



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



RÉPUBLIQUE ALGÉRIE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة البليدة 1

UNIVERSITÉ DE BLIDA 1

كلية الهندسة- دائرة الهندسة المدنية

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME MASTER 2
EN GÉNIE CIVIL

Option : Génie civil géotechnique

Thème :

**Application des composites sur les ponts
Comportement dynamique et sismique**

Élaboré par :

HADJ BOURERGA Nesrine

Supervisé par :

Dr. M.ABDESSEMED

PROMOTION : 2020/2021

Remerciements

*On remercie le Bon Dieu, Tout puissant de m'avoir donné la santé
et le courage d'achever ce mémoire.*

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu
avoir le jour sans l'aide et l'encadrement du **Dr Mouloud ABDESSEMED**.
Je le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel,
pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité
durant la réparation de ce mémoire.*

*Je voudrais également remercier et exprimer mon profond respect à tous les membres
du jury qui ont accepté d'examiner mon mémoire et ont bien voulu me faire l'honneur d'assister
à ma soutenance de mémoire de master afin de juger la qualité de ce travail et de formuler leurs
remarques constructives.*

*Nos remerciements s'adressent à Mr le Directeur de la DTP de Blida et l'ensemble des
cadres et de personnel de la direction, ainsi que Mr Sebah et Mr Bouakakaz,
responsables de l'Entreprise SAPTA pour leurs aides pour le cas pratique.*

*J'exprime ma gratitude à tous les enseignants du Département de Génie Civil,
pour leurs générosités et leurs disponibilités
durant tout le cursus universitaire.*

*Mes vifs remerciements à tous et à toutes qui se sont mis
à ma disposition durant toute la période
de préparation de mon mémoire.*

A vous tous, du fond du cœur : Merci

Dédicace

Grace à Bon Dieu :

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrasés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A l'homme que le destin m'a pris, mais il a toujours été près de mon cœur, que Dieu lui fasse miséricorde, et a fait de sa demeure le paradis, mon père Mohammed

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon adorable mère Aïcha.

A mon frère Samir, qui m'a accompagné tout au long de mon enfance avec protection et conseils, je demande à Dieu de lui donner guérison, santé et bien-être.

Au Person, mon précieux offre du dieu mon fiancé Lamine et mes sœurs Imane, Rania et Feriel qui n'ont pas cessés de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Allah les protège et leurs offre la chance et le bonheur.

A toutes les bonnes personnes et les amis que j'ai connus jusqu'à maintenant.

تلخيص

بشكل عام، يجب تعزيز الجسور لأسباب مختلفة، لا سيما لاستيعاب قدرة التحمل المنخفضة، وحماية العناصر الهيكلية التي تتكون منها، وتلبية احتياجات الحجم المتزايد لحركة المرور. بالإضافة إلى التعامل مع الاعتداءات المختلفة كالمناخ والصدمات والكوارث الطبيعية وتلك التي يسببها الإنسان. يمكن أن تلعب طرق التعزيز التقليدية دوراً معيناً في صيانة الهياكل وحمايتها، لكنها أظهرت حدودها، لا سيما من خلال التأثير على مظهر الجسر، وتلويث البيئة، وإتلاف الهيكل الأصلي للجسر بسهولة وزيادة الحمل على هيكل الجسر. يتكون عمل أطروحتنا الرئيسية من تطبيق طريقة التعزيز بالبوليمرات المدعمة بألياف الكربون (CFRP) المصققة على سطح الهيكل الخرساني لجسر خرساني قديم. تحليل شكلي يعتمد على طريقة العناصر المحدودة (FEM) في تطبيق برنامج /Ansys21 إصدار APDL. الهدف هو رؤية السلوك الديناميكي لهذا الهيكل، قبل التعزيز وبعده، وبالتالي التنبؤ بسلوكه بمرور الوقت. يتم حساب الأنماط والفترات المحددة للهيكل ومقارنتها بتلك الخاصة برنين الجسر المعني.

الكلمات المفتاحية: جسور، خرسانة، مركبة، سلوك، CFRP، ديناميكيات، تقوية، تحليل.

RÉSUMÉ

D'une manière générale, les ponts doivent être renforcés pour diverses raisons, notamment pour reprendre la portance réduite, sauvegarder les éléments structuraux dont ils composent, et répondre aux besoins de l'augmentation du volume de trafic. En plus de faire face aux diverses agressions, comme le climat, les chocs, les catastrophes naturelles et celles causées par l'homme. Les méthodes de renforcement traditionnelles peuvent jouer un certain rôle dans l'entretien et la sauvegarde des structures, mais elles ont montré leurs limites, notamment en affectant l'apparence du pont, en polluant l'environnement, en endommageant facilement la structure d'origine du pont et en augmentant la charge sur la structure du pont. Notre travail de mémoire de master, consiste à appliquer la méthode de renforcement par polymères renforcés de fibres de carbone (CFRP) collées à la surface de la structure en béton d'un pont ancien en béton armé. Une analyse modale basée sur la méthode des éléments finis (MEF) en application du logiciel ANSYS APDL version 21R. L'objectif est de voir de comportement dynamique de cet ouvrage, avant et après renforcement et ainsi prédire son comportement dans le temps. Les modes et périodes propres de l'ouvrage sont calculés et comparés à celles de résonance du pont en question.

Mots clés : Ponts, béton, composite, comportement, CFRP, dynamique, renforcement, analyse.

ABSTRACT

In general, bridges must be reinforced for various reasons, in particular to take up the reduced bearing capacity, to safeguard the structural elements of which they compose, and to meet the needs of the increased volume of traffic. In addition to dealing with various aggressions, such as climate, shocks, natural disasters and those caused by man. Traditional reinforcement methods can play a certain role in the maintenance and safeguarding of structures, but they have shown their limits, in particular by affecting the appearance of the bridge, polluting the environment, easily damaging the original structure of the bridge and increasing the load on the bridge structure. Our master thesis work consists of applying the method of reinforcement by carbon fiber reinforced polymers (CFRP) glued to the surface of the concrete structure of an old reinforced concrete bridge. A modal analysis based on the finite element method (FEM) in application of the ANSYS software / APDL version 21 R. The objective is to see the dynamic behavior of this structure, before and after reinforcement and thus predict its behavior over time. The specific modes and periods of the structure are calculated and compared to those of the resonance of the bridge in question.

Keywords: Bridges, concrete, composite, behavior, CFRP, dynamic, reinforcement, analysis.

SOMMAIRE

RÉSUMÉ

ABSTRACT

RESUME EN ARABE

LISTE DES FIGURES _____ I

LISTE DES TABLEAUX _____ II

LISTE DES ABREVIATIONS _____ III

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE _____ 1

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE _____ 3

I.1. Les ponts dans l'économie : _____ 3

I.2. Patrimoine des ouvrages d'art en Algérie : _____ 4

I.3. Pathologies des ponts en béton arme : _____ 5

I.3.1. Introduction : _____ 5

I.3.2. Pathologies des ponts en béton armé : _____ 6

I.3.2.1. Conséquences sur la résistance à la flexion : _____ 7

I.3.2.2. Conséquences sur la résistance à l'effort tranchant : _____ 8

I.3.2.3. Pathologies résultant d'une insuffisance du modèle d'étude : _____ 10

I.3.3. Pathologies des ponts en béton précontraint : _____ 10

I.3.3.1. Corrosion des armatures de précontrainte : _____ 10

I.3.4. Les défauts de réalisation : _____ 12

I.3.5. Pathologies affectant les équipements des ponts : _____ 12

I.3.5.1. Désordres affectant les appareils d'appui : _____ 14

I.3.5.2. Désordres affectant les joints de chaussée : _____ 15

I.3.5.3. Désordres affectant l'étanchéité : _____ 16

I.3.6. Pathologies affectant les fondations de ponts : _____ 16

I.3.6.1. Causes des pathologies : _____ 16

I.3.6.2. Affouillement des fondations : _____ 17

I.3.6.3. Conséquences de l'affouillement des fondations : _____ 18

I.4. Réparation et renforcement des ponts : _____ 21

I.4.1. Introduction : _____ 21

I.4.2. Réparation et renforcement des ponts en béton armé : _____ 21

I.4.2.1. Techniques de réparation : _____ 21

I.4.3. Techniques de renforcement : _____ 26

I.4.3.1. Techniques de renforcement local :	27
I.4.3.2. Techniques de renforcement général :	28
I.4.4. Techniques de renforcement des ponts en béton précontraint :	28
I.4.4.1. Renforcement par précontrainte additionnelle :	29
I.4.4.2. Renforcement par remplacement de la précontrainte existante :	31
I.4.4.3. Renforcement par dénivellation d'appuis :	33

CHAPITRE II : MATERIAUX COMPOSITE ET LEURS APPLICATION

CHAPITRE II : MATERIAUX COMPOSITE ET LEURS APPLICATIONS.	30
II.1. Définition et historique	30
II.1.1. Définition :	30
II.1.2. Composition :	30
II.1.2.1. Renforts :	30
II.1.2.2. Matrices :	32
II.1.2.3. Mise en forme :	33
II.1.2.4. Principaux composites :	35
II.1.3. Impact des composites sur l'industrie et l'emploi :	35
II.2. Techniques de renforcement par matériaux composites	36
II.2.1. Généralités :	36
II.2.2. II.2.2 Avantages d'utilisation des composites	38
II.3. Application des matériaux composites en génie civil :	39
II.3.1. Préambule :	39
II.3.1.1. Expérience Japonaise :	39
II.3.1.2. Applications au Canada	39
II.3.1.3. En Australie :	40
II.3.1.4. Propagation en Europe :	41
II.3.1.5. Premières application en Afrique :	42

CHAPITRE III : METHODE DES ELEMENTS FINIS ET CHOIX DU LOGICIEL

CHAPITRE III : METHODE DES ELEMENTS FINIS ET CHOIX DU LOGICIEL	48
III.1. Méthodes des éléments finis :	48
III.1.1. Préambule :	48
III.1.2. Principes de la méthode des éléments finis :	48
III.1.3. Etapes du calcul de la MEF :	49
III.1.3.1. Étapes logiques du calcul par éléments finis :	49
III.1.3.2. Etapes d'un programme d'éléments finis :	51
III.2. Logiciel de calcul :	51
III.2.1. Choix du logiciel ANSYS :	51

III.2.2. Principaux produits ANSYS :	51
III.2.2.1. ANSYS Structural :	51
III.2.2.2. ANSYS Mechanical :	52
III.2.2.3. ANSYS CFX et Fluent :	52
III.2.2.4. Gambit :	52
III.2.2.5. ANSYS Autodyn et Ansys Dyna :	53
III.2.2.6. ANSYS Electromagnetics et Ansoft :	53
III.2.2.7. ANSYS Multiphysics :	53
III.3. Environnements logiciels :	53
III.3.1. ANSYS Classic :	53
III.3.2. ANSYS Workbench :	53
III.4. Logiciel ANSYS :	54
III.4.1. Analyse structurelle :	54
III.4.1.1. Capacités avancées :	54
III.4.1.2. Solution d'analyse structurelle complète :	55
III.4.2. ANSYS 2021 R1 :	55
III.4.3. ANSYS Mechanical APDL :	56
III.4.4. Analyse MEF par ANSYS Mechanical APDL :	56

CHAPITRE IV : ANALYSE NUMERIQUE ET CAS D'ETUDE

CHAPITRE IV : ANALYSE NUMERIQUE ET CAS D'ETUDE	58
IV.1. Principe de l'analyse numérique :	58
IV.1.1. Objectif du travail :	58
IV.1.2. Principe de modélisation :	58
IV.2. Cas d'étude du pont cadre :	59
IV.2.1. Description :	59
IV.2.2. Etapes de la modélisation :	59
IV.2.2.1. Introduction des données et modèle :	60
IV.2.2.2. Choix des propriétés mécaniques des matériaux :	60
IV.2.2.3. Discrétisation et lancement du calcul :	62
IV.3. Modélisation par analyse modale :	63
IV.3.1. Géométrie des éléments de l'ouvrage :	63
IV.3.2. Description de la modélisation :	64
IV.3.2.1. Propriétés des matériaux :	64
IV.3.2.2. Maillage :	66
IV.3.2.3. Conditions aux limites :	67
IV.3.2.4. Pose de la lamelle Sika CarboDur :	68

CHAPITRE V : RESULTATS DE DISCUSSIONS

CHAPITRE V : RESULTATS DE DISCUSSIONS	69
V.1. Préambule :	69
V.2. Modélisation de pont sans renforcement :	69
V.3. Modélisation de pont avec renforcement :	74
V.4. Comparaison et commentaires :	77

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion Générale	78
---------------------	----

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques	79
-----------------------------	----

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Répartition des ponts par zone sismique en Algérie _____	4
Figure 2 : Répartition des ponts selon leur état _____	5
Figure 3 : Section transversale type d'un pont courant en béton armé _____	6
Figure 4 : Fissures dues à une insuffisance de résistance à la flexion localisées au milieu de la poutre du tablier d'un pont. _____	7
Figure 5 : Zone d'apparition des fissures dues à l'insuffisance de résistance à l'effort tranchant. _____	8
Figure 6 : Fissures dues à l'insuffisance de résistance à la flexion dans les voussoirs de ponts _____	11
Figure 7 : Désordres engendrés par le manque d'entretien des équipements du pont de la Ferme(Chleff) : (a) dégradation avancée du trottoir au niveau du joint, (b) éclatement de béton et corrosion des armatures de la dalle et (c) traces de calcite sur l'intrados _____	14
Figure 8: Appareils d'appui très détériorés : (a) métallique et (b) en caoutchouc fretté. _____	14
Figure 9 : Joint de chaussée fortement endommagé : arrachement de plusieurs éléments du joint sous l'effet du trafic routier. _____	15
Figure 10 : Etanchéité et dalle en état très détérioré. _____	16
Figure 11 : Tassement de la pile médiane d'un pont due à l'affouillement local de sa fondation. [6] _____	18
Figure 12 : Affouillement général et affouillement local durant une crue. _____	18
Figure 13 : Réparation/renforcement par ajout de matière : (a) béton, (b et c) tissus à fibre de carbone et (d) tôle métallique.) _____	21
Figure 14 : Récalaminisation du béton par installation du treillis anode sur l'intrados du tablier d'un pont. _____	23
Figure 15 : Réparation d'armatures corrodées : (a) refouillement des armatures, (b) élimination de la corrosion, (c) passivation des armatures et (d) réfection des bétons _____	24
Figure 16 : Pont à poutre-caisson renforcé par précontrainte longitudinale et transversale suite à l'élargissement de la dalle de couverture. _____	29
Figure 17 : Renforcement dans le sens transversal du hourdis inférieur de deux ponts à caissons sur la Saône (France) par précontrainte additionnelle. _____	30
Figure 18 : Renforcement par précontrainte additionnelle longitudinale d'un pont à caissons sur le Rhône (France) _____	30
Figure 19 : Socle en béton servant d'ancrage de la précontrainte : (a) à l'intérieur et (b) à l'extérieur d'un caisson sur le Rhône (France). _____	30
Figure 20 : Étriers actifs placés : (a) dans un forage pratiqué à l'intérieur de l'âme et (b) à l'extérieur de l'âme. _____	31
Figure 21 : Précontrainte endommagés sous l'effet des chocs de véhicules (pont sur l'échangeur de la rampe des Fusillés-Alger) _____	32
Figure 22 : Précontrainte provisoire mise en place pendant les travaux de remplacement de la précontrainte existante. _____	32

Figure 23 : Relevage par vérins plats du tablier d'un pont (Pont PS 308 à Saint Laurent de Mure (France).	33
Figure 24 : Configuration d'un matériau composite	30
Figure 25 : Disposition des chaînes et trames dans un tissu CFRP.	37
Figure 26 : Lois de comportement des différents et fibre de carbone.	38
Figure 27 : Renforcement des piles de pont (Sakawa River-Japon). [11]	39
Figure 28 : Installation des premiers composites FRP "Australiens" sur un pont. [13]	41
Figure 29 : Pose de tissu en fibres de carbone sur les poutres du tablier [14]	44
Figure 30 : Vue des dégradations apparentes sur la pile [13].	45
Figure 31 : Applications des fibres de carbone CFRP sur les poutres du pont. [13]	45
Figure 32 : Pile du pont après sa réparation. [13]	46
Figure 33 : Eléments du dalot lors de sa pose	58
Figure 34 : Modèle choisi du pont cadre étudié	59
Figure 35 : Schéma du Solid 65 à 3D [15].	64
Figure 36 : Solid 185 à 3D [15]	65
Figure 37 : Maillage de modèle du pont	67
Figure 38 : Emplacement de la lamelle Sika Carbodur	68
Figure 39 : Ordre des valeurs des fréquences propres	69
Figure 40 : Valeurs de déplacement de l'ouvrage cadre	70
Figure 41 : Mode 1 de vibration propre	70
Figure 42 : 2ème mode de vibration du pont	71
Figure 43 : 3ème mode de vibration du pont	72
Figure 44 : Double fléchissement (mode 4)	73
Figure 45 : Mode 5- Déplacement latéral transversal de l'ouvrage	73
Figure 46 : Mode 6- Torsion de l'ouvrage	74
Figure 47 : Renforcement de la dalle du pont dalot	74
Figure 48 : 2ème mode de vibration (Déplacement longitudinal)	75
Figure 49 : Fléchissement simple (mode1)	75
Figure 50 : 4ème mode de vibration (Double fléchissement)	76
Figure 51 : Mode 5- Déplacement latéral transversal	76
Figure 52 : Mode 6- Mode de torsion	77

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Principales opérations d'entretien courant, spécialisé et de réparation des ponts en béton armé [7]	25
Tableau 2 : Type de renfortRenfort non orienté Renfort orienté	31
Tableau 3 : Organigramme d'étapes caractéristiques d'un programme d'éléments finis.	51
Tableau 4 : Propriétés du béton armé	65
Tableau 5 : Propriétés de CarboDur S1512	66
Tableau 6 : Propriétés de la résine Sikadur-30	66
Tableau 7 : Tableau comparatif des fréquences et modes de vibration des deux cas étudiés	78

LISTE DES ABRÉVIATIONS

CFRP	Carbon fibres reinforcement polymer
MEF	Méthode des éléments finis
TFC	Tissus e fibre de carbone
RGI	réactions de gonflement internes
CMC	Composite à matrice métallique
CMM	Composite à matrice métallique
E	Module de Yong (En Mpa)
V	Coeffocient de poisson
Ke	Rigidité élémentaire
Ue	Déplacement
Fe	La force
FRP	Fibres reinforcement polymer
MCA	Matériaux composites d'avent-garde
BET	Bureau d'études
BTP	Bâtiments et travaux publics
EDP	Une équation aux dérivées partielles
ENGOA	Entreprise nationale des grands ouvrages d'art
Ep	Module d'élasticité du composite (En Mpa)
ANSYS, Inc.	Est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique.
ANSYS APDL	APDL (ANSYS Parametric Design Language)
K	Rigidité
□	Densité
T	Période (s)
ω	Fréquence (Hz)
Ec	Module Yong concrete (Béton) (Mpa).



