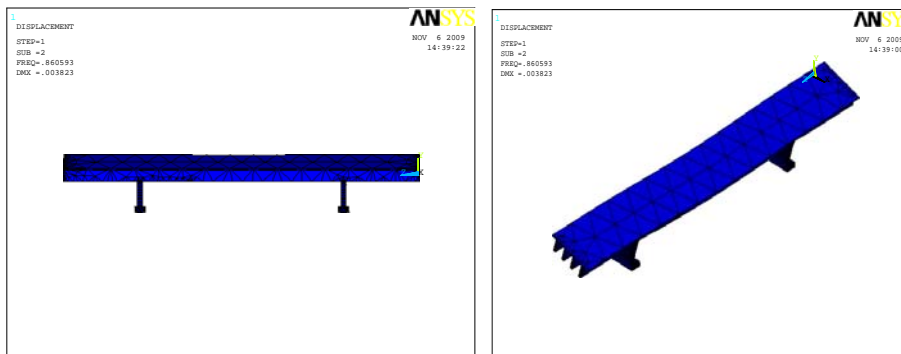
Fig V.21 forme du quatrième mode (2^{ème} fléchissement vertical Z)



FPNR= 11.12

FPR= 11.97

Fig V.22 forme du cinquième mode (double Torsion)



FPNR= 11.33

FPR= 12.23

Fig V.23 forme du premier mode (translation latérale)

5. Comparaison entre les fréquences adoptées pour les deux ponts

V.5.2 Comparaison avec d'autre recherche

Un travail fait par M.Abdessemmed a été réalisé numériquement par logiciel SAP2000 concernant le même pont (*Oued Oumazer Cherchell*). Le tableau V.5 montre les résultats de l'étude comparative entre les deux logiciels ANSYS et SAP 2000.

Tableau V.4 *Comparaison entre les résultats obtenus par ANSYS et SAP2000*

Mode	Fréquence avant renforcement		Fréquence après renforcement	
	ANSYS 11	SAP 2000	ANSYS 11	SAP 2000
1	3.68	2.85	4.06	4.00
2	5.06	3.16	5.47	4.16
3	6.00	3.89	6.48	4.54
4	7.96	8.23	8.59	10.11
5	11.12	13.02	11.97	13.37
6	11.33	13.22	12.23	16.66

Dans l'analyse SAP2000, des éléments en treillis avec les propriétés des matériaux isotropes, élastique linéaire sont utilisés pour représenter le béton et les CFPR stratifiés, ne sont pas réalistes, et réduisent considérablement la rigidité structurelle globale par rapport aux éléments SOLIDE 65 et SOLID46 avec les propriétés des matériaux orthotropes utilisés pour modéliser le béton et le CFPR stratifiés en ANSYS.

V.5.3 Confrontement Numérique/Expérimentale

Concernant les valeurs des fréquences propres trouvées expérimentalement, avant et après renforcement, le tableau V.3 illustre les résultats trouvés pour les six premiers modes propres de l'ouvrage.

Tableau V.5 *Comparaison entre les résultats ANSYS / Expérimentation*

Mode	Fréquence avant renforcement		Fréquence après renforcement	
	ANSYS 11	Expérimentale	ANSYS 11	Expérimentale
1	3.68	3.94	4.06	4.05
2	5.06	4.55	5.47	4.67
3	6.00	4.89	6.48	5.00
4	7.96	5.03	8.59	5.07
5	11.12	6.72	11.97	6.93
6	11.33	7.36	12.23	7.36

Avant le renforcement du pont par matériaux composites, les fréquences montrent une bonne concordance dans l'analyse par éléments finis avec l'épreuve expérimentale dont la fréquence du premier mode pour le modèle ANSYS est de l'ordre 3.68 Hz, pendant que la fréquence de l'épreuve expérimentale est 3.94 Hz, avec une différence de l'ordre 38%. Le deuxième mode présente une différence juste de 1.25% qui acceptable.