INTRODUCTION GENERALE



INTRODUCTION GENERALE

Les ouvrages d'art sont des infrastructures de base en élévation et sont nécessaires pour le développement économique, vu le rôle qu'ils jouent dans le transport des usagers et les marchandises. Vu que les ponts, qui sont des ouvrages par excellence, sont dans la quasi-totalité construits en matière de béton, qui est largement utilisé depuis plus d'un siècle, il s'est avéré qu'il peut se dégrader sous l'influence de causes liées à sa qualité originelle ou à des sollicitations d'exploitation ou d'environnement. Entraînent des dommages structuraux de gravité variable qui nécessitent souvent des travaux de réparation et/ou de réhabilitation.

La maintenance des ouvrages de génie civil consiste à les protéger en assurant une meilleure étanchéité ou en limitant la corrosion, à les réparer en cherchant à compenser les pertes de rigidité ou de résistance dues à la fissuration, à les renforcer en améliorant les performances et la durabilité des ouvrages [1]. C'est un problème de plus en plus préoccupant dans la mesure où le coût des ouvrages neufs est de plus en plus élevé et les conditions de réparation de plus en plus difficiles. Parmi les techniques disponibles, l'une des plus efficaces pour les désordres structurels est la réparation de structures en béton armé dégradées par placage extérieur en acier. Toutefois, un inconvénient majeur lié à la difficulté de manipulation des plaques en acier compte tenu de leur poids, ainsi que les problèmes de corrosion limite l'utilisation de cette méthode.

Depuis une vingtaine d'années, une alternative est proposée : il s'agit de renforcer ou de réparer les ouvrages en béton par des matériaux composites à matrice organique collés extérieurement sur des structures dégradées. Les matériaux composites, en particulier à base de fibres de carbone, de par leur rigidité spécifique, présentent un grand intérêt pour la réparation. De plus, malgré leur prix élevé, ils présentent un avantage économique car ils peuvent être mis en œuvre directement sur les structures par moulage au contact, procédé appelé aussi polymérisation in-situ ou stratification directe. Ceci permet de réduire considérablement les coûts liés à la manipulation des matériaux ainsi que les problèmes liés aux interruptions des activités des ouvrages réparés [2].

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

On s'intéresse dans ce travail à la modélisation d'un pont cadre en béton armé renforcé par composites à base de fibres de carbone. Afin de déterminer le comportement dynamique de cet ouvrage, avant et après leur renforcement extérieur par ces composites collés, une analyse numérique se fera par un code de calcul commercial de type éléments finis, avec le logiciel ANSYS.

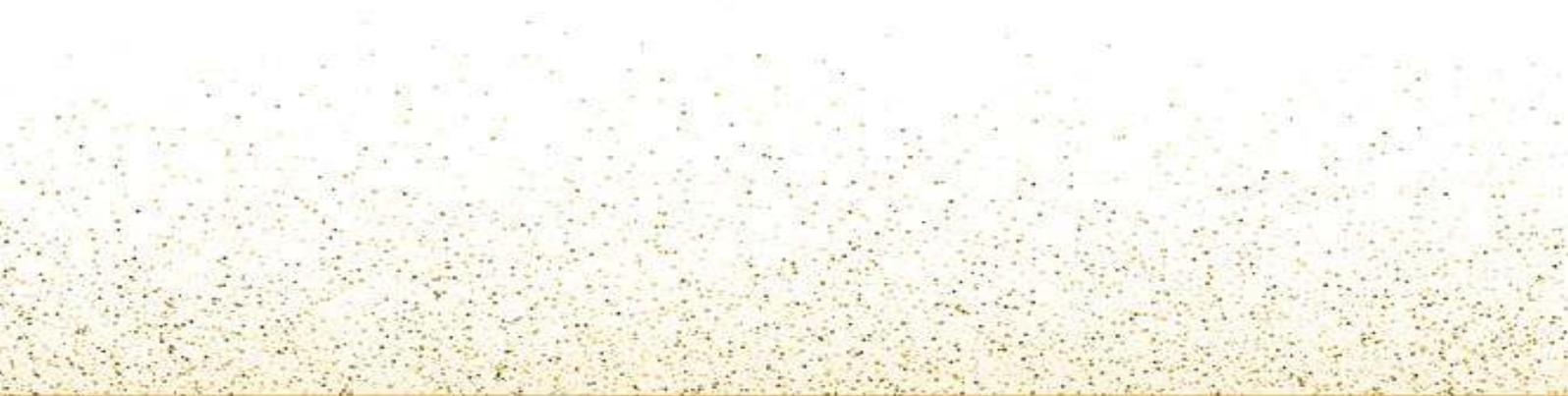
Les résultats obtenus montrent leur conformité avec les travaux de la littérature et confirment que le collage des composites CFRP, donne une augmentation de la rigidité et par conséquent améliore la charge ultime et donne une meilleure résistance à la dégradation de la structure.

Après une introduction générale, Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur la pathologie des structures en béton armé, leurs causes d'endommagement et les différents types de réparation (matériaux composites et ses applications dans le renforcement des éléments de structures.

Dans le deuxième chapitre on présentera le principe de la modélisation numérique par la méthode des éléments finis où on définit le choix du logiciel du travail ANSYS.

Dans le troisième chapitre, on portera sur l'analyse modale de l'ouvrage pris comme cas d'étude, Une modélisation par le logiciel ANSYS 21.0, a permis d'estimer les fréquences de vibrations. On a donné une comparaison entre les résultats, avant et après l'application du composite CFRP collé

Enfin, comme conclusion nous présenterons des commentaires et des perspectives à retenir pour les futurs travaux.



CHAPITRE I :
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE



CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Les ponts dans l'économie :

Ces dernières années, les économistes ont reconnu trois choses clés que font des ponts qui propulsent l'activité économique.

- Les ponts sont un élément essentiel de l'infrastructure d'un pays, permettant d'expédier des matières premières et des produits finis aux usines, entrepôts, fournisseurs, distributeurs, magasins et consommateurs finaux. Les ponts facilitent également les déplacements afin que les consommateurs puissent acheter des biens et des services dans leur propre communauté et au-delà. Lorsqu'un pont se ferme, l'activité économique ralentit ou s'arrête complètement.

Les salaires gagnés par les travailleurs de la construction et de l'entretien des ponts ont un impact économique positif lorsqu'ils sont utilisés pour acheter des choses dans les entreprises locales. Il est prouvé qu'un investissement dans les salaires et les dépenses de consommation qui en découlent sont rentables à plusieurs reprises.

Les ponts augmentent les flux de trésorerie lorsqu'ils joignent deux endroits qui se complètent économiquement. Cela peut avoir un impact puissant lorsqu'une zone qui a une masse monétaire importante est connectée à une autre qui a des biens ou des services à vendre ou des personnes qui ont besoin de travail. Il en va de même lorsqu'une communauté qui possède des matières premières accède facilement à une autre qui possède des usines capables de les transformer en biens commercialisables.

Les agences gouvernementales locales, étatiques et fédérales ont fait une priorité de maintenir les ponts en bon état, car ils jouent un rôle nécessaire dans le transport des marchandises d'un endroit à un autre et dans l'accès des clients aux entreprises. Les agences sont conscientes qu'un pont structurellement déficient ou proche de la fin de sa durée de vie pourrait être fermé à la circulation à tout moment sans préavis, ce qui ralentirait l'activité commerciale. Au cours des dernières années, ils ont fait une priorité de financer des projets d'entretien et de réhabilitation des ponts pour s'assurer que cela ne se produise pas.

De plus, les ponts dangereux (ou douteux) entraînent souvent des primes d'assurance plus élevées et exposent les municipalités au risque de poursuites judiciaires coûteuses résultant d'accidents et de blessures. Il s'agit d'un autre facteur clé des dépenses gouvernementales pour l'entretien des ponts.

I.2. Patrimoine des ouvrages d'art en Algérie :

L'Algérie compte plus de 21000 ponts routiers répartis à travers les 58 wilayas du territoire, dont 70 % sont situés dans des zones de moyenne à forte sismicité (Figure1). Les derniers statistiques, montrent que 35% de ces ponts nécessitent des entretiens et des interventions (réparations et réhabilitations) et ce, à cause des différentes dégradations observées et de la vétusté des éléments porteurs [3]. C'est pourquoi, il est devenu nécessaire de trouver des solutions adéquates pour faire face à ce problème.

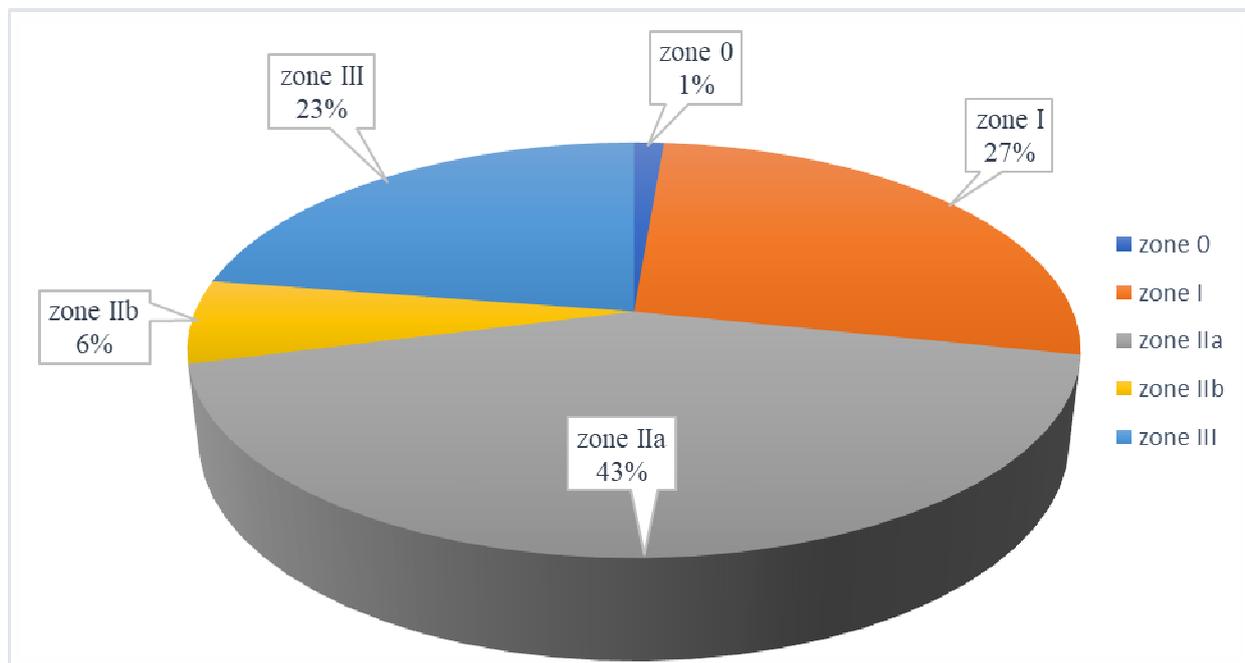


Figure 1: Répartition des ponts par zone sismique en Algérie

- Zone 0 : sismicité négligeable
- Zone I : sismicité faible
- Zone IIa : sismicité moyenne
- Zone IIb : sismicité élevée
- Zone III : sismicité très élevée

La figure 2, montre que 35% des ponts sont dans un mauvais état, ce qui a poussé les pouvoirs publics, à prendre des mesures de sécurité particulières, tels que les renforcements et les réparations, doivent être prévues afin d'éviter toute rupture fragile causée par un séisme ou autres risques majeurs. On accordera la priorité aux ouvrages qui se trouvent dans les grandes villes et les

ponts autoroutiers en raison de leur importance pour les besoins de la sécurité civile et le maintien des communications d'urgence [4].

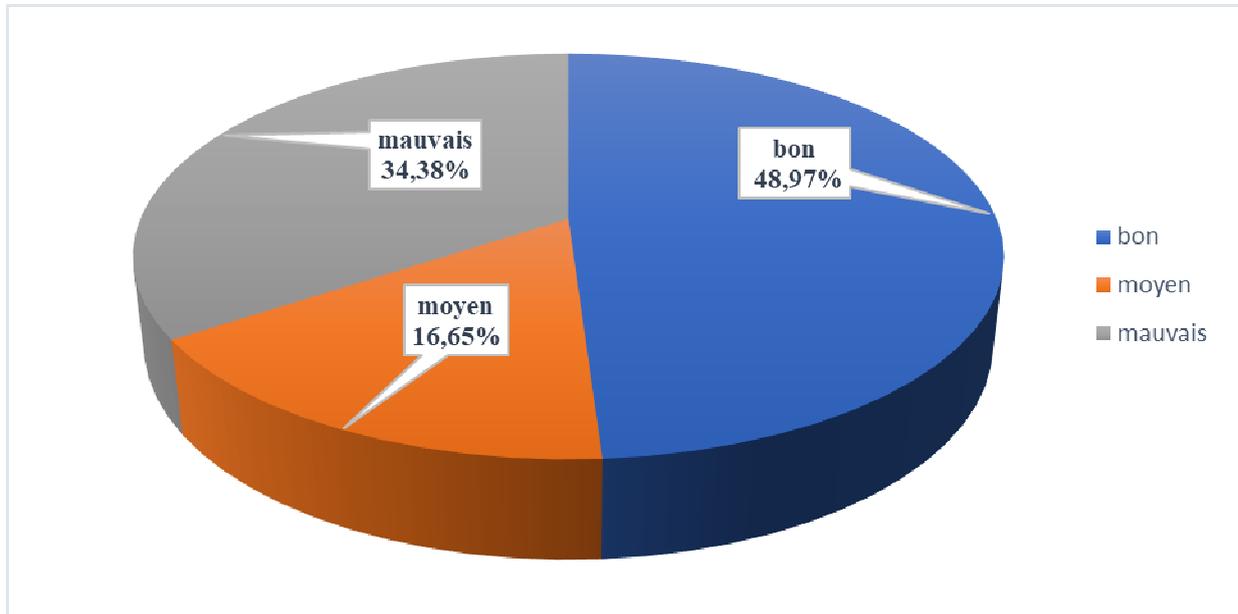


Figure 2 : Répartition des ponts selon leur état

I.3. Pathologies des ponts en béton armé :

I.3.1. Introduction :

Comme toute structure de génie civil, les ponts perdent avec le temps la qualité originelle de leurs matériaux ainsi qu'une partie de la résistance de leurs structures. Ceci est dit même si, aux stades de l'étude et du chantier, ils ont été très bien conçus et réalisés. Cette perte des performances initiales peut être attribuée au vieillissement, à la modification des conditions d'exploitation, et à l'exposition continue aux intempéries et aux charges dynamiques dues au trafic des véhicules lourds (pour les ponts routiers) et des trains (pour les ponts ferroviaires). Des actions accidentelles, tel que le séisme, peuvent également être à l'origine de désordres importants. Par ailleurs, certains désordres sont le résultat direct d'une dégradation des équipements en raison du manque d'entretien. D'autres sont engendrés par des mouvements du sol support (basculement d'une la fondation, tassement des remblais techniques derrière les culées,...). Les pathologies des ponts ne sont pas identiques pour tous les types de ponts et dépendent des matériaux de construction ; certaines sont communes aux ponts en béton armé et en béton précontraint.

I.3.2. Pathologies des ponts en béton armé :

Dans les ponts en béton armé ou précontraint, l'enrobage du béton constitue une barrière contre tous types d'agression externe. Malgré cela, l'épreuve du temps, le manque d'entretien et l'effet des actions agissant sur un pont altère les matériaux et peuvent même diminuer la capacité portante de la structure. Pour les ponts courants, lorsqu'ils sont conçus en respectant les règles de l'art, ces derniers ne connaissent pas de pathologies spécifiques, sauf problème particulier de fondation. Il est cependant utile d'insister sur les points suivants afin d'éviter l'apparition de désordres [5]:

- Le ferrailage des angles aigus dans les ponts dalles biais doit être prévu avec la densité et l'orientation appropriées, le cas échéant des fissures apparaissent au niveau de ces angles,
- Les actions thermiques dans les ponts dalles de grande largeur provoquent une flexion transversale pouvant entraîner une fissuration longitudinale de l'intrados. Toutefois, si ces fissures sont correctement pontées, la durabilité de l'ouvrage n'est pas mise en cause,
- Si leur ferrailage longitudinal n'est pas suffisamment dense, les encorbellements latéraux larges des ponts dalles ou des ponts poutres sous chaussées continus (Figure 3), peuvent être le siège de fissurations dans les zones voisines des appuis intermédiaires ;
- La traverse et les pieds droits des ponts cadres et portiques peuvent se fissurer à cause du retrait différentiel entre des bétons coulés à des époques différentes ou d'éventuels tassements différentiels si le ferrailage n'a pas la densité appropriée.

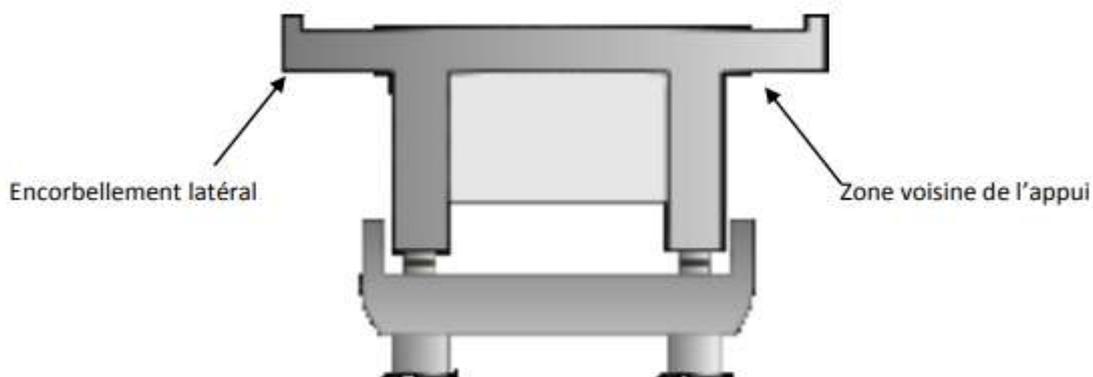


Figure 3 : Section transversale type d'un pont courant en béton armé

Concernant les cas pathologies issues de défauts de conception, La conception d'un pont est une tâche très délicate nécessitant l'intervention d'un ingénieur spécialisé. Il s'agit, de considérer tous les critères du projet et tous les éléments ayant trait à la bonne tenue de l'ouvrage durant sa période de vie. En cas de séisme, ces erreurs peuvent engendrer des conséquences catastrophiques, car la négligence ou la mauvaise prise en compte du phénomène séismique dans le calcul des charges peut donner lieu à des pathologies graves.

Il est donc clair que la négligence, ou bien l'oubli d'une charge ou d'une action durant la phase de conception du projet, peut affecter la résistance de la structure et engendrer de lourdes conséquences. Ces erreurs de conception peuvent conduire à deux types d'insuffisance de la résistance celle à la flexion et/ou celle à l'effort tranchant.

I.3.2.1. Conséquences sur la résistance à la flexion :

L'insuffisance de résistance à la flexion fut, durant le début de l'ère de réalisation des ponts en béton armé puis précontraint, la cause principale des désordres plus ou moins graves.

Les causes les plus courantes de cette insuffisance étaient le non considération ou l'oubli des actions thermiques dans les calculs des charges. Les effets des déformations différées gênées dans les ouvrages construits par phases (redistribution des efforts par fluage), encore méconnus dans le passé, et une évaluation optimiste de l'effort de précontrainte ou des effets de dénivellation d'appuis [5]. La figure I.4 montre l'emplacement classique des fissures dues à une insuffisance de résistance à la flexion.

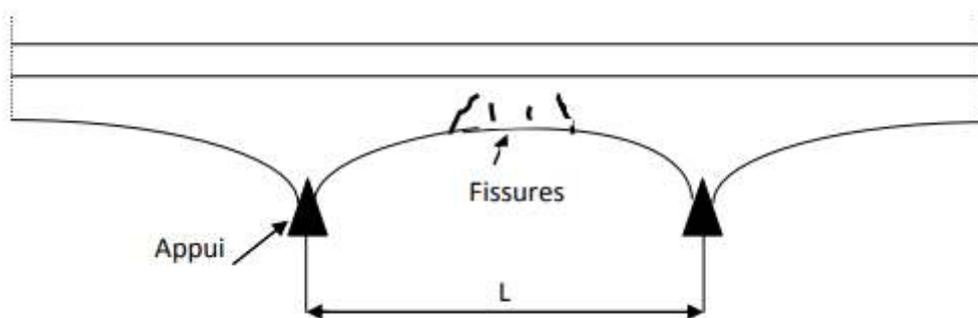


Figure 4 : Fissures dues à une insuffisance de résistance à la flexion localisées au milieu de la poutre du tablier d'un pont.

Remarque : la construction des ponts en béton précontraint étant relativement récente en Algérie (à partir des années 80), la prise en compte de l'effet des actions du gradient thermique est

en principe considérée dans les calculs de ces ponts. Les ouvrages construits avant 1975 sont par contre susceptibles des déformations gênées par l'hyperstaticité.

I.3.2.2. Conséquences sur la résistance à l'effort tranchant :

Les erreurs de conception entraînant des défauts de résistance en flexion engendrent également des défauts de résistance à l'effort tranchant. Cette insuffisance se traduit par une allure particulière de la fissuration dans les ouvrages victimes de ces erreurs (Figure 5). L'origine de ces erreurs est due à une évaluation erronée des contraintes tangentes, conduisant une épaisseur insuffisante des âmes des poutres, ou des réductions d'effort tranchant par la précontrainte. Cependant, il faut garder à l'esprit qu'une fissure n'est pas toujours un signe pathologique, même dans le cas d'un béton précontraint.

Les contraintes de traction dans le béton sont à l'origine de fissures de faible épaisseur, ne présentant aucun préjudice pour la résistance de l'ouvrage. [5]

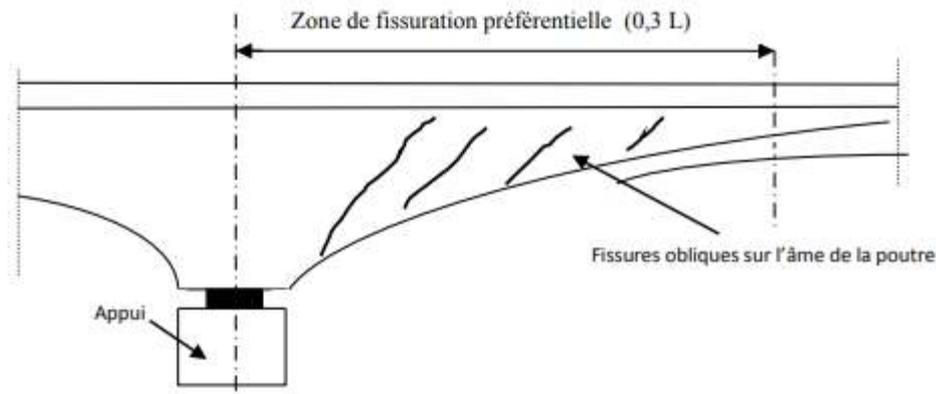


Figure 5 : Zone d'apparition des fissures dues à l'insuffisance de résistance à l'effort tranchant.

Les défauts de conception peuvent être à l'origine de d'autres types de désordres dans les ponts. Ces désordres se traduisent le plus souvent par [5]:

- Éclatement du béton dans les nœuds très sollicités, en raison d'un manque en des armatures transversales,
- Importante fissuration à défaut d'absence ou d'insuffisance d'armatures de peau,
- Éclatements du béton par poussées au vide des barres tendues ou comprimées,

- Aspect dégradé de l'ouvrage ou de certains éléments affectant la durabilité de l'ouvrage, dû à la corrosion totale des armatures en raison d'un enrobage insuffisant.

I.3.2.3. Pathologies résultant d'une insuffisance du modèle d'étude :

Afin d'étudier un pont, qui est une structure tridimensionnelle, on utilise un modèle plus ou moins simplifiés. Dans de nombreux cas, le modèle employé pour étudier la résistance d'ensemble est constitué par un réseau de barres reliant des nœuds, chaque barre représentant un élément assimilé à une poutre dont les caractéristiques géométriques et mécaniques sont évaluées à l'aide des méthodes de la résistance des matériaux usuelles. De nos jours, des modèles numériques complexes (modèles aux différences finies ou aux éléments finis) et des outils sophistiqués (SAP2000, ANSYS,... etc.) sont utilisés pour analyser ces ouvrages.

Mais, il faut garder à l'esprit que chaque fois que l'on représente une structure réelle par un modèle numérique, on introduit une erreur systématique due à l'insuffisance du modèle.

Théoriquement les effets de cette insuffisance sont couverts par des coefficients appropriés exigés par les codes de calcul aux états limites. Cependant, ces coefficients de sécurité ne sauraient couvrir des erreurs découlant de simplifications exagérées ou de calcul erronés. [5]

I.3.3. Pathologies des ponts en béton précontraint :

Les ponts en béton précontraint sont construits de béton, d'armatures passives et d'armatures actives (précontraintes). Ils peuvent donc être concernés aussi bien par les différentes pathologies du béton que celles affectant les armatures passives et celles qui concernent les armatures de précontrainte.

I.3.3.1. Corrosion des armatures de précontrainte :

La corrosion des armatures dans un ouvrage en béton résulte d'un processus complexe faisant intervenir à la fois des facteurs chimiques, physiques et mécaniques. Après son passage à l'état de rouille, l'acier connaît un important gonflement. Cet état provoque l'éclatement de l'enrobage, qui est le béton de protection.

A la même occasion, la section résistante des armatures diminue. On considère que les armatures actives (câbles de précontrainte) dans un ouvrage en béton précontraint sont protégées vis-à-vis de la corrosion électrochimique classique si l'enrobage des conduits est supérieur ou égal à 5 cm, l'ouverture des fissures en surface est inférieure à 0,2 mm et si les conduits des câbles de précontraintes sont soigneusement injectés. Mais les câbles de précontraintes peuvent être affectés par d'autres formes de corrosion dont, la corrosion sous tension et la fragilisation. [5]

Remarque: Le taux de corrosion le plus élevé est observé dans les couches superficielles des pièces en béton soumises à des alternances régulières de sécheresse et d'humidité.

Dans le cas des voussoirs sur piles des ponts en béton précontraint construits en encorbellement, un certain nombre de désordres résulte de plusieurs maladresses de conception portant sur l'emplacement des appareils d'appui, la géométrie de l'entretoise et le fonctionnement mécanique du voussoir et la répartition de son ferrailage.

On observe généralement, des fissures au niveau du gousset en bas du voussoir dues à la poussée au vide, des fissures dues à l'insuffisance de résistance à la flexion sur la traverse inférieure du voussoir ou sur l'âme de ce dernier (Figure 6.).

Lorsque les fissures sont dues à une insuffisance de résistance à l'effort tranchant, ces fissures se placent d'ordinaire auprès des appuis et prennent une orientation oblique.

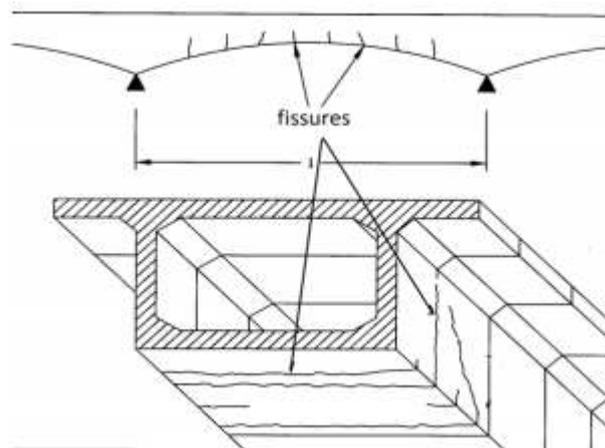


Figure 6 : Fissures dues à l'insuffisance de résistance à la flexion dans les voussoirs de ponts

Notons que les erreurs d'évaluation de l'effort de précontrainte pouvaient, par le passé, se traduire par de nombreuses formes de désordres et nombreux sont les ponts qui ont été conçus avec des codes entachés d'erreurs de calcul, tels que celles de l'évaluation des moments hyperstatiques de précontrainte. Un certain nombre d'insuffisances de résistance vis-à-vis de la flexion furent aussi dues à des tracés de câbles maladroits, conduisant souvent, dans certaines sections, à de fortes discontinuités de l'effort de précontrainte.

I.3.4. Les défauts de réalisation :

La dernière phase du projet de construction d'un pont étant sa réalisation sur chantier, il est primordial d'accorder à cette tâche la plus grande importance car, même si l'ouvrage a été parfaitement conçu, des erreurs commises lors de la réalisation lui seraient désastreuses.

On rencontre souvent sur chantier, des cas de dossiers d'étude (plans d'exécution) incomplets ou négligeant certaines parties de l'ouvrage tels que les dés d'appuis ou les plots parasismiques.

Cette insuffisance des documents d'exécution conduit l'ingénieur de chantier ou le conducteur des travaux à improviser des solutions sans études détaillées préalables.

Cependant, ces improvisations ne sont pas toujours bien fondées et leurs conséquences peuvent être graves.

Des erreurs d'exécution sont également dues à des défaillances dans l'organisation ou le contrôle de la qualité des matériaux de construction ainsi que celle de la réalisation, ou encore non-respect des règles de l'art. A titre d'exemple, les défauts de mise en œuvre des appareils d'appui du pont associés à des défauts d'assise (mauvaise exécution des bossages, mauvaise pose, absence de contrôle et de réglage en fin de construction) sont à l'origine de nombreux désordres affectant ces équipements. Ces défauts se traduisent généralement par des dépassements de la capacité de rotation et ou de distorsion des appareils d'appui. [5]

I.3.5. Pathologies affectant les équipements des ponts :

Les équipements d'un pont tels que les joints de chaussée ou de dilatation, les appareils d'appui et les éléments de protection (garde du corps) aident à procurer la sécurité requise pour que le pont assure un niveau de service acceptable. Mais si la garantie de fonctionnement de certains équipements porte sur plusieurs années, ces derniers vieillissent, s'usent ou se détériorent, et il faut les réparer, voire les remplacer périodiquement. Une attention particulière doit être portée aux désordres affectant les appareils d'appui et les joints de dilatation, car ils peuvent induire des dysfonctionnements de la structure. Il est à souligner que l'absence ou le manque d'entretien de certains équipements, telles que les gargouilles d'évacuation des eaux, peut être à l'origine de graves dommages affectant aussi bien les matériaux que la structure. La présence de traces de calcite ou d'efflorescences sur l'intrados du tablier indique souvent que les eaux pluviales pénètrent à travers les joints de chaussée et non à travers les gargouilles d'évacuation

des eaux en raison de l'obstruction de ces dernières (Figure 7) ou encore à cause d'une étanchéité en état dégradé.

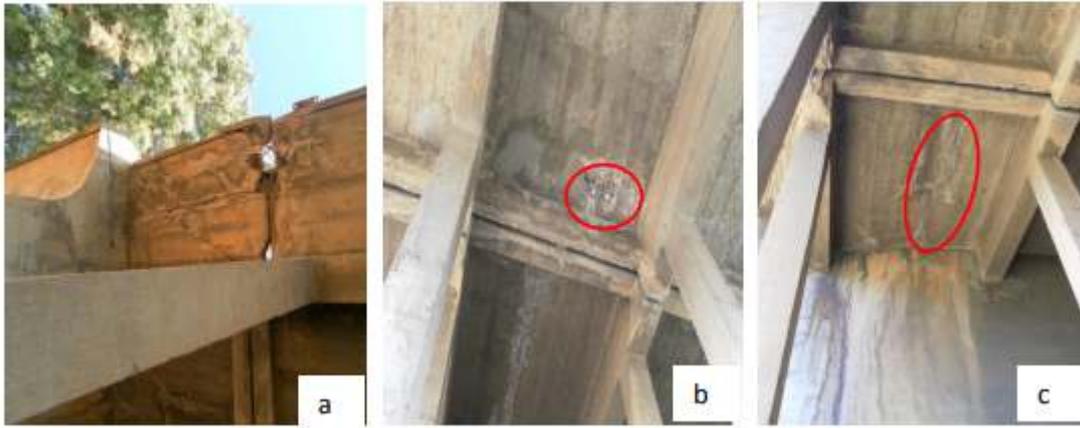


Figure 7 : Désordres engendrés par le manque d'entretien des équipements du pont de la Ferme(Chleff) : (a) dégradation avancée du trottoir au niveau du joint, (b) éclatement de béton et corrosion des armatures de la dalle et (c) traces de calcite sur l'intrados

I.3.5.1. Désordres affectant les appareils d'appui :

En raison de leur emplacement, les appareils d'appui sont très souvent non ou mal entretenus. Cet entretien est spécialement requis dans le cas des appareils d'appui métalliques (Figure 8.a). Notons que le manque d'entretien peut entraîner des dysfonctionnements structuraux dont l'importance est souvent en relation directe avec la complexité du dispositif concernés. Les désordres les plus courants des appareils d'appui résultent souvent d'un mauvais choix, liés à une mauvaise connaissance des produits et de leurs performances de la part de l'ingénieur concepteur, voire aussi d'erreurs de conception (par exemple, appareils d'appui de raideurs différentes ou dispositifs unidirectionnels disposés sur une même ligne d'appui). Mais, il peut arriver que certains désordres soient dus à des défauts de fabrication (rupture fragile d'une lentille d'un appareil d'appui sphérique, décollement de plaques de glissement en acier inoxydable, etc.).

D'autres facteurs de dysfonctionnement structuraux peuvent être à l'origine d'un désordre dans les appareils d'appui ; par exemple le mouvement d'une culée (tassements différentiels) modifiant la répartition des charges et des déplacements entre les différentes lignes d'appui. En tout état de cause et comme tout autre équipement, ces appareils vieillissent avec le temps (Figure.8.b) et doivent être remplacés une fois leur durée de vie écoulee.

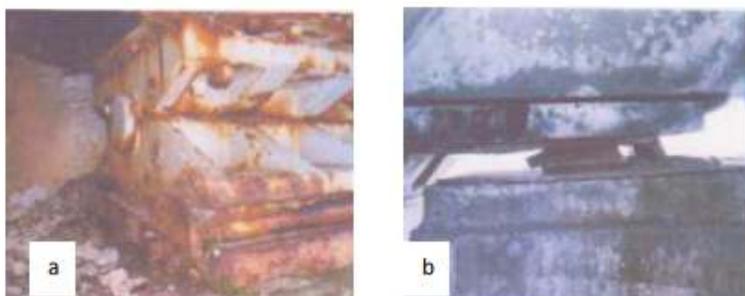


Figure 8: Appareils d'appui très détériorés : (a) métallique et (b) en caoutchouc⁴ fretté.

I.3.5.2. Désordres affectant les joints de chaussée :

Les joints de chaussée, également désignés par joint de dilatation, subissent des sollicitations dynamiques répétées engendrant leur détérioration ainsi que celle de leur support car, malgré toutes les précautions prises, le calage d'un joint par rapport au niveau de la chaussée adjacente n'est jamais parfait. En effet, quelques millimètres de dénivellation suffisent pour que l'action du trafic soit fortement amplifiée par l'effet dynamique. La figure 9 montre un exemple d'un joint de chaussée détérioré sous l'effet des efforts de freinage des véhicules. Les désordres les plus fréquents dus à l'action dynamique du trafic routier sont les suivants :

- Rupture de soudures d'éléments métalliques,
- Rupture d'éléments métalliques par insuffisance de résistance,
- Rupture ou arrachement de parties de joints sous l'effet des efforts de freinage,
 - Désorganisation d'ancrage.

Remarque : la mauvaise mise en œuvre des joints de chaussée est souvent la principale cause de leur endommagement (défaut de liaison de la poutre supportant le joint avec la structure, non-respect des enrobages appropriés, défauts de qualité du béton d'ancrage, descellement ou de calage et défauts de serrage de la boulonnerie ou mauvaise exécution des soudures).



Figure 9 : Joint de chaussée fortement endommagé : arrachement de plusieurs éléments du joint sous l'effet du trafic routier.

I.3.5.3. Désordres affectant l'étanchéité :

Lorsque l'étanchéité de la dalle ou de l'hourdis d'un pont est atteinte d'un désordre affectant la chape (Figure 10), les agents agressifs dont, principalement l'eau et les sels anti verglas, accèdent à l'intérieur de la dalle ce qui entraîne progressivement la corrosion des armatures de cette dernière. Avec le temps, cette corrosion se traduit par des désordres structuraux telle une insuffisance de capacité portante de la dalle. [5]



Figure 10 : Etanchéité et dalle en état très détérioré.

I.3.6. Pathologies affectant les fondations de ponts :

Les pathologies affectant les fondations de ponts ne sont pas toujours visibles lors d'une visite ordinaire de l'ouvrage, en raison de leur immersion dans le sol ou dans l'eau.

Cependant, ces pathologies sont souvent à l'origine de graves désordres affectant la structure, d'où il est nécessaire d'être attentif, lors d'une inspection de l'ouvrage à tout mouvement de la superstructure et de surveiller son évolution.

Des inspections subaquatiques périodiques sont indispensables en complément des autres actions de surveillance des ouvrages présentant des cas pathologiques.