Après le renforcement, l'accord devient excellent avec des valeurs de l'ordre 4.00 Hz pour le premier mode du modèle et 4.05 Hz pour l'expérimental, soit une dispersion de 1.25%. La même remarque peut être généralisée pour les autres modes Ce qui montre que notre modèle choisi est largement satisfaisant.

Les valeurs calculées numériquement à l'aide du modèle ANSYS 11 en éléments finis sont relativement comparables à celles mesurées expérimentalement pour les trois premiers modes. Cependant, le modèle en élément finis s'avère trop rigide. Ainsi, il y a lieu de modifier le schéma statique du pont pour obtenir une fréquence numérique aussi proche que possible de celle obtenue expérimentalement.

V.6 Conclusion

Suite aux résultats obtenus de la modélisation des deux ponts, l'un renforcé par matériaux composites à base de fibres de carbone et l'autre non renforcé, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Les matériaux composites contribuent à la stabilité dynamique des ouvrages par leur grand module d'élasticité.
- Les fréquences obtenues par en éléments finis, *modèle ANSYS 11*, sont relativement comparables à celles mesurées expérimentalement.
- Comme l'analyse du modèle de pont par les logiciels SAP 2000 et ANSYS est respectivement linéaire et non linéaire, L'ANSYS présente une meilleure performance par rapport au SAP 2000 respectivement.
- Les matériaux composites absorbent bien les chocs et les vibrations dont elles sont soumises qui soumise les ponts comme les séismes, et d'autres vibrations.

CONCLUSIONS GENERALES

ET

RECOMMANDATIONS

CONCLUSIONS GENERALES ET RECOMMANDATIONS

1. Introduction

Les matériaux composites appartiennent sans doute à l'une des classes de matériaux les plus étudiées de nos jours. Afin de modéliser le comportement de structures mécaniques réalisées avec ce type de matériaux, il est nécessaire de connaître leurs propriétés constitutives. Les matériaux composites se caractérisent par leur souplesse et leur simplicité de mise en œuvre.

Les travaux de simulation numérique réalisés sur les ouvrages en béton armé restent à ce jour limités à la modélisation géométrique d'une part et d'autre part, au maillage de la structure. Il est de fait difficile de prendre en compte du comportement anisotrope des matériaux et l'adhérence entre les éléments constituants.

2. Conclusions générales

Le travail accompli dans ce mémoire, nous a permis de calibrer le modèle numérique avec le choix des caractéristiques adéquates des poutres et du composite par le biais du logiciel ANSYS, avec un comportement non linéaire des différents matériaux supports (béton, et acier). Les résultats de la modélisation numérique obtenus par le logiciel **ANSYS** ont été validés par les résultats d'essais expérimentaux.

Les cas pratiques des poutres choisis nous ont permis de constater que ces composites augmentent la rigidité de ces poutres ainsi que les fréquences de leurs vibrations. Ceci confirme que les matériaux composites absorbent les vibrations et diminuent les périodes de vibration de ces dernières.

Les poutres et le pont modélisés en éléments finis sont plus rigides que ceux à partir des résultats expérimentaux. Les effets de l'adhérence entre le béton et l'acier d'armature et les microfissures se produisant dans les poutres ont été exclus dans les modèles éléments finis, ce qui contribue à la rigidité plus élevée des modèles éléments finis.

Les matériaux composites de part leur grand module d'élasticité, contribuent à la stabilité dynamique et l'absorption des chocs subis par le pont.

D'après les résultats obtenus par la modélisation statique et dynamique des poutres et les fréquences calculées pour les modes de vibration du pont étudié, on peut conclure que le logiciel ANSYS 11 peut résoudre des problèmes non linéaires d'une interface graphique qui facilite la tâche à l'utilisateur.