I.3.6.1 Causes des pathologies :

Les pathologies affectant les fondations des ponts peuvent généralement avoir les causes qui suivent :

- Une reconnaissance insuffisante du sol support,

- Un défaut de conception de l'ouvrage (conditions de site non considérées, étude insuffisante ou incomplète, sous estimations des efforts) et/ou d'exécution des travaux,
 - L'augmentation non prévue des charges,
 - L'application d'un effort accidentel (séisme, choc,...),
- Le vieillissement des matériaux constitutifs des fondations (dégradation accélérée due au mauvais choix des matériaux, ou provoquée par l'agressivité du milieu ambiant),
 - Le manque d'entretien, et l'affouillement et/ou l'érosion du sol de fondation.
- Ce dernier point reste la principale cause de la ruine des fondations des ponts, il sera traité dans les paragraphes qui suivent.

I.3.6.2 Affouillement des fondations:

Les fondations des ponts situés en sites aquatiques sont vulnérables aux agressions de l'environnement hydraulique. Cette vulnérabilité est fonction de la nature du sol de fondation (ex : sol compressibles, granulaires sans cohésion, ...) et celle de l'obstacle franchit (ex : débit d'écoulement,...). En effet, les fondations d'un ouvrage franchissant un cours d'eau risquent de subir des affouillements provoquant leur ruine si l'ancrage de ces fondations dans le sol est insuffisant et si aucune protection adéquate (ex : rideau de palplanches, nappe d'enrochement naturel ou de gabions) de ces dernières n'est prévue.

D'autre part, l'abrasion des matériaux constituant les fondations suite aux chocs qu'elles subissent lors des fortes crues peut les détruire. Dans les fondations en maçonnerie, l'eau dissout les chaux des mortiers et les pierres calcaires et rend ces fondations sensibles aux abrasions. [6]

I.3.6.3.1. Affouillement général :

L'affouillement général est provoqué par perte des propriétés mécaniques des sols lors des crues. En effet, au-delà d'une vitesse d'écoulement critique, les sédiments fins et meubles se trouvant en surface du lit du cours d'eau perdent leurs propriétés mécaniques et sont translattées vers l'aval par la crue.

La profondeur d'affouillement est fonction de la granulométrie des sédiments, du débit et de la hauteur d'eau et peut varier entre quelques dizaines de centimètres et plusieurs mètres.

L'affouillement général peut provoquer la ruine de toute fondation non protégée ou dont l'encastrement dans le sol est insuffisant. [6]

I.3.6.3.2. Affouillement local :

L'affouillement local se développe le long de la génératrice amont d'un appui non protégé. La profondeur maximale d'affouillement peut atteindre deux fois la largeur de la pile.

Les sédiments affouillés se redéposent à l'aval [6]. La figure 11 montre les conséquences induites par l'affouillement de la fondation d'un pont. Cet affouillement qui a provoqué le tassement de la pile médiane est à l'origine des autres désordres constatés.



Figure 11 : Tassement de la pile médiane d'un pont due à l'affouillement local de sa fondation. [6]

Le concept des deux phénomènes d'affouillement général et local, sont schématisés par la

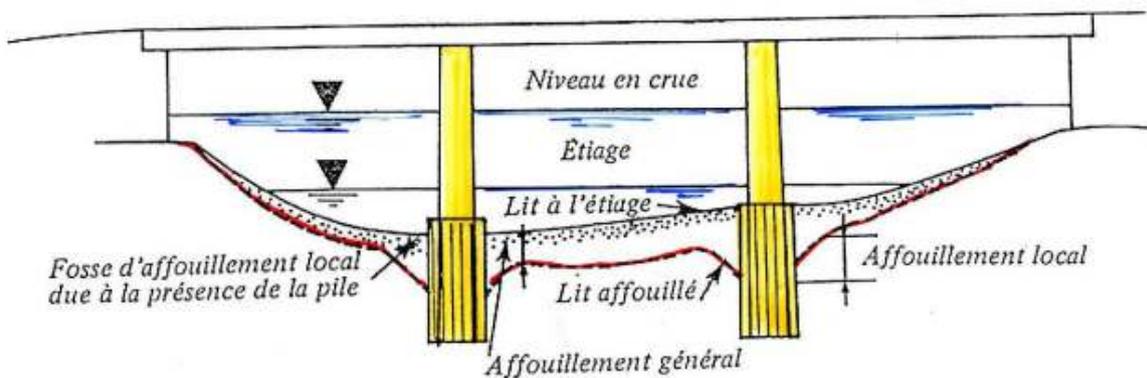


Figure 12 : Affouillement général et affouillement local durant une crue.

figure 11.

I.3.6.4. Conséquences de l'affouillement des fondations : 363

Les conséquences de l'affouillement des fondations de ponts sont des fois très lourdes et ont une répercussion immédiate sur la stabilité de l'ouvrage. Les principales conséquences sont les suivantes: [6]

I.3.6.4.1. Réduction de la force portante des fondations :

La diminution de l'encastrement de la fondation, dû à l'abaissement du fond du lit, entraîne une réduction de la force portante de la fondation concernée. Dans le cas des fondations profondes, l'affouillement général ou local des alluvions provoque une réduction de la force portante des pieux par diminution du frottement latéral.

I.3.6.4.2. Disparition des enrochements :

Lors de crue, des fosses sont formées à l'aval des fondations entraînant un raidissement des talus de protection par enrochement et le glissement de ces enrochements.

I.3.6.4.3. Abrasions et érosions des matériaux :

Les sédiments charriés par la crue entrent en frottement et en chocs avec les appuis et fondations de ponts. Ceci entraîne l'abrasion des parties immergées (massif de fondation, protections en enrochements...), particulièrement lorsqu'aucune protection n'est prévue (enrochements, palplanches...).

I.3.6.4.4. Formations de cavités :

Les écoulements d'eau entraînent les particules du sol et du massif de fondation. Ces écoulements se propagent à l'interface entre le sol et le massif de fondation et arrachent des sédiments. Ainsi, des cavités sous les massifs de fondation sont créées. Lorsque les enrochements de protection ont disparu, les affouillements locaux provoquent également des cavités dans les sols au pourtour de l'appui.

Dans les ponts dont les fondations sont en maçonnerie, des cavités se développent dans les zones soumises directement aux actions de l'eau (dans le massif de fondation même). En effet, au contact de ces zones, notamment les moins compacts, l'eau se charge de chaux et dissout le mortier laissant la place aux cavités.

I.4. Réparation et renforcement des ponts :

I.4.1. Introduction :

Le projet de réparation et/ou de renforcement d'un pont, comporte une combinaison de plusieurs techniques, devant être mise en œuvre pour remédier aux désordres constatés et redonner à la structure sa performance initiale. Les techniques à utiliser sont fonction de l'importance des désordres relevés et du matériau constituant le pont (acier, béton armé, béton précontraint, maçonnerie).

I.4.2. Réparation et renforcement des ponts en béton armé :

I.4.2.1. Techniques de réparation :

Dans le cas des ponts en béton armé, les techniques de réparation et/ou de renforcement peuvent être rangées en cinq catégories qui sont le traitement de surface (ragréages et injection des fissures), la protection des matériaux (béton et armatures), la régénération des matériaux, l'ajout de forces (ou de déformations), et l'ajout de matière. Cependant, la réparation et/ou le renforcement des ponts en béton armé fait appel, le plus souvent, à la technique dite « ajout de matière »

(Figure 13) dont, les normes Européennes NF EN 1504-9 et NF EN 1504-10 traitent des méthodes de réparation et de renforcement. [5]



Figure 13 : Réparation/renforcement par ajout de matière : (a) béton, (b et c) tissus à fibre de carbone et (d) tôle métallique.)

I.4.2.1.1. Principes de réparation du béton :

Les désordres affectant le béton peuvent se situer en surface ou en profondeur du matériau, ces désordres sont dus à des phénomènes physiques (retraits, gel, érosion...) ou chimiques (eaux acides, sulfates...). Des désordres peuvent aussi affecter le béton, telles que les réactions de gonflement internes (RGI) que sont l'alcali-réaction et la réaction sulfatique interne. La réparation et/ou le renforcement du matériau béton se base donc sur le constat d'évaluation élaboré suite à une auscultation. Plusieurs cas sont envisagés:

- Les fissures du béton ne marquent pas une insuffisance de capacité portante vis-à-vis de la flexion et/ou de l'effort tranchant : dans ce cas, la réparation consistera à obstruer ces fissures pour empêcher la pénétration des agents agressifs. L'opération d'obstruction est réalisée en mettant en œuvre un revêtement à la surface du béton (utilisable si les fissures sont très fines, peu profondes et de positionnement anarchiques). Un pontage ou un calfeutrement des fissures est réalisé s'il n'est pas nécessaire que leur remplissage soit complet.

Lorsque le remplissage doit être complet, les fissures sont injectées avec un produit souple, rigide ou gonflant (fissures dans un réservoir laissant passer l'eau...)

- Des vides sont détectés en profondeur dans le béton : dans ce second cas, les vides sont injectés par une résine ou un coulis de ciment à base de ciments sur-broyés adaptés pour l'injection.

- Une désorganisation du béton plus ou moins profonde est constatée : c'est le cas où des vides en surface, des nids de cailloux...sont présents sur la surface du béton. La réparation consiste alors à purger le béton désorganisé puis, en fonction de l'importance et de la profondeur des dégradations, à le restaurer par différentes techniques (ragréage manuel, béton coulé, béton projeté...) et d'appliquer enfin, un revêtement sur toutes les surfaces exposées pour des raisons d'aspect et/ou pour protéger le béton contre les agents agressifs.

I.4.2.1.2. Principes de réparation des armatures :

La corrosion des armatures engendre le gonflement des barres d'acier ce qui entraîne la fissuration du béton, puis son éclatement. A cet effet, la réparation de ces désordres dépend de l'état de corrosion. On distingue deux cas :

-La corrosion est en période d'incubation ou à ses débuts: la réparation porte dans ce cas sur la conservation de la passivité des armatures. Si les agents agressifs n'ont pas encore atteint les

armatures, la réparation est faite par la mise en place d'un revêtement de protection, l'augmentation de l'enrobage et la mise en œuvre d'une prévention cathodique. Si par contre la corrosion est tout juste amorcée il faudra dans ce cas utiliser un procédé électrochimique telles que :

- La déchloruration, qui vise l'extraction des ions chlorures de l'enrobage du béton,
- La ré alcalinisation dont, l'objectif est de redonner au béton carbonaté son ph basique,
- La protection cathodique, dont l'objectif est d'abaisser le potentiel de l'acier de manière à ce que le courant de corrosion devienne négligeable.

La déchloruration du béton consiste en le traitement de la surface du béton par un treillis d'anode fixé à la paroi de béton et alimenté par un courant électrique inférieur à 1A/m^2 . La réalcalinisation (Figure I.14) du béton est un procédé électrochimique semblable à la déchloruration mais avec l'utilisation d'un courant électrique plus élevé (4 A/m^2) et une durée de traitement moins prolongée (entre une à deux semaines).

Dans les deux procédés, le traitement doit être complété par un revêtement de protection (ex : enduit de ciment, inhibiteurs de corrosion). Dans le cas de la protection cathodique, l'intensité du courant est de l'ordre de 0.2 à 2 mA/m^2 pour un traitement préventif et de 2 à 20 mA/m^2 pour un traitement de protection. Soulignons que la durée de traitement par ce dernier procédé se prolonge sur toute la durée de vie de l'ouvrage.



Figure 14 : Réalcalinisation du béton par installation du treillis anode sur l'intrados du

Notons que la conservation de la passivité des armatures peut être rattachée à un entretien préventif. Elle impose un suivi particulier de l'ouvrage pour contrôler, au fil du temps, la pénétration des agents agressifs afin de pouvoir intervenir à temps et, le plus souvent, par la mise en place d'un revêtement de protection d'un coût sans commune mesure avec une restauration de la passivité.

La corrosion est en cours de développement ou est généralisée : la réparation consiste à restaurer la passivité des armatures en purgeant le béton désorganisé, la rouille est ensuite



Figure 15 : Réparation d'armatures corrodées : (a) refoulement des armatures, (b) élimination de la corrosion, (c) passivation des armatures et (d) réfection des bétons

éliminée et les armatures sont traitées, si nécessaire, par un passivant (Figure 15). Si besoin est, des armatures sont ajoutées pour remplacer les barres corrodées, puis l'enrobage est reconstituée enfin,

un revêtement de protection peut être mis en place. À la suite de ce traitement curatif, des traitements complémentaires peuvent être appliqués (ex : protection cathodique).

D'autres opérations d'entretien des ponts en béton peuvent s'imposer. Le tableau I.1 résume ces principales opérations d'entretien courant ou spécialisé et de réparations structurelles des ponts en béton armé.

Tableau 1: Principales opérations d'entretien courant, spécialisé et de réparation des ponts en béton armé [7]

<p>Entretien courant (réalisé par entreprise non spécialisée)</p>	<p>Entretien spécialisé (réalisé par entreprise spécialisée)</p>	<p>Réparation Structurel (réalisée par entreprise spécialisée)</p>
<p>nettoyage des dispositifs d'écoulement des eaux (gargouilles, barbacanes, fossés, caniveaux, drains, etc.), nettoyage de la chaussée, l'enlèvement des dépôts qui sécrètent sur ses rives, nettoyage des joints de chaussée, des joints de trottoir et de leurs accessoires, nettoyage des trottoirs, notamment ceux comportant des dalles amovibles, nettoyage des sommiers d'appui, de l'intérieur du tablier, des dispositifs de mines éventuels, toutes autres opérations de nettoyage, contrôle de l'état et le nettoyage des dispositifs de retenue (garde-corps, glissières, barrières) et des accès de visite (trappes, portes, échelles, nacelles), maintien en état des dispositifs de retenue et des accès de visite, élimination de toute végétation nuisible sur l'ensemble de l'ouvrage et à ses abords (perrés, talus), nettoyage des parements de tous graffitis et affiches, enlèvement de corps flottants à l'amont des piles nécessitant pas de moyens spéciaux, maintien en état de la signalisation située sur les voies</p>	<p>Opérations nécessitant des moyens particuliers, par exemple :</p> <p>enlèvement des amas de corps flottants à l'amont des piles nécessitant des moyens spéciaux, travaux ou opérations d'entretien nécessitant une passerelle, mise en place d'encrochements,</p> <p>Opérations sur les équipements et les éléments de protection :</p> <p>réfection des dispositifs d'écoulement des eaux, mise en peinture des garde-corps et des équipements, réfection des bordures de trottoir, des dalles sous trottoirs, des désordres locaux sur corniches, réfection des joints de chaussée et de trottoirs, réfection de la chape d'étanchéité, de la couche de roulement et des revêtements de trottoir, suppression des venues d'eau, protection des parements contre l'humidité et les ruissellements, réfection ou création de dispositifs d'entretien et de visite, remise en peinture de l'ossature métallique, mise en œuvre de produits de protection des parements en béton, entretien des protections cathodiques des parties métalliques de l'ouvrage ou des armatures du béton, réfection ou mise en</p>	<p>Interventions sur les équipements et les appareils d'appui nécessitant des adaptations structurelles :</p> <p>interventions sur la structure pour mise en place d'un nouveau dispositif de retenue, changement des appareils d'appui lorsque le vérin n'a pas été prévu. Interventions sur la structure :</p> <p>injection de fissures structurelles, reconstitution du béton dégradé sur une profondeur importante ou une surface étendue, adjonction d'armatures passives, mise en œuvre de matériaux composites collés, application d'une précontrainte additionnelle.</p> <p>Pour les fondations : reprise de fondation en sous-œuvre, confortement de fondations par rideaux de palplanches, micro-pieux, injection du sol, ou par bétonnage de cavités.</p>

<p>adjacentes (limitation de gabarit ou de tonnage).</p> <p>Nota : Cet entretien est également l'occasion de contrôler l'état de tous les équipements liés à l'usage de la voie portée ou de la brèche franchie, et supportés par l'ouvrage, tels que candélabres, bornes d'appel d'urgence, signalisation verticale, réseaux des concessionnaires ; en particulier le contrôle des dispositifs de fixation de ces équipements à l'ouvrage.</p>	<p>placement d'éléments de protection, remplacement ou réparation des dispositifs de retenue ou des corniches.</p> <p>Opérations sur les défauts mineurs de la structure : protection des armatures très localement apparentes, agrèges ponctuels et peu profonds des parements de béton très localement endommagés, protection cathodique, déchloration, réalcalinisation, parachèvement des soudures, protection et réparation des cachetages d'ancrages des armatures de précontrainte, remplacement isolé d'un rivet ou d'un boulon, rejointoiement de maçonneries, traitement des fissures non structurelles.</p> <p>Pour les appuis : changement des appareils d'appui dans le cas général.</p>	
---	---	--

I.4.3. Techniques de renforcement :

Dans le cas où l'ouvrage présente une insuffisance de capacité portante, son renforcement s'avère nécessaire. Les techniques d'ajout de matière sont utilisées pour cette fin. Elles consistent à augmenter la section résistante par ajout de béton ou d'acier, voire, à reconstituer la section résistante endommagée, en faisant participer la section ajoutée à la reprise des efforts. Pour cela, il faut recourir à des méthodes lourdes comme la mise sur cintre de l'ouvrage pendant les travaux de renforcement, l'introduction de déformations par vérinage du tablier, l'ajout d'une précontrainte additionnelle, etc.

Les trois techniques classiques d'ajout de matière utilisées pour les renforcements structuraux sont les suivantes.

- L'ajout d'armatures passives internes au béton,
- L'ajout d'armatures passives extérieures au béton, sous forme de tôles collées ou collées et boulonnées, ou d'armatures composites à base de fibres de carbone ou de verre.

- L'ajout de béton, pouvant être envisagé pour un renforcement local ou général.

I.4.3.1. Techniques de renforcement local :

Le renforcement local est assimilable à une réparation locale. On peut l'appliquer à titre d'exemple, dans le cas d'un tablier de pont heurté par un camion hors gabarit. L'opération consiste à la mise en œuvre des tâches suivantes dans l'ordre mentionné:

- Mise sur cintre de l'ouvrage (si nécessaire),
 - Purge du béton désorganisé,
 - Scellement des armatures de couture,
- Réfection du ferrailage (remplacement des barres de béton armé endommagées, avec recours à la soudure (si besoin est et si les armatures sont soudables),
- Mise en place d'un béton (par projection, coulage en place ou par injection à l'intérieur d'un coffrage),
- Injection de résine (si nécessaire) dans la zone de contact entre le béton de la structure et le béton rajouté (après durcissement de ce dernier),
- Réalisation d'un revêtement de protection contre les agents agressifs (à cause de la fissure de retrait qui se développe au niveau de la reprise de bétonnage) et pour des raisons d'aspect esthétique.

I.4.3.2. Techniques de renforcement général :

Lorsque les conditions d'exploitations sont modifiées, on recourt parfois à l'élargir de la dalle du pont. Dans ce cas, un renforcement général est nécessaire. D'autres cas peuvent nécessiter ce type de renforcement, tel que le renforcement de la section d'une pile non conçue pour résister aux chocs de camions, ou l'augmentation de l'épaisseur de la dalle...

Notons que, les travaux de renforcement général conduisent des fois à démolir certaines parties de la structure et à transformer son schéma statique (ex : la suppression d'une articulation centrale d'un portique à trois articulations). Un renforcement général peut être réalisé par ajout soit de :

- Béton (coulé ou projeté),
- Armatures passives intérieures au béton (armatures galvanisées, armatures en acier inoxydable ou armatures composites à base de fibres),
- Armatures passives extérieures au béton, sous forme de tôles collées ou de plaques et de tissus composites.
- Ajout de forces par déformations imposées (utilisé, par exemple, pour régler la poussée d'un arc ou d'un portique à trois articulations).

I.4.4. Techniques de renforcement des ponts en béton précontraint :

Un pont en béton précontraint est très rarement précontraint dans les trois dimensions. Le plus souvent, il n'est précontraint que dans le sens longitudinal. Dans ce cas, certaines de ses parties fonctionnent en béton armé, comme le hourdis supérieur ou inférieur d'une poutre-caisson. Les désordres du matériau béton et des armatures de béton armé relèvent des mêmes techniques de réparation que celles applicables aux ponts en béton armé. Il est à noter que la technique de reprise de bétonnage entre un ancien béton et un béton coulé en place est applicable à l'élargissement des ponts en béton précontraint. Dans ce cas, le renforcement est bien meilleur lorsque l'on met en œuvre, après réparation, une précontrainte additionnelle dans les deux directions : longitudinale et transversale (Figure 16).

Cependant, la restauration de la passivité des armatures de précontrainte, par exemple par réinjection des conduits de précontrainte, est une opération complexe, délicate et onéreuse, qui ne doit être décidée qu'après une évaluation minutieuse de l'état de la structure et lorsque cette opération est nécessaire et physiquement possible. La raison pour laquelle, on fait rarement appel à la restauration de la passivité des armatures actives d'un pont en béton précontraint.

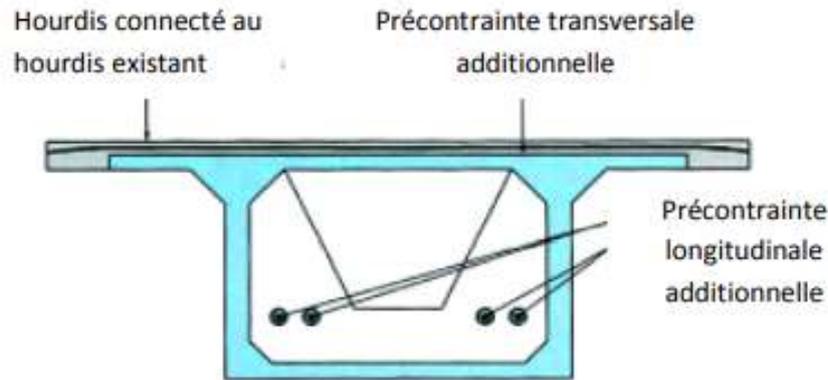


Figure 16 : Pont à poutre-caisson renforcé par précontrainte longitudinale et

Pour ce qui est de l'ajout d'armatures passives, il est possible de renforcer les ouvrages en béton précontraint, en l'absence de fissures, par des tôles collées ou des composites collés dans le but d'augmenter la quantité d'aciers passifs dans les sections présentant une insuffisance de précontrainte. Mais cette conception ne peut pas être considérée comme une solution générale, car le fonctionnement local de ces renforcements n'est pas strictement identique à celui d'armatures passives enrobées. Les méthodes de renforcement ou de réparation sont donc principalement basées sur l'adjonction de forces, pouvant être obtenue par :

- Précontrainte additionnelle extérieure,
- Remplacement de la précontrainte existante,
- Dénivellation d'appuis (vérinage).

I.4.4.1. Renforcement par précontrainte additionnelle :

Cette technique, qui se réfère à des textes normatifs (Norme NF 95-104 relative à la mise en œuvre de la précontrainte additionnelle et Fascicule 65 du CCTG.), consiste à mettre en œuvre une précontrainte (câbles, barres ou mono torons) dans un ouvrage pour en améliorer la résistance d'ensemble vis-à-vis de la flexion et/ou de l'effort tranchant dans le cadre d'un renforcement structurel. Notons que l'ajout de précontrainte longitudinale (Figure I.17) qui, doit être efficacement protégée vis-à-vis des chocs accidentels, des risques de vandalisme et du feu, ne suffit pas toujours car il faut parfois procéder à des renforcements locaux : c'est le cas de la fissuration de poussée au vide à laquelle peut s'ajouter une fissuration d'effort tranchant. Dans de tels cas, le renforcement peut faire appel à une précontrainte transversale additionnelle du hourdis

inférieur (Figure I.18) et très rarement du hourdis supérieur, une précontrainte verticale des âmes, voire à des tôles collées.



Figure 18 : Renforcement par précontrainte additionnelle longitudinale d'un pont à caissons sur le Rhône (France)



Figure 17 : Renforcement dans le sens transversal du hourdis inférieur de deux ponts à caissons sur la Saône (France) par précontrainte additionnelle.

Signalons qu'il est nécessaire de prévoir des points de fixation de la précontrainte pour

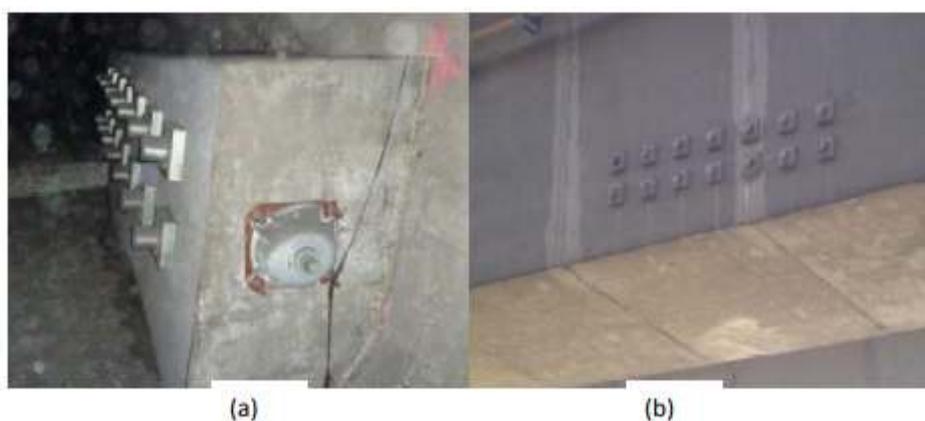


Figure 19 : Socle en béton servant d'ancrage de la précontrainte : (a) à l'intérieur et (b) à l'extérieur d'un caisson sur le Rhône (France).

éviter le risque de résonance sous l'effet des vibrations induites par le trafic. Des blocs d'ancrage (Figure 19) sont à prévoir aussi pour fixer la précontrainte solidement à la structure.

I.4.4.1.1. Renforcement par précontrainte additionnelle d'un ouvrage fissuré :

Lorsqu'il l'ouvrage présente des fissures dont, l'ouverture est supérieure au seuil d'injectabilité (0,2 à 0,3 mm), ces dernières devront être injectées avec un produit d'injection rigide, pour rétablir la continuité du matériau béton avant la mise en tension des armatures additionnelles. Faute de quoi, la précontrainte ne rétablit pas correctement la continuité mécanique de la pièce. Cependant, si le renforcement est provisoire (renforcement d'un pont sans coupure de la circulation en attendant la réparation définitive), il est possible alors que l'injection des fissures soit évitée.

I.4.4.1.2. Renforcement dans le cas d'insuffisance de résistance :

Lorsque l'ouvrage présente une insuffisance de résistance vis-à-vis de modes de sollicitation complexes associant la flexion, l'effort tranchant, la torsion et la diffusion des efforts de précontrainte (dans les zones d'ancrage), le renforcement peut être réalisé en déviant la précontrainte longitudinale additionnelle de façon à lui donner une inclinaison adéquate là où elle est bénéfique et/ou en disposant des étriers actifs, constitués de barres ou de monotorons gainés protégés, placés à l'extérieur de l'âme ou dans un forage pratiqué à l'intérieur de celle-ci

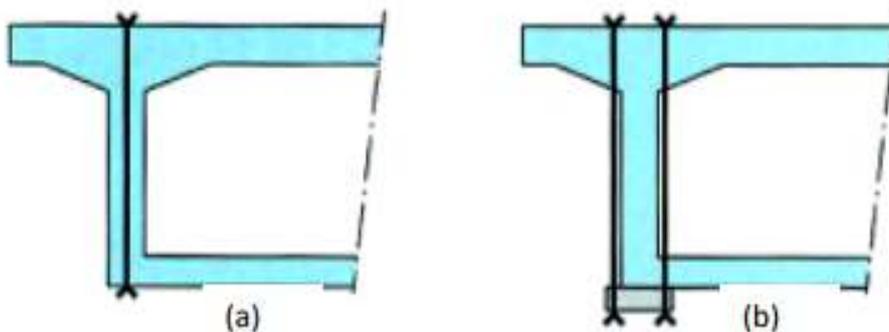


Figure 20 : Étriers actifs placés : (a) dans un forage pratiqué à l'intérieur de l'âme et (b) à l'extérieur de l'âme.

(Figure20).

I.4.4.2. Renforcement par remplacement de la précontrainte existante :

Il est parfois nécessaire de remplacer la précontrainte existante intérieure au béton (longitudinale ou transversale) à cause de son endommagement. L'exemple le plus fréquent est rencontré dans le cas de l'endommagement d'une poutre de pont sous l'effet des chocs de véhicules par dépassement de gabarit (Figure I.21). La solution consiste à dégager la précontrainte, par exemple par hydro démolition, pour pouvoir couper les câbles et les remplacer. Cette méthode est également utilisable pour mettre en place une précontrainte transversale destinée au renforcement d'un hourdis, lorsque la précontrainte existante est mal injectée et fortement corrodée.



Figure 21 : Précontrainte endommagée sous l'effet des chocs de véhicules (pont sur l'échangeur de la rampe des Fusillés-Alger)

Dans ce cas, la précontrainte est supprimée en détruisant les ancrages pour la remplacer par une précontrainte extérieure symétrique. Dans ce cas, le remplacement de la précontrainte endommagée est à faire avec des précautions spécifiques pour éviter des désordres dus à la libération de l'énergie accumulée dans les armatures lors de la coupe de celles-ci.

Le remplacement de la précontrainte longitudinale impose souvent la mise en place d'une précontrainte provisoire destinée à sécuriser la structure pendant le démontage des armatures actives (Figure 22).



Figure 22 : Précontrainte provisoire mise en place pendant les travaux de remplacement de la précontrainte existante.

I.4.4.3. Renforcement par dénivellation d'appuis :

Le vérinage d'une structure dans le but de créer une dénivellation des appuis permet d'introduire dans la structure des sollicitations favorables à la résistance de celle-ci (recompression de fissures injectées ou non, réglage des réactions d'appui, etc.) ou de rattraper le profil en long d'un ouvrage présentant d'importantes déformations. Cependant, l'effet de ces dénivellations s'atténue relativement rapidement à cause des redistributions d'efforts par fluage du béton, c'est pourquoi on associe souvent une précontrainte additionnelle à une opération de dénivellation d'appui.

Par ailleurs, le vérinage est également utilisé pour le changement des appareils d'appui ou le réglage et la pesée des réactions d'appui, mais aussi le réglage de la poussée d'un arc ou d'un portique. Il peut aussi permettre d'augmenter une hauteur libre devenue insuffisante sous un tablier en relevant celui-ci en plusieurs phases selon la course des vérins. La figure 23 montre un exemple de vérinage du tablier d'un pont.



Figure 23 : Relevage par vérins plats du tablier d'un pont (Pont PS 308 à Saint Laurent de Mure (France)).



CHAPITRE II :
MATERIAUX COMPOSITE ET LEURS
APPLICATIONS



CHAPITRE II : MATERIAUX COMPOSITE ET LEURS APPLICATIONS.

II.1. Définition et historique

II.1.1. Définition :

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux composants non miscibles (mais ayant une forte capacité de pénétration) dont les propriétés se complètent. Le nouveau matériau ainsi constitué, hétérogène, possède des propriétés que les composants seuls ne possèdent pas. Ce phénomène, qui permet d'améliorer la qualité de la matière face à une certaine utilisation (légèreté, rigidité à un effort, etc.) explique l'utilisation croissante des matériaux composites dans différents secteurs industriels. Néanmoins, la description fine des composites reste complexe du point de vue mécanique de par la non-homogénéité du matériau (Figure 24).

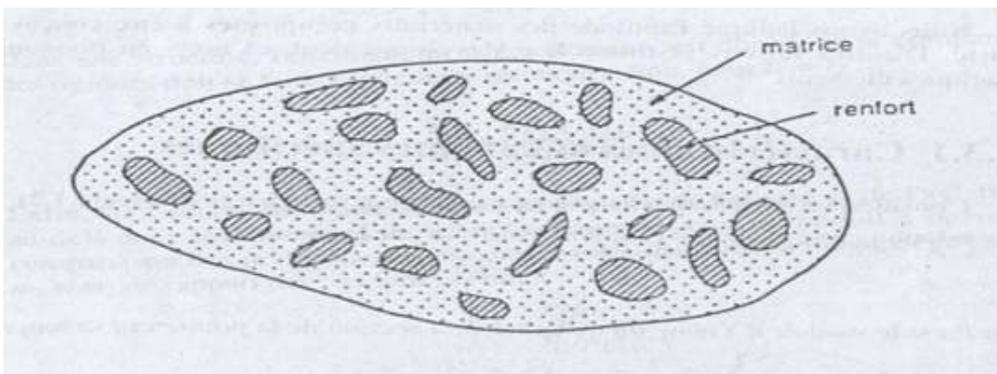


Figure 24 : Configuration d'un matériau composite

Un matériau composite se compose comme suit : matrice + renfort + optionnellement : charge et/ou additif. Exemples : le béton armé = composite béton + armature en acier, ou composite fibre de verre + résine polyester.

II.1.2. Composition :

II.1.2.1. Renforts :

Le renfort est l'armature reprenant l'essentiel des efforts mécaniques. Les renforts peuvent être classés selon, leur composition : métal, verre, polymère, leur forme (fibres courtes de 0,1 à 1 mm) ou longues de 1 à 50 mm ou continues (> 50 mm) et leur disposition : mat (nappe de fibres en vrac non tissées) ou tissé. Le tableau II.1 résume les dispositions possibles des différentes formes de renforts dans un matériau composite.

Tableau 2 : Type de renfort - Renfort non orienté - Renfort orienté

Type de renfort	Renfort non orienté	Renfort orienté
Fibres longues ou continues	Mat de fibres longues	Parallèlement les unes par rapport aux autres : renforcement unidirectionnel, Selon un angle prédéfini (45° par exemple les unes par rapport aux autres) : renforcement multidirectionnel : renfort tissé,
Fibres courtes	Mat de fibres hachées, exemple : waferboard	Orientation préférentielle, exemple : panneau de grandes particules orientées
Charges	Majoritairement	Orientation préférentielle possible

Le renfort peut être seul au sein d'une matrice (composite homogène) ou associé à un renfort de nature différente (composite hybride). Les fibres possèdent généralement une bonne résistance à la traction mais une résistance faible à la compression.

Parmi les fibres les plus employées on peut citer :

- les fibres de verre qui sont utilisées dans le bâtiment, le nautisme et diverses applications structurelles peu chargées. Le coût de production de ces fibres est peu élevé ce qui en fait l'une des fibres les plus utilisées à l'heure actuelle ;
- les fibres de carbone utilisées pour des applications structurelles visant à obtenir une plus grande légèreté et une meilleure rigidité qu'avec la fibre de verre. Elles sont obtenues par la pyrolyse d'un précurseur organique ou non sous atmosphère contrôlée. Le plus utilisé de ces précurseurs est le poly acrylonitrile (PAN). Le prix de ces fibres reste relativement élevé mais il n'a cessé de diminuer avec l'augmentation des volumes de production. On les retrouve dans de nombreuses applications dans l'aéronautique, le spatial ainsi que les sports et loisirs de compétitions (Formule 1, mâts de bateaux) ;

- les fibres d'aramide (ou Kevlar qui est une dénomination commerciale) utilisées dans les protections balistiques comme les gilets pare-balles ainsi que dans les réservoirs souples de carburant en Formule ;
- les fibres de carbure de silicium sont une bonne réponse à l'oxydation du carbone dès 500 °C. Elles sont utilisées dans des applications très spécifiques travaillant à haute température et sous atmosphère oxydante (spatial et nucléaire). Leur coût de production est très élevé ce qui limite donc leur utilisation ;
- pour les composites d'entrée de gamme, un intérêt croissant est porté aux fibres végétales, comme le chanvre ou le lin (lin textile). Ces fibres ont de bonnes propriétés mécaniques pour un prix modeste, et sont particulièrement écologiques. On rencontre aussi des fibres de polyester, telles que le textilène.

II.1.2.2. 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. Elle permet en outre de donner la forme voulue au produit réalisé. Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites que l'on classe généralement en trois familles en fonction de la nature de la matrice :

- Les composites à matrice organique (CMO) qui constituent, de loin, les volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle ;
- Les composites à matrice céramique (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme le spatial, le nucléaire et le militaire, ainsi que le freinage (freins céramique) ;
- Les composites à matrice métallique (CMM) pour quelques applications spécialisées.
- Dans le cas des CMO (composites à matrice organique) les principales matrices utilisées sont :
 - Thermodurcissables :

- Les résines polyesters insaturés (UP) 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 époxyde (EP) qui possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques. Elles sont généralement utilisées avec les fibres de carbone pour la réalisation de pièces de structure performantes (véhicules et voiliers de compétition, aéronautique),
- Les résines vinylester sont surtout utilisées pour des applications où les résines polyester ne sont pas suffisantes. Elles sont issues d'une modification d'une résine époxyde et excellentes pour des applications de résistance chimique,
- Les résines phénoliques (PF) utilisées dans les applications nécessitant des propriétés de tenue aux feux et flammes imposées par les normes dans les transports civils,
- Les résines polyimides thermodurcissables (PIRP) pour des applications à haute température (~300 °C) et polybismaléimides (BMI) pour des applications à température intermédiaire (~225 °C) ;
- Thermoplastiques, comme le polypropylène, le polyamide, le polyétherimide (PEI), le poly (sulfure de phénylène) (PPS) et la poly (éther-éther-cétone de phénylène) (PEEK) pour la réalisation de pièces de structure et d'aéronautique.

Dans le cas des CMC (composites à matrice céramique), 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 (ex. : aluminium, magnésium, zinc, nickel) ;
- d'un renfort métallique ou céramique (ex. : fils d'acier, particules de SiC, carbone, alumine, poudre de diamant).

Des charges (minérales, organiques ou métalliques) et additifs sont presque toujours incorporés à la matrice.