3. Recommandations

Nous recommandons, pour les futurs travaux :

- de prendre d'autres cas d'études de poutres (en béton armé, béton précontraint, mixte, ou en acier) afin de confirmer nos conclusions.
- Il est aussi souhaitable de prévoir des tests statiques et dynamiques sur des poutres avec la prise en compte des différents modes de collage des fibres de carbone.
- Elaborer des projets de recherche qui prennent en charge simultanément la modélisation numérique et l'expérimentation des éléments structuraux (poutres, poteaux, dalles, etc...), dans le souci de prédire leur comportement.

Références Bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **C.Diagana, A.Li, L.Bouazaoui ET Y.Delmas**, « *Renforcement des poutres en béton armé par collage de bandes de TFC* », XXI^{EMES} Rencontres Universitaires de Génie Civil, GMMS, Université de Reims Champagne Ardenne, 2003.
- [2] **J.MARC** «*Les matériaux composites Dynamisme et innovation*», Ministère de l'Economie, des Finances et l'Industrie, France février 2002.
- [3] **C.DjelaL, Emmanuelle David, François Buyle-Bodin, Yvon Gicquel**, « *Renforcement des poutres en béton armé à l'aide de lamelles composites : étude expérimentale-prédimensionnement* », Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, février 1998.
- [4] **A.Swasge**, « *Glossaire des matériaux composites*» Centre d'Animation Régionale en Matériaux Avancés, Octobre 2006.
- [5] **J. Luycky** "*Composites à fibre de carbone dans le génie civil*", Technique de l'ingénieur, Vol C5, 2000.
- [6] **Menana, M. Feliachi et G. Berthiau** «*Modélisation des courants de foucault dans un matériau composite en vue de la caractérisation de défauts*», Institut de Recherche en Electrotechnique et Electronique de Nantes Atlantique IREENA-IUT CRTT, 2006.
- [7] **I. Kachlakev , Thomas H. Miller , and Solomon C.S. Yim** «*Identification par recalage modal et fréquentiel des propriétés constitutives de coques en matériaux composites*», Oregon State University 2, California Polytechnic State University, Department of Civil, Construction and Environmental,2008.
- [8] **J .Luyckx**, « *fibre de carbone* », CNAM (Conservatoire National des Arts et Métiers) 2007.
- [9] **Nguyen Tien Duong**, «*Modélisation du délaminage des composites sous chargement complexe par éléments méfis*» Maître en Sciences appliquées de l'Université de Liège Ingénieur civil Génie mécanique de l'Institut Polytechnique de Hanoi, Vietnam, 2005.
- [10] **Solomon C.S. Yim** «*Renforcement des poutres en béton armé par des matériaux composites utilisant la technique NSM*», Université Ferhat Abbas, Sétif, Novembre 2008.
- [11] **A.Laichaoui**, « *Analyse expérimental du comportement des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites* », Mémoire de Magister, ENP, Alger, 2006.
- [12] **R.Harry**, « *Les matériaux composites*», Laboratoire de Génie Mécanique, Toulouse : France (2009)"
- [13] **R.Suter** "*Renforcements parasismiques au moyen de matériaux composites*" Ecole d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg, 2007.
- [14] **B.Fargeot, C.Tourneur** " *Le traitement des fissures, maintenance et réparation des ponts*", presses des ponts et chaussée, 1997.
- [15] **A.AIDOU, A.BENOUIS**, "*Pathologie des Constructions : Du Diagnostic à la Réparation, Influence du taux de chargement pour les poutres réparées en flexion*". Colloque National Pathologie des Constructions, Département de Génie Civil Université Mentouri Constantine - 25 et 26 Novembre 2008.