II.1.2.3. Mise en forme :

La mise en forme des matériaux composites peut avoir lieu par des procédés manuels ou mécanisés. Dans l'ensemble, les outils nécessaires aux procédés mécanisés s'amortissent en produisant en moyenne et grande série ; c'est pourquoi les procédés manuels sont plus adaptés à la petite série du point de vue économique.

Parmi les procédés manuels, on distingue :

- le moulage par projection simultanée ;
- le drapage de préimprégnés (catalyse à haute température, souvent sous vide) ;
 - le moulage au contact ;
 - le moulage sous vide ;
 - l'infusion.

Les procédés mécanisés sont :

- Moulage par compression des préimprégnés :
 - Smc (sheet molding compound),
 - Bmc (bulk molding compound);
 - Injection :
- Des thermoplastiques renforcés : moulage par injection de résine ou de pré-imprégné,
 - Des thermodurcissables renforcés :
 - RTM (Resin transfer Molding) (voiraussi RTM light),
 - R.RIM (ReinforcedReaction Injection Molding) : l'équivalent de la RIM (Reaction Injection Molding) pour les matériaux composites ;
 - Imprégnation en continu ;
 - Pultrusion : l'équivalent de l'extrusion pour les matériaux composites ;
 - Pull-winding ;
 - Formage de plaque, estampage des tre (thermoplastiques renforcés estampables) ;
 - Enroulement filamentaire ;

- Moulage par centrifugation.

II.1.2.4. Principaux composites :

Quelques exemples de matériaux composites :

Les composites naturels :

- le bois et les textiles naturels sont des composites à base d'une matrice en lignine et hémicellulose et de renforts en fibre de cellulose,
 - l'os est un composite à base d'une matrice en collagène et de renforts en hydroxyapatite,

Les composites artificiels :

- les matériaux rigides communément appelés « fibre de verre » et « fibre de carbone » sont des composites respectivement de fibres de verre et fibres de carbone et de diverses résines rigides (notamment époxyde),
- le Micarta est un composite de fibres (initialement coton ou papier) imprégnées à haute pression avec des résines phénoliques durcissantes telles que la Bakélite,
- les panneaux de bois agglomérés comme le contreplaqué utilisé en menuiserie, construction, ébénisterie,
- les cloisons de plaques de plâtre, très utilisées dans le bâtiment hors intempéries,
 - le béton armé en génie civil est un composite de béton et d'acier,
- le GLARE, composé principalement d'aluminium et de fibre de verre, est utilisé en aéronautique,
- l'acier damassé était un composé de plusieurs feuilles d'acier de nuances différentes
 - le composite dentaire ;
 - l'amalgame composite pouvant remplacer une dent.

II.1.3. Impact des composites sur l'industrie et l'emploi :

Sur une période de trente ans (1950-1980), le développement des composites se traduit par l'explosion des PME (30 000 employés dans les matériaux composites dont 5 % dans les matériaux haute performance). L'identité de ces professionnels des matériaux n'est pas clairement définie car ce secteur a subi une redéfinition globale demandant un effort supplémentaire en

amont de la production et un savoir-faire supplémentaire pour les ouvriers, ce qui s'oppose à la production en chaîne. Le métier de chaque acteur n'est plus clairement défini. De nombreux scientifiques migrent vers l'industrie tandis que les ouvriers acquièrent des connaissances physiques ou chimiques. Des écoles d'ingénierie et des universités dispensent des formations spécialisées de haut niveau (bac +4 ou +5). Cependant, comme une partie des travailleurs ont au plus une formation de technicien, ils se forment sur le tas, en entreprise. Par rivalité économique, ces dernières ne divulguent que très peu les connaissances ainsi acquises et le savoir se transmet lentement. Pour les acteurs de ce domaine, il n'y a pas de formation préalable dans les matériaux.

On l'acquiert en faisant de la physique, de la chimie et par l'expérience pratique.

Les matériaux composites vont permettre de faire revivre un artisanat voué à disparaître. Des ouvriers acquièrent ainsi une technique extrêmement précise qui est difficilement intégrable dans une production à la chaîne. Bien que la production automatisée en série reste, pour les promoteurs du composite, un idéal à atteindre pour le plein développement de ce secteur, le savoir tacite accumulé par le travail artisanal et l'expérience sont tout de même reconnus comme des facteurs d'innovation non négligeables. C'est notamment cette accumulation de gestes, de consciences professionnelles et de trouvailles qui ont pu simplifier et optimiser le travail ou encore diminuer le risque de défaut. Cependant, cette production artisanale est lente et coûteuse, ce qui rend les entreprises de composites moins concurrentielles face à l'industrie des matériaux non-composites. Pour y remédier, les entreprises vont réussir à séparer la production en deux phases : une première phase artisanale de préparation durant laquelle les ouvriers préparent un semi-produit et une seconde phase de moulage en continu plus facilement automatisable durant laquelle ce semi-produit est achevé. Aussi, la forte hausse du développement des matériaux composites de la fin des années 1980 (+10 %/13 % de production) laisse place à une importante diminution au début des années 1990 (-4,5 %).

II.2. Techniques de renforcement par matériaux composites

II.2.1. Généralités :

Afin de s'affranchir des difficultés liées à la mise en œuvre des anciennes techniques de renforcement (tôles colées, chemisage, autres), plusieurs groupes d'industriels et de laboratoires ont entrepris des recherches portant sur la l'emploi de matériaux composites. Parmi les matériaux composites de renforcement ou de réparation, on peut citer :

- lamelle de fibres de carbone

- lamelle de fibres de verre
- tissu de fibres de verre
- tissu de fibres de carbone appelé T.F.C
- composite de résidus plastiques

Le matériau composite est constitué de plusieurs composants élémentaires, dont l'association confère un ensemble de propriété qu'aucun des composants, pris séparément, ne possède [8]. En effet le matériau composite est constitué d'une matrice et d'un renfort, constitué de fibres. La matrice, elle-même composée d'une résine (polyester, époxyde, etc.) et de charges dont le but est d'améliorer les caractéristiques de la résine tout en diminuant le coût de production. De point de vue mécanique, l'ensemble résine -charges se comporte comme un matériau homogène, et le composite est considéré comme constitué d'une matrice et d'un renfort.

Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques élevées, alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures. En effet, la première fibre de carbone a été inventée et produite par T.Edison (en utilisant la pyrolyse des fibres de bambou pour leur usage dans une lampe à incandescence), les premières utilisations expérimentales datent des années 60 et les premières unités industrielles ne sont apparues qu'au début des années 70. La figure 25, montre que les fibres de carbone peuvent être disposées de plusieurs manières selon les sens et les manières de tissage des trames et chaînes [9].

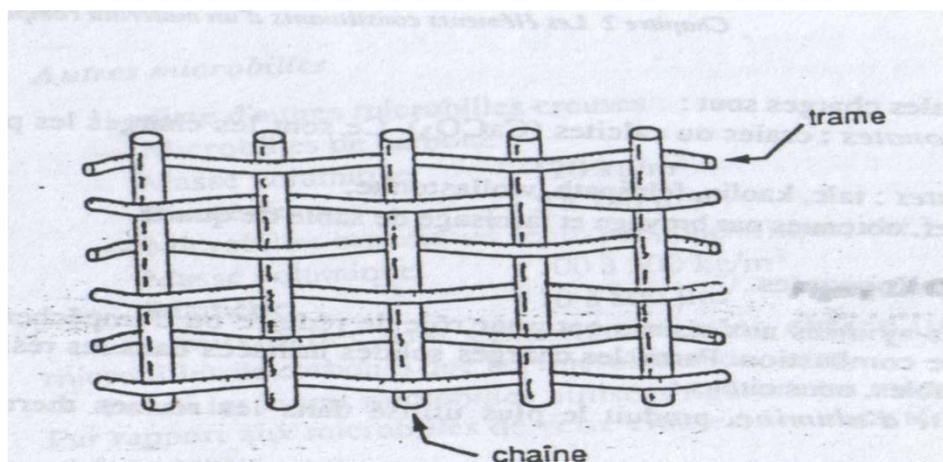


Figure 25 : Disposition des chaînes et trames dans un tissu CFRP.

II.2.2. II.2.2 Avantages d'utilisation des composites

Les fibres de carbone bénéficient de caractéristiques sans équivalent et de propriétés physiques très étendues, telles que :

- Résistance et haut module d'élasticité en traction longitudinale ;
 - Grande résistance à la fatigue et à la déformation ;
 - Faible masse volumique ;
 - Grande résistance à l'usure ;
 - Absorption des vibrations ;
 - Grande stabilité dimensionnelle ;
- Grande stabilité thermique (les fibres de carbone sont pratiquement incombustibles);
 - Bonne conductivités thermiques et électrique ;
- Grande résistance à la corrosion vis-à-vis des acides, bases, sels et des produits organiques ;
 - Transparence aux rayons x.

La figure 26, résume les propriétés mécaniques des fibres de carbones en comparaison à l'acier. En sens de traction (transversal), on compare les caractéristiques du composites carbone à celles de l'acier E235, on constate que ce dernier est mieux adapté, par contre dans le sens de longitudinal (en traction ou en compression), le composite de carbone et à un degré moins le tissu de fibre de carbone est plus résistant, voire caractéristiques nettement supérieures que celles des aciers.

C'est pourquoi les fibres de carbone ainsi que leur composites sont utilisés pour reprendre les effets de traction dans le sens longitudinal de la pièce renforcée. On constate, aussi, ces grandes différences dans la variation des contraintes en fonction des déformations pour

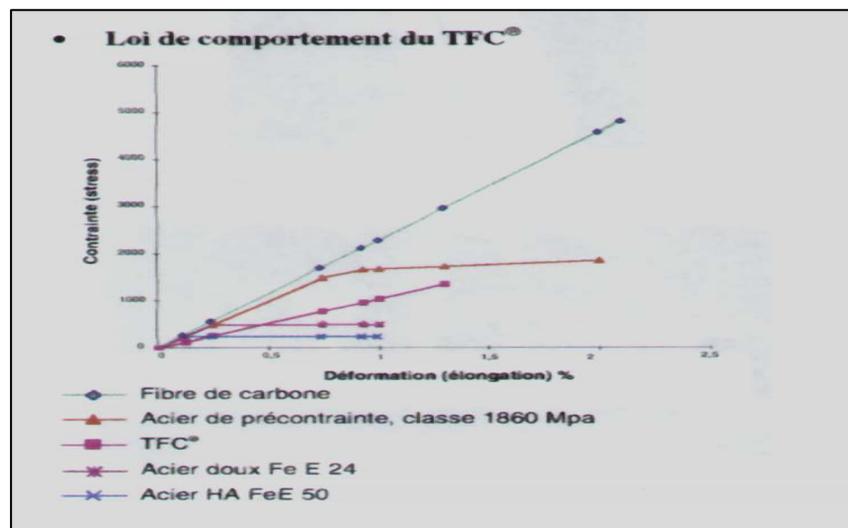


Figure 26 : Lois de comportement des différents et fibre de carbone.

autres cas (câble de précontrainte, fibre de carbone, tissu de fibre de carbone TFC, acier doux et acier haute adhérence FeE 50).

II.3. Application des matériaux composites en génie civil :

II.3.1. Préambule :

Les matériaux composites, vu leurs meilleures caractéristiques mécaniques, furent appliqués tout d'abord pour la réhabilitation et la réparation des éléments des structures endommagées, puis, l'application a été généralisée pour renforcer les structures nouvellement réalisés (en cas d'insuffisance de portance ou changement d'usage) [10]. Nous citerons la genèse et l'historique d'application du renforcement par composites à base de fibres de carbone à travers le monde.

II.3.1.1. Expérience Japonaise :

La résistance globale des structures renforcées permettrait, d'après les résultats des études faites dans les universités japonaises spécialisées, de supporter un séisme de 6 à 7 sur l'échelle de Richter. Nous pouvons citer, à titre d'exemple, le renforcement des piles (de plus de 7 m de diamètre) d'un pont autoroutier (Sakawa River Bridge – Tomei Highway), dont certaines dépassaient 60 m de hauteur. Ce chantier se termina en mars 1998, après un an de travail. Plus de 2 tonnes de fibres de carbone furent posées (Figure 27) [11].



Figure 27 : Renforcement des piles de pont (Sakawa River-Japon). [11]

Au Canada, des études ont été menées pour renforcer extérieurement des ponts anciens corrodés ou ne pouvant supporter l'augmentation des surcharges d'exploitation. A partir du début

des années 1990, de nombreuses universités (Alberta, Laval, Manitoba, Royal Military College, Sherbrooke, Queen's, Waterloo.) commencèrent à travailler sur les renforcements et les frettages des piles de ponts et des colonnes de bâtiments [12]. 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 :

- Le renforcement du pont de Calgary (Alberta) par des câbles de 6 m de long. En 1993.
- La réhabilitation du pont Clearwater Creek (Alberta) à partir de bandes de tissus de fibres de carbone pré-imprégnées en 1996.
- Le renforcement des bases de ponts Jaques Cartier et Champlain qui enjambent le Saint-Laurent à Montréal en 1996.
- Le renforcement d'un pont autoroutier, traversant l'Assiniboine River à Headingley (Manitoba) à l'aide de tissus et de câbles en fibres de carbone en 1997.
- 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 putrides en 1996.
- Le renforcement d'une structure de toiture dans le centre de Winnipeg (Manitoba) en 1997.

II.3.1.3. En Australie :

Durant les douze dernières années, les chercheurs Australiens ont poursuivi activement le développement industriel des nouvelles fibres à base de polymères (FRP) et leur utilisation dans la réalisation de nouvelles infrastructures et la réhabilitation des ouvrages détériorés ou présentant des anomalies, tels que les ponts, bâtiments ou constructions industrielles [13].

L'Australie compte quelque plus de 90.000 ponts routiers dont la longueur est supérieure à 7 m. Leurs pouvoirs publics ont alloué un montant avoisinant les dix billions de dollars U.S (\$10 billion) pour la réhabilitation de ouvrages les plus détériorés et stratégiques et qui dépassent les 60ans (Figure 28).



Figure 28 : Installation des premiers composites FRP ‘‘Australiens’’ sur un pont. [13]

La première application dans le domaine de réhabilitation des ouvrages d’art fut effectuée en 2001 sur un pont réalisé en 1960, avec une longueur de 650 m de longueur et 8 voies de circulation, se trouvant à Melbourne (Victoria). Il s’agit de la plus grande application à cette époque.

II.3.1.4. Propagation en Europe :

En Europe, de nombreuses universités ont travaillé sur les renforcements à base de matériaux composites. Un projet appelé projet « Brite » a réuni plusieurs pays sur ce sujet. Parmi les cas d’utilisation des fibres de carbone en génie civil on cite [12] :

- 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 en Allemagne.
- Le remplacement de deux haubans en acier par deux câbles de fibres de carbone sur le pont de Winterthur (Suisse) 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.
- La construction d’une passerelle (longueur 80 m, largeur 3,5m) munie de haubans et de torons de précontrainte, le tout en composite époxyde-fibres de carbone en 1998 au Danemark.

- Fin 1997, 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 Dalestown of Skipton, au nord du Yorkshire, en octobre 1997.
- Fin 1996, 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.

En France, mis à part la fourniture de renforcement des structures en béton, les composites ont relativement peu pénétré le secteur du BTP, notamment du fait d'un prix élevé comparé aux matériaux traditionnels (1,9 fois le prix de l'acier et presque 6 fois le prix du bois) ; d'une relative méconnaissance des ingénieurs et concepteurs (BET) vis-à-vis des composites et d'un manque d'information sur le cycle de vie (recyclabilité, durabilité).

Sous l'impulsion de la société Soficar et du LCPC, une étude démarra fin 1994, soutenue par le ' ' Plan génie civil 1995' ' du Ministère de l'Équipement, du Tourisme et du Transport (METT) et la DRAST (Direction de la recherche et des affaires scientifiques et techniques), d'un système de renforcement à base de tissus secs imprégnés in situ. Les résultats de cette collaboration ont donné naissance d'un produit appelé TFC (tissus de fibres de carbone), marque déposée par Freyssinet International. En 1996, Freyssinet renforçait, avec succès, le premier pont autoroutier français en remplacement les plats collés métalliques classiques par des tissus secs et imprégnés sur place par un adhésif spécifique à base de résine époxydique (TFC). Après ce premier succès et dès l'année 1997, l'application devenait industrielle, avec l'application de centaine de ponts et de bâtiments avec le procédé TFC..

II.3.1.5. Premières application en Afrique :

La littérature montre que l'Afrique du sud a été le premier pays à avoir appliqué le renforcement des éléments structuraux par le principe de collage extérieur de plaques métalliques (procédé de l'Hermite) en 1960 sur un pont dégradé. Les recherches se sont, dans un très peu de temps, accentuées notamment dans le domaine de renforcement et/ou réparation des poutres et dalles, ou confinement des poteaux. Parmi les autres pays qui ont lancés des recherches, l'Algérie, la Tunisie, l'Égypte, le Maroc, le Sénégal, etc.

En Algérie, pays considérée parmi les premiers, en Afrique, avoir appliqué ce type de renforcement, après l'Afrique du Sud. Les composites CFRP ont fait leur apparition sur le marché en 1997. La première application fut en 1998 sur l'ancien pont voûté de Sidi Rached à Constantine, où des bandes du TFC furent posées sur la poutraison du tablier de ce pont. Un grand nombre d'ouvrages d'art et éléments structuraux de bâtiments ont été renforcés, par la suite, par

des composites de fibres de carbone (lamelles et tissus de fibre de carbone). En effet, après la première expérience en 1998, un deuxième pont fut réparé, il s'agit de l'ouvrage rail PK 459 sur oued Bill Braguettz dans la même ville, avec le partenariat SAPTA- Freyssinet-France (fourniture et pose de TFC) d'une part, et la sous-traitance avec SIKA- Outre-mer d'autre part avec l'application des produits de colmatage et d'injection des fissures sur la maçonnerie et le béton d'autre part [13] .

En 2000, le Pont Blanc d'EL Harrach, fut aussi réparé et renforcé par le procédé (TFC). L'ouvrage, en question, permet le franchissement au niveau du centre-ville, de l'oued El Harrach, construit au début des années 1900.

Des dégradations ont été observées sur les différentes parties de l'ouvrage. L'analyse des désordres a montré que les causes sont d'origine atmosphérique, de vétusté de la structure, d'attaque de l'eau due au défaut de l'étanchéité du tablier et la perte d'importantes sections d'acier.

Cette technique s'est propagée, après, pour la réhabilitation de plusieurs ouvrages d'art sur le territoire Algérien, avec d'autres sociétés de pose et de fourniture (Sika, Travomed, Enros, etc,..). Comme exemple d'application on peut citer : le pont sur oued Messaad à Laghouat en 2005, qui se situe sur l'axe de la route reliant Laghouat à Aflou. Cet ouvrage est constitué de trois travées identiques de 15.5 m chacune, avec un tablier composé de poutres en béton armé (quatre à chaque travée), et d'une dalle en béton armé de 20 cm d'épaisseur.

Cet axe routier devenu stratégique est très fréquenté par les poids lourds et les convois exceptionnels à causes des nouvelles installations pétrolières réalisées dans cette zone. Cette nouvelle surexploitation et l'étanchéité défectueuse de l'ouvrage ont engendré des désordres sur toute la structure parmi lesquelles: la fissuration au niveau de la dalle, la fissuration des poutres, la corrosion avancée des armatures et l'éclatement des bétons. Des réparations ont été effectuées avec un phasage dont le mode opératoire est le suivant : [14]

- Dépose de toutes les parties non adhérentes des bétons et des enduits ;
- Sablage de toute la structure (poteaux, poutres, dalle) et de toutes les armatures corrodées
- Injection des fissures par une résine époxydique (Sikadur 52 Injection) afin de reconstituer le monolithisme des éléments ;
- Protection des armatures sablées par un inhibiteur (SikaMonotop 61P AC) de corrosion

- Réparation et profilage des bétons par un mortier (Sikatop SF 126) de réparation à haute performance et avec fumée de silice ;
- Renforcement des poutres soumises aux efforts de la flexion par les lamelles ‘‘SikaCarbodur 540 ml’’ ;
- Renforcement des poutres soumises aux efforts tranchants par les tissus Sika Wrap HEX 230C® :120 m² (Figure 29); Protection des bétons par un revêtement (SikaGard 680S) méthacrylates contre les agressions atmosphériques.



Figure 29 : Pose de tissu en fibres de carbone sur les poutres du tablier [14]

D'autres applications pour renforcements de ponts par le tissu en fibres de carbone (TFC) ont été effectuées, suite aux conséquences du séisme de Boumerdes, de Mai 2003.

Durant les vingt dernières années, la technique de renforcement par CFRP (TFC) devenait de plus en plus maîtrisable par les techniciens et personnels de terrain des entreprises Algériennes.

La réhabilitation des ponts comme celui d'Oued Oumazer à Cherchell (Tipaza) en 2006 fait preuve, et la pose parfaite du composite sur les parties détériorées du tablier de l'ouvrage a permis de constater l'effet du renforcement par ce type de composite sur le comportement global du pont.

Les détériorations sont visibles sur les éléments du tablier, avec des éclatements du béton d'enrobage, corrosion des armatures et des fissures plus ou moins profondes sur les éléments structuraux du tablier. Au niveau de l'infrastructure (Figure 30), les piles présentent des anomalies qui se résument en la dégradation totale des bétons et apparition des aciers complètement corrodés avec diminution de leur section). Cela est dû probablement aux attaques des eaux salées du milieu marin entraînant des éclatements du béton et une perte de masse et exposant ainsi les aciers à des

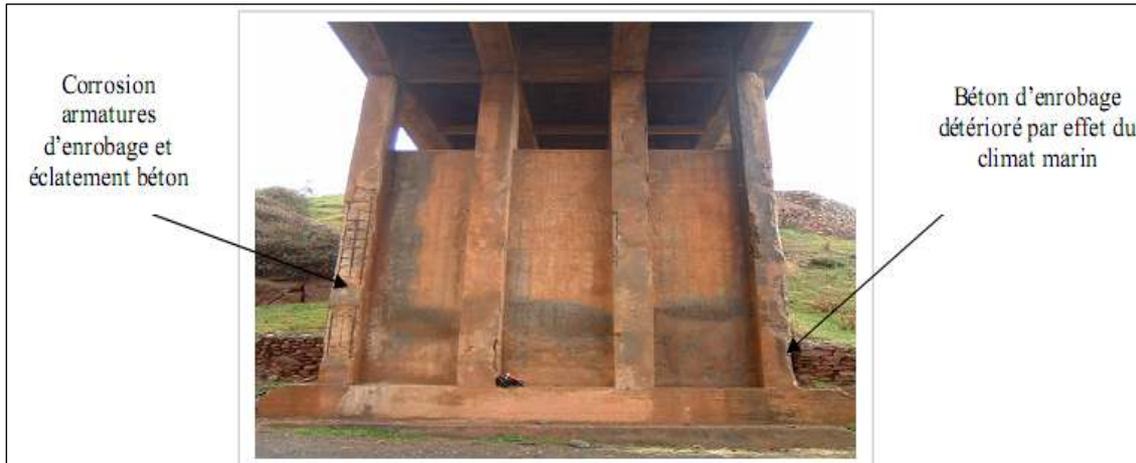


Figure 30 : Vue des dégradations apparentes sur la pile [13].

corrosions et une perte alarmante de la section résistante. Le diagnostic révèle aussi des fissures inclinées à 45° au niveau des abouts des poutres maîtresses qui traduisent l'accroissement des contraintes de cisaillement dues essentiellement à l'augmentation du trafic routier. On retient également que cette zone a été frappée par un séisme de magnitude 6.1 à l'échelle de Richter en 1989 [13].

En outre, l'analyse des désordres (Figure 31) a permis de dégager des solutions d'intervention qui convergent vers la réhabilitation et/ou le renforcement des éléments détériorés, afin de redonner à ces éléments leur portance initiale et rendre à la structure de l'ouvrage son état d'avant. La méthodologie choisie pour réparer et renforcer le pont repose sur les phases d'interventions suivantes [13] : Chemisage armé des piles, réparation des bétons dénués et injection des fissures par la résine époxydique et enfin la réparation des poutres par collage de tissus de fibres de carbone CFRP. Afin de redonner aux éléments détériorés leur rigidité de l'état initial, il est impératif de choisir de bons matériaux d'ajout en performance et efficacité pour que l'élément renforcé puisse supporter les charges et surcharges du trafic.

Le tissu unidirectionnel Sika wrap est appliqué sur les faces latérales des poutres principales pour reprendre l'effort de cisaillement, tandis que le stratifié de fibres de carbone

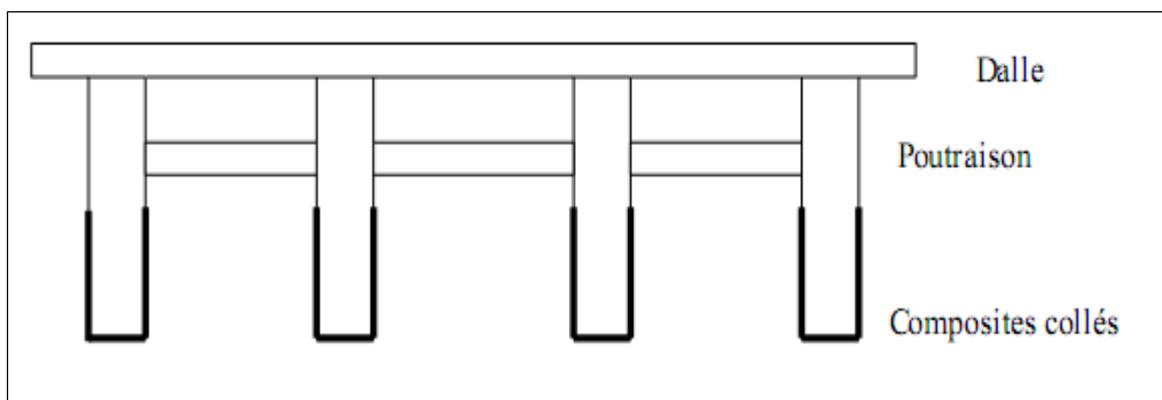


Figure 31 : Applications des fibres de carbone CFRP sur les poutres du pont. [13]t

Sikacarbodur est appliqué sur les faces inférieures de ces mêmes poutres pour reprendre l'effet de traction

(Figure 31) [15].

La réparation de toute la structure a duré dix mois, ce temps a été suffisant pour nous permettre de prendre toutes les précautions nécessaires pour effectuer des essais d'évaluation de la structure.

Notons enfin, que l'application de nouvelles techniques, tels que le renforcement par collage externe de matériaux composites, sur les éléments structuraux, est une solution alternative plus appropriée. Les fibres généralement utilisées dans ces matériaux composites sont en verre, en carbone ou en aramide, sous forme de tissus unidirectionnels ou bidirectionnels, de lamelles ou de barres. Dans les structures en génie civil, les matériaux à base de fibres de carbone offrent l'avantage de rapidité d'exécution, résistance élevée à la traction, un module d'élasticité élevé, une bonne résistance à la corrosion, en plus de leur efficacité dans le renforcement des structures.



Figure 32 : Pile du pont après sa réparation. [13]



CHAPITRE III :
METHODE DES ELEMENTS FINIS ET
CHOIX DU LOGICIEL



CHAPITRE III : METHODE DES ELEMENTS FINIS ET CHOIX DU LOGICIEL

III.1. Méthodes des éléments finis :

III.1.1. Préambule :

L'analyse aux éléments finis (MEF) est une méthode de calcul utilisée dans les domaines scientifique et technique. Avec les éléments finis, il est possible de calculer des problèmes complexes qui ne peuvent pas être résolus par d'autres méthodes. En effet, la méthode des éléments finis étant une analyse numérique consistant à résoudre des équations différentielles, il est possible de l'utiliser dans divers domaines physiques. Le composant à analyser est subdivisé en un grand nombre de petits éléments finis avec une géométrie simple, qui peuvent être calculés avec les équations initiales connues. Cette subdivision a donné le nom de la méthode numérique: méthode des éléments finis. En ingénierie, la méthode des éléments finis est aujourd'hui une méthode standard dans le calcul assisté par ordinateur des charpentes et structures planes.

III.1.2. Principes de la méthode des éléments finis :

La MEF est basée sur une idée simple : subdiviser (discrétiser) une forme complexe en un grand nombre de sous domaines élémentaires de forme géométrique simple (éléments finis) interconnectés en des points appelés nœuds. Nous considérons le comportement mécanique de chaque élément séparément, puis nous assemblons ces éléments de telle façon que l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements soient satisfaits en chaque nœud. En effet, cette méthode utilise des approximations simples des variables inconnues dans chaque élément pour transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques. Les nœuds et les éléments n'ont pas forcément de signification physique particulière, mais sont basés sur des considérations de précision de l'approximation. Elle permet donc de résoudre de manière discrète une EDP dont on cherche une solution approchée « suffisamment » fiable. De manière générale, cette EDP porte sur une fonction u , définie sur un domaine. Elle comporte des conditions aux bords permettant d'assurer existence et unicité d'une solution.

Sauf cas particuliers, la discrétisation passe par une redéfinition et une approximation de la géométrie, on considère donc le problème posé sur la géométrie approchée par un domaine polygonal ou polyédrique par morceaux. Une fois la géométrie approchée, il faut choisir un espace d'approximation de la solution du problème, dans la MEF, cet espace est défini à l'aide du maillage du domaine (ce qui explique aussi pourquoi il est nécessaire d'approcher la géométrie).

Le maillage du domaine permet d'en définir un pavage dont les pavés sont les éléments finis. Un élément fini est la donnée d'une cellule élémentaire et de fonctions de base de l'espace d'approximation dont le support est l'élément, et définies de manière à être interpolantes. Bien qu'il existe de nombreux logiciels exploitant cette méthode et permettant de « résoudre » des problèmes dans divers domaines, il est important que l'utilisateur ait une bonne idée de ce qu'il fait, notamment quant au choix du maillage et du type d'éléments qui doivent être adaptés au problème posé : aucun logiciel ne fait tout pour l'utilisateur, et il faut toujours garder un œil critique vis-à-vis de solutions approchées. Pour cela il existe des indicateurs d'erreur et des estimateurs d'erreur qui permettent d'ajuster les différents paramètres.

La solution trouvée, il reste cependant à déterminer les caractéristiques de la méthode ainsi développée, notamment l'unicité de l'éventuelle solution ou encore la stabilité numérique du schéma de résolution. Il est essentiel de trouver une estimation juste de l'erreur liée à la discrétisation et montrer que la méthode ainsi écrite converge, c'est-à-dire que l'erreur tend vers 0 si la finesse du maillage tend elle aussi vers 0. Dans le cas d'une équation aux dérivées partielles (EDP) linéaire avec opérateur symétrique (comme l'est l'opérateur Laplacien), il s'agit finalement de résoudre une équation algébrique linéaire, inversible dans le meilleur des cas.

III.1.3. Etapes du calcul de la MEF :

III.1.3.1. Étapes logiques du calcul par éléments finis :

Les étapes de la MEF se résument aux étapes suivantes [18]:

- Définir les nœuds et les éléments (Créer le maillage) ;
- Pour chaque élément, établir la matrice de rigidité élémentaire $[K_e]$ reliant les degrés de libertés (déplacements) nodaux $\{U_e\}$ et les forces $\{F_e\}$ appliquées aux nœuds ;
- Assembler les matrices et les vecteurs élémentaires en un système global $[K] \{U\} = \{F\}$ de manière à satisfaire les conditions d'équilibre aux nœuds ;
- Modifier le système global en tenant compte des conditions aux limites ;
- Résoudre le système $[K] \{U\} = \{F\}$ et obtenir les déplacements $\{U\}$ aux nœuds ;
- Calculer les gradients (flux de chaleur, déformations et contraintes) dans les éléments et les réactions aux nœuds sur lesquels les conditions aux limites sont imposées.

Les trois phases essentielles de la modélisation par la méthode des éléments finis sont
(Figure 33) :

A/ Préprocesseur :

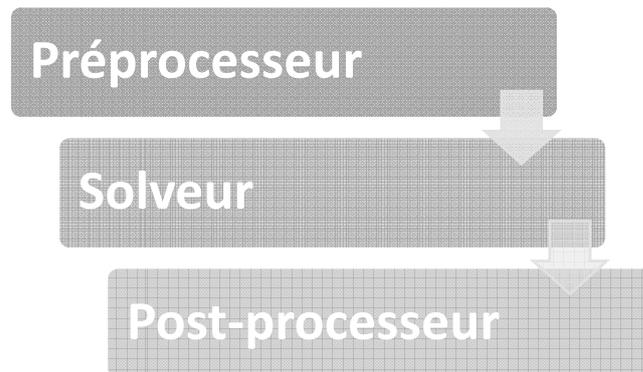
- Choisir le type d'éléments
- Entrer les propriétés géométriques
- Entrer les paramètres physiques
- Créer le modèle géométrique
- Créer le maillage : définir les nœuds et les éléments
 - Appliquer les sollicitations
 - Imposer les conditions aux limites

B/ Solveur :

- Choisir le type d'analyse (statique, dynamique,...)
- Construire la matrice et le vecteur élémentaire $[K_e]$, $\{F_e\}$
 - Assembler $[K_e]$ et $\{F_e\}$ dans $[K]$ et $\{F\}$
 - Prendre en compte les conditions aux limites
 - Résoudre le système d'équations $[K] \{U\} = \{F\}$
- Calculer les variations additionnelles (gradients, réactions, $\epsilon...$).

C/ Post-processeur :

- Présenter les résultats de façon intelligible et synthétique
 - Sous forme numérique
 - Sous forme graphique
- Effectuer des fonctions complémentaires : combinaisons, interprétations (Interpolations, animation).



III.1.3.2. Etapes d'un programme d'éléments finis :

Le tableau suivant résume les parties de base du programme d'ordinateur pour la résolution complète d'un problème par la méthode des éléments finis.

Tableau 3 : Organigramme d'étapes caractéristiques d'un programme d'éléments finis.

Introduction des données décrivant la géométrie, les propriétés du massif, Les sollicitations, et les conditions aux limites.
<ul style="list-style-type: none">- Construire la matrice et le vecteur élémentaire $[K_e]$, $\{F_e\}$- Assembler $[K_e]$ et $\{F_e\}$ dans les matrices globales $[K]$ et $\{F\}$
Introduction des conditions aux limites et résolution de $[K] \{U\} = \{F\}$
Impression des résultats

III.2. Logiciel de calcul :

III.2.1. Choix du logiciel ANSYS :

Devant la diversité des logiciels de structures existants dans le marché, convergeant vers les applications avec la méthode des éléments finis (MEF), on était contraints de choisir le logiciel le plus 'prêt' de notre cas de modélisation et qui présente une bibliothèque diversifiée Les logiciels les plus utilisés en ce moment pour l'analyse numérique des structures sont : Abaqus, Adina, Plaxis, Ansys, etc. Notre choix est porté sur le logiciel Ansys/Version Workbench, et APDL dont ses avantages sont montrés dans le paragraphe ci-après.

III.2.2. Principaux produits ANSYS :

III.2.2.1. ANSYS Structural :

Ce produit permet d'effectuer des simulations mécaniques en calcul de structures. Ses principales capacités sont :

- ❖ Analyse statique ;
- ❖ Analyse modale ;
- ❖ Analyse harmonique (réponse forcée) ;
- ❖ Analyse temporelle ;
- ❖ Gestion de différentes situations non-linéaires (contacts, plasticité matériaux, grands déplacements ou grandes déformations).

III.2.2.2. ANSYS Mechanical :

Ce produit dispose des mêmes capacités qu'Ansys Structural, en y ajoutant notamment un solveur thermique, avec modélisation du rayonnement.

III.2.2.3. ANSYS CFX et Fluent :

Ces deux logiciels permettent d'effectuer des simulations en matière de mécanique des fluides. Ils portent le nom des compagnies qui les ont développés, rachetés par ANSYS .Inc. respectivement en février 2003 et en février 2006. Fluent est un solveur : il ne comporte pas de meilleur (le maillage doit être réalisé avec un logiciel de maillage, Gambit par exemple, qui est également édité par ANSYS). Fluent est un solveur très utilisé dans l'industrie et la R&D à travers le monde. Il est souvent considéré comme une référence dans le domaine de la modélisation fluide. Le paramétrage du modèle se fait par une interface graphique. Il dispose d'une interface de scripts pour automatiser les processus de calcul. L'un des intérêts de ce logiciel de simulation généraliste, est qu'il dispose d'un nombre relativement important de modèles, pouvant faire face à divers aspects de la mécanique des fluides : écoulements diphasiques (miscible, non miscible, cavitation, solidification), turbulence (LES, KE, Kw, SA, Reynolds stress...), combustion (pré-mélangé et non pré-mélangé), transport de particules, écoulements en milieux poreux, maillages mobiles et dynamiques avec reconstruction du maillage, entre autres. Les schémas numériques temporels et spatiaux peuvent être modifiés pour améliorer la convergence. Fluent est parallélisé et permet de tirer parti de systèmes multiprocesseurs aussi bien au sein d'une seule machine qu'en réseau (cluster, dualcore, plateforme multi-CPU).

III.2.2.4. Gambit :

Un logiciel de maillage édité par la société ANSYS depuis 2006 (l'éditeur historique du logiciel était la société Fluent). Ce logiciel permet de créer géométries et maillages avec un grand degré de liberté et une grande précision. Le domaine géométrique peut aussi être importé depuis un fichier CAO. Il assure également le maillage automatique de surfaces et de volumes en

parallèle de l'introduction de conditions aux limites. Gambit est souvent considéré comme une meilleure de référence par les modélisateurs utilisant Fluent.