- [16] **F.Conus et R.Suter** *"Modélisation par élément finis des poutres en béton armé renforcées par tissus d'aramide"*, Ecole d'ingénieurs et d'architectes de Fribour, Suisse, May 2000.
- [17] **A. Merdas et N.Chikh** *"Renforcement des poutres en béton armé par des matériaux composites utilisant la technique NSM"*, Université Ferhat Abbas, Sétif, Novembre 2008.
- [18] **F. Al Mahmoud** *"technologie de renforcement des poutres en béton armé par l'insertion de joncs de carbone"*, l'Institut National des Sciences Appliquées de TOULOUSE, 2007.
- [19] **Amer M. Ibrahim** *"Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Laminates"* Asst. prof, College of engineeringDiyala University, Iraq 2009.
- [20] **W.Hoorpah et M.Vigo** *"Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion"* Groupe de travail AFGC Documents scientifiques et techniques, Novembre 2003
- [21] **D Kachlakev** *"Finite element analysis of Historic Bridge Strengthened with FRP Laminate"*, California Polytechnic State University, USA, 2000.
- [22] **C Bakis, E.Uppuluri, V.Nanni & T.Boothby**, *"Analysis of bonding mechanisms of smooth and lugged FRP rods embedded in concrete"*, J. Composites Sciences and Technology1998
- [23] **J Robert** *"Caractéristiques et utilisation des fibres céramiques réfractaires et des fibres de verre à usage spécial"* Agence Française de Sécurité sanitaire de l'environnement et de travail, Avril 2007
- [24] **J.Michel, Bergerat,B.Gauthier et B. Lazorthes**, *"Innovative Composite materials"* Manuscrit auteur, publié dans "JNC 16, Toulouse : France, 2009.
- [25] **S.Yamina** *"Modélisation Numérique Du comportement d'un tablier de pont a Poutres multiples sous chaussée en béton armé renforcé par Matériaux Composites"*. Mémoire de Magister, Blida, 2008.
- [26] **D.t Nguyen, Aliman, J.M Reynouard, G.Michel, D.Dauffer** *" caractérisation et qualification du renforcement en TFC de dalles en béton armé endommagées"* URGC-structure, INSA de Lyon,
- [27] **M.Abdessamad** *« Comportement des poutres isostatiques en béton armé renforcées par tissu et lamelle de fibre de carbone »*, Mémoire de magister, Université de BLIDA, 2003.
- [28] **W.Hoorpah et M.Vigo** *"Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages"* Groupe de travail AFGC, Documents scientifiques et techniques mars 2004.
- [29] **S. Haouara, A. Guettala** *"les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages en béton arme dans la région de biskra"* Courrier du Savoir – N°06, Juin 2005, pp.109-116 Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, 2005
- [30] **F.Paradisa, V.Lapointea, S.Fellaha, M.Jolina ET J.Marchanda** *"Avancement des travaux sur l'étude de la corrosion des armatures à l'université laval"* Septième édition des

Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton, Université Laval 19-20 juin 2006.

[31] **Gwenola Rolland** "*les pathologies des pathologies du béton*" Université de Reims Champagne Ardenne, 2004.

[32] **J.Robbert** "*Identification des modèles structuraux en dynamique non linéaire*" thèse de doctorat, Toulouse 2005.

[33] **M. Abdessemed, S. Kenai, A. Bali, A. Kibboua, B.Guillier, J.L.Chatelain** "*Suivi et comportement des poutres de ponts en béton renforcées par composites collés*" 1^{er} Colloque National AFPS 2007 – Ecole Centrale Paris

[34] **Zuber et Marchand** "*Étude des mécanismes fondamentaux qui gouvernent le comportement des matériaux cimentaires exposés à des environnements chimiquement agressifs*" juin 2004.

[35] **Layal Addelson**, "*Les défauts de la construction, prévention, diagnostic et remède de principales pathologies de la construction*", Bruxelles, 1993.

[36] **A. Kheyroddin et H. Naderpour**, "*Nonlinear finite element analysis of composite RC shear walls*" Shiraz University Dept. of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, I. R. of Iran, Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering, Vol. 32, No. B2, pp 79-89 Printed in The Islamic Republic of Iran, 2008

[37] **K.Modulef** "*La méthode des éléments finis*" ODE-2007 : Conference de la SMAI sur l'Optimisation et la Decision institut Henri Poincaré, Paris 8-20 avril 2007

[38] **R.W.Clough et J.Penzien** "*Dynamique des structures, tome 1 principes fondamentaux*" université de California, Edition Pluralis, 1980.