III.2.2.5. ANSYS Autodyn et AnsysDyna :

Ces logiciels possèdent des solveurs utilisant les formulations explicites des équations à résoudre, contrairement aux produits précédemment cités.

Leur domaine d'application est réservé aux modélisations mettant en jeu des situations mécaniques aux très larges déformations.

III.2.2.6. ANSYS Electromagnetics et Ansoft :

Ce produit permet de résoudre des modélisations mettant en jeu des phénomènes électromagnétiques.

III.2.2.7. ANSYS Multiphysics :

Ce produit rassemble l'ensemble des capacités d'ANSYS en matière de simulation numérique implicite.

III.3. Environnements logiciels :

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

III.3.1. ANSYS Classic :

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 utilisant le langage de script APDL (ANSYS Parametric Design Language). ANSYS classic est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.

III.3.2. ANSYS Workbench :

Cette plate-forme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en réutilisant le code ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièces) 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. La plateforme est donc chargée de convertir les requêtes entrées par l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer la résolution. Le modèle éléments finis généré reste néanmoins manipulable en insérant des commandes propres au code ANSYS.

III.4. Logiciel ANSYS :

III.4.1. Analyse structurelle :

Le logiciel d'analyse structurelle d'Ansys vous permet de résoudre des problèmes techniques structurels complexes et de prendre plus rapidement de meilleures décisions en termes de conception. Grâce aux solveurs d'analyse par éléments finis (FiniteElementAnalysis, FEA) disponibles dans la suite logicielle, vous pouvez personnaliser et automatiser les solutions pour vos problèmes de mécanique structurelle ainsi que les paramètres d'analyse de scénarios de conception. Vous pouvez aussi facilement les connecter à d'autres outils d'analyse physique afin de gagner en fidélité. Le logiciel d'analyse structurelle d'Ansys est utilisé dans de nombreuses industries et permet aux ingénieurs d'optimiser la conception de leurs produits et de réduire le coût des tests physiques [19].

III.4.1.1. Capacités avancées :

La simulation des matériaux complexes et du comportement des matériaux peut être réalisée à l'aide des modèles intégrés, des modèles de matériaux définis par l'utilisateur ou du Matériel Designer (Concepteur de matériaux) dans Mechanical pour créer des éléments de volumes élémentaires représentatifs (RVE). Les modèles soumis à une grande déformation ne doivent pas être simplifiés en passant inutilement à des solveurs explicites. La capacité adaptative non linéaire (NLAD) gère automatiquement les simulations difficiles grâce au remaillage de la solution au cours du processus. La technologie de fracture SMART « splitting morphing adaptive remeshing technique », technologie de séparation, morphing, adaptation et remaillage) a été ajoutée à Mechanical pour la modélisation de la propagation des fissures dans les structures où la fracture est une préoccupation, de façon à éliminer les processus de maillage complexe et les suppositions. Ansys Motion est une solution de conception de nouvelle génération basée sur un dynamique multi corps flexible présent dans l'interface de Mechanical. Elle permet une analyse rapide et précise de corps flexibles et rigides au sein d'un solveur unique [19].

III.4.1.2. Solution d'analyse structurelle complète :

Une gamme complète d'outils d'analyse est à votre disposition pour analyser les cas de charges uniques ou pour effectuer des analyses transitoires ou de vibration. Vous pouvez également examiner des comportements de matériaux, de joints ou de géométries linéaires et non linéaires. La technologie de solveurs avancée, d'AnsysAutodyn et Ansys LS-DYNA, vous permet d'effectuer des simulations de chute, de choc et d'explosion. Ansys AQWA, avec les capacités de simulation offshore présentes dans Mechanical, fournit des capacités spécifiques à l'industrie pour les ingénieurs évoluant dans la conception d'environnements marins [19].

Les applications de l'analyse structurelle sont :

- Analyse de la résistance
 - Vibrations
 - Analyse thermique
 - Durabilité
- Dynamique des corps rigides
 - Hydrodynamique
 - Matériaux composites
 - Impact
 - Optimisation
- Optimisation topologique
 - Fabrication additive

III.4.2. ANSYS 2021 R1 :

Ansys 2020 R1 continue d'intégrer la simulation tout au long des cycles de vie des produits, de l'idéation aux tests virtuels en passant par l'exploitation, avec AnsysMinerva. Cette plateforme de pointe stimule la collaboration au sein des équipes de conception mondiales et augmente le partage de données pour innover dans la conception des produits et réduire les coûts de développement. Ansys 2021 R1 comprend des améliorations à AnsysMechanical pour aider les ingénieurs à concevoir des modèles complexes, fortement non linéaires et extrêmement volumineux. Cette version propose également une chaîne de simulation considérablement simplifiée dans Ansys Fluent, de sorte que même les ingénieurs débutants peuvent exécuter des simulations multi phases complexes avec rapidité et aisance. Les autres versions du portfolio

comprennent de nouveaux outils dynamiques pour Ansys HFSS SBR + et Ansys Maxwell qui améliorent considérablement les processus de conception électronique / électromagnétique.

Aussi, Ansys fournit des produits logiciels gratuits pour les étudiants, parfaits pour le travail effectué en dehors de la salle de classe, comme les devoirs, les projets clés, les concours étudiants et plus encore. Nos produits renouvelables peuvent être téléchargés par des étudiants du monde entier. Les produits Ansys étudiant peuvent être installés sur toute machine MS Windows 64 bits prise en charge. En savoir plus sur Découvrez la vie d'étudiant, Ansys AIM étudiant et Ansys étudiant pour pouvoir les télécharger dès aujourd'hui [19].

III.4.3. ANSYS Mechanical APDL :

Les solveurs par éléments finis Ansys offrent une gamme et une profondeur de capacités inégalées par quiconque dans le monde de la simulation assistée par ordinateur. L'électromagnétisme thermique, structurel, acoustique, piézoélectrique, électrostatique et couplé en circuit n'est qu'un exemple de ce qui peut être simulé. Quel que soit le type de simulation, chaque modèle est représenté par un langage de script puissant... le AnsysParametric Design Language (APDL). APDL est le fondement de toutes les fonctionnalités sophistiquées, dont beaucoup ne sont pas exposées dans l'interface utilisateur de WorkbenchMechanical. Il offre également de nombreuses commodités telles que le paramétrage, les macros, les branchements et les boucles et les opérations mathématiques complexes. Tous ces avantages sont accessibles dans l'interface utilisateur AnsysMechanical APDL.

III.4.4. Analyse MEF par ANSYS Mechanical APDL :

L'ANSYS Mechanical APDL destiné pour l'analyse par éléments finis fournit une introduction pratique à l'analyse technique à l'aide de l'un des programmes à éléments finis à usage général les plus puissants du marché. Les étudiants trouveront une approche pratique et intégrée qui combine la théorie des éléments finis avec les meilleures pratiques pour développer, vérifier, valider et interpréter les résultats des modèles d'éléments finis, tandis que les professionnels de l'ingénierie apprécieront la compréhension approfondie présentée sur la structure et le comportement du programme. Les sujets supplémentaires couverts incluent une introduction aux commandes, aux fichiers d'entrée, au traitement par lots et à d'autres fonctionnalités avancées d'ANSYS.

Pour naviguer confortablement dans l'interface utilisateur Mechanical APDL et appliquez un flux de travail éprouvé pour créer, résoudre et post-traiter des modèles d'éléments finis 2D et

3D. Les avantages d'utiliser le produit APDL par apport ou autre produit come Workbench sont les suivant :

- Importez et / ou créez une géométrie selon les besoins pour la création de leur modèle de simulation.
- Utilisez la logique de sélection pour opérer efficacement sur les sous-régions d'un modèle pour le maillage, le chargement et le post-traitement.
- Comprendre le concept d'attributs d'élément et l'appliquer à la création de maillages efficaces et efficients à l'aide de poutres, de coques et d'éléments solides.
- Créez des interactions complexes entre les régions du modèle grâce au contact, au couplage, aux équations de contrainte et aux interfaces boulon / joint.
 - Mettre en œuvre des solutions de champ couplé en utilisant des éléments d'écoulement de fluide 1-D et des éléments solides 2-D et 3-D.

En conclusion et dans le but de modélisé d'un élément structural nous avons choisi la méthode des éléments finis MEF qui est un outil de résolution numérique approchée des problèmes de structures, des problèmes physiques et mécanique régis par des équations différentielles. En général, un logiciel d'analyse se compose de trois modules fondamentaux : préprocesseur, calcul et post-processeur ; qui se résume à l'ANSYS 2021 R1 version Académique pris en considération lors de notre étude.



CHAPITRE IV :
ANALYSE NUMERIQUE ET CAS
D'ETUDE



CHAPITRE IV : ANALYSE NUMERIQUE ET CAS D'ETUDE

IV.1. Principe de l'analyse numérique :

IV.1.1. Objectif du travail :

Notre travail d'analyse numérique par la méthode des éléments finis (MEF), avec le logiciel ANSYS, consiste à prendre un cas d'étude réel de pont en forme de cadre en béton armé, implanté sur un oued (Figure 33). Les phases de cette modélisation, qu'on va prendre celle d'analyse modale, a pour objectif, la détermination des fréquences propres de vibrations ; ainsi que leurs modes au nombre de six. On a pris un modèle qui sera implanté dans le logiciel "Ansys", en pré-processing, consistant tout d'abord à dessiner le modèle en 3D, puis introduire les caractéristiques mécaniques (module de Young, coefficient de Poisson, la contrainte limite), et mode de comportement des éléments : béton, aciers et composites [13].



Figure 33 : Eléments du dalot lors de sa pose

IV.1.2. Principe de modélisation :

Afin de choisir un modèle mathématique capable d'être accepté par le logiciel "Ansys APDL version 21R", un schéma de modélisation a été choisi sur la base des hypothèses recueillies du plan d'ensemble de l'ouvrage élaboré par le BET de l'Entreprise ENGOA au profit du maître de l'ouvrage la Direction des Travaux Publics de la Wilaya de Blida (Figure 34).

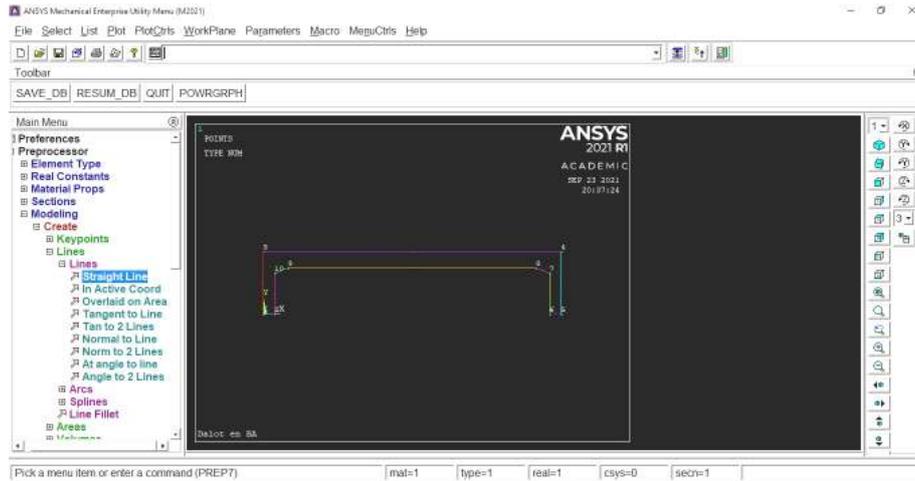


Figure 34 : Modèle choisi du pont cadre étudié

IV.2. Cas d'étude du pont cadre :

IV.2.1. Description :

Il s'agit du pont cadre en béton armé, en forme de dalot, se trouvant dans la Wilaya de Blida, sur passage de la route nationale RN61 au PK 6+350. Il s'agit du dalot en préfabriqué, avec radier comme fondation en béton armé coulée sur place. L'ouvrage est composé de deux voiles, surmontés d'une dalle en béton armé, posée sur deux corbeaux en formes trapézoïdales. Le but principale de cette étude est de prédire le comportement dynamique de pont cadre en déterminant les modes de vibration et les fréquences propres. Mais comme l'ouvrage se trouve dans la Wilaya de Blida caractérisée par une forte sismicité (Zone III.B) [14], le maître de l'ouvrage a demandé de prévoir un renforcement additif pour éviter toute surprise, quant à la déformation ou la ruine de l'ouvrage. C'est pour cette raison, qu'on a proposé un renforcement de la dalle, dans sa partie tendue, par un collage à l'aide des matériaux composites CFRP [11].

IV.2.2. Etapes de la modélisation :

Comme indiqué dans le chapitre précédent, la modélisation passe par plusieurs étapes, afin d'avoir une convergence de la solution (modèle) adoptée et ainsi pouvoir obtenir les résultats de l'analyse demandée (post-processing).

Dans ce qui suit les étapes de modélisation du pont cadre (dalot) par la méthode des éléments finis, par le biais du logiciel "Ansys 2021". L'ouvrage a été modélisé en prenant en compte les matériaux porteurs (béton, aciers HA, aciers doux et composites CFRP).

IV.2.2.1. Introduction des données et modèle :

- File
 - Change jobname: enter new jobname → Essai 01 → OK
 - Change title: enter new title → Dalloten BA → OK

1. Preference: → structural → OK

2. Preprocessor:

A.Element type:

Dans Add/edit/delete

On choisit:

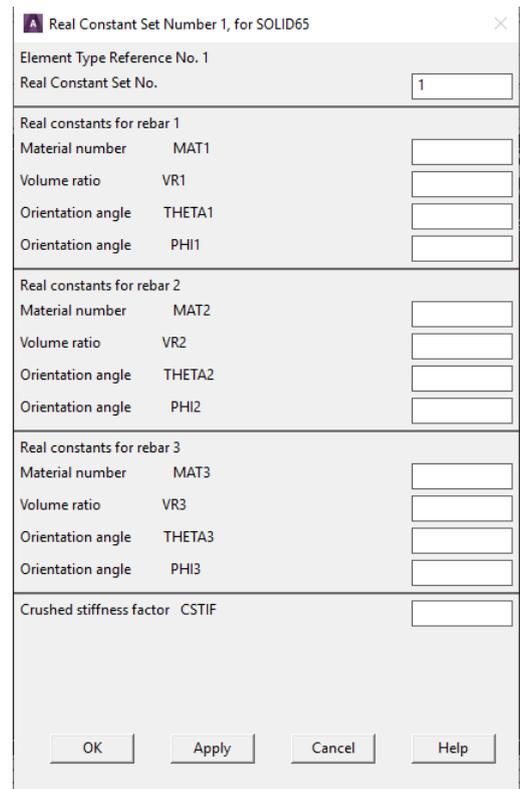
Solid65 pour le béton

Shell181 pour le composite

3. Real constants:

Dans Add/edit/delete

Pour le béton:



Nothing for the composites.

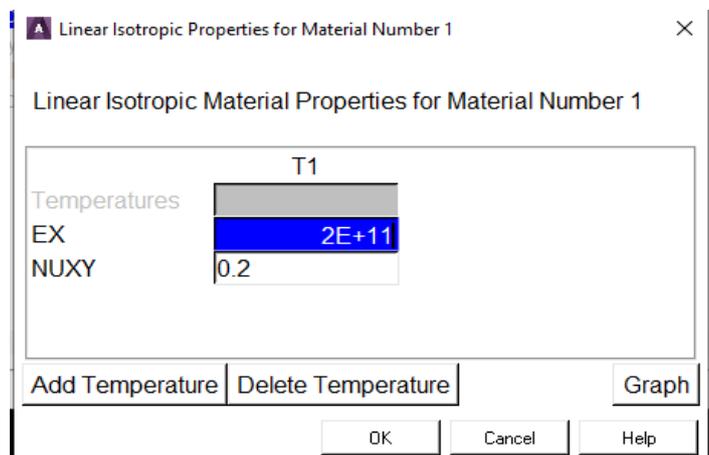
IV.2.2.2. Choix des propriétés mécaniques des matériaux :

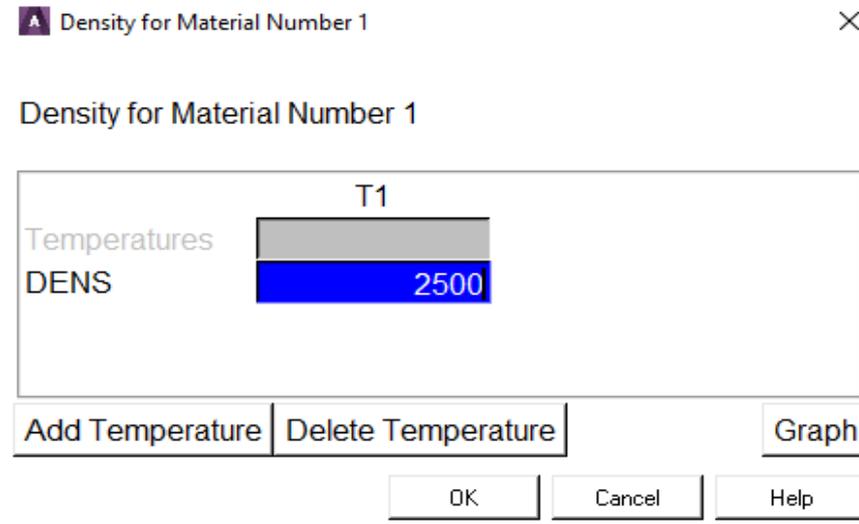
4. Materialprops:

→ Materialmodels:

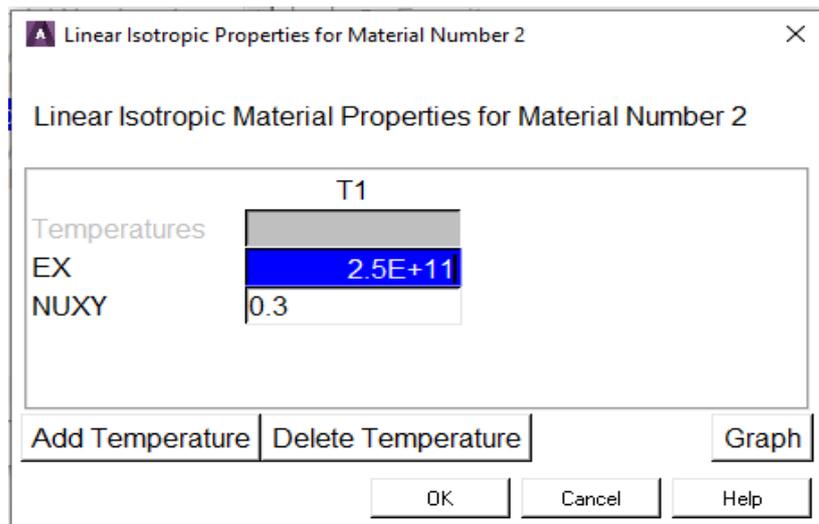
N01: pour le béton → structural →

linear → elastic → isotropic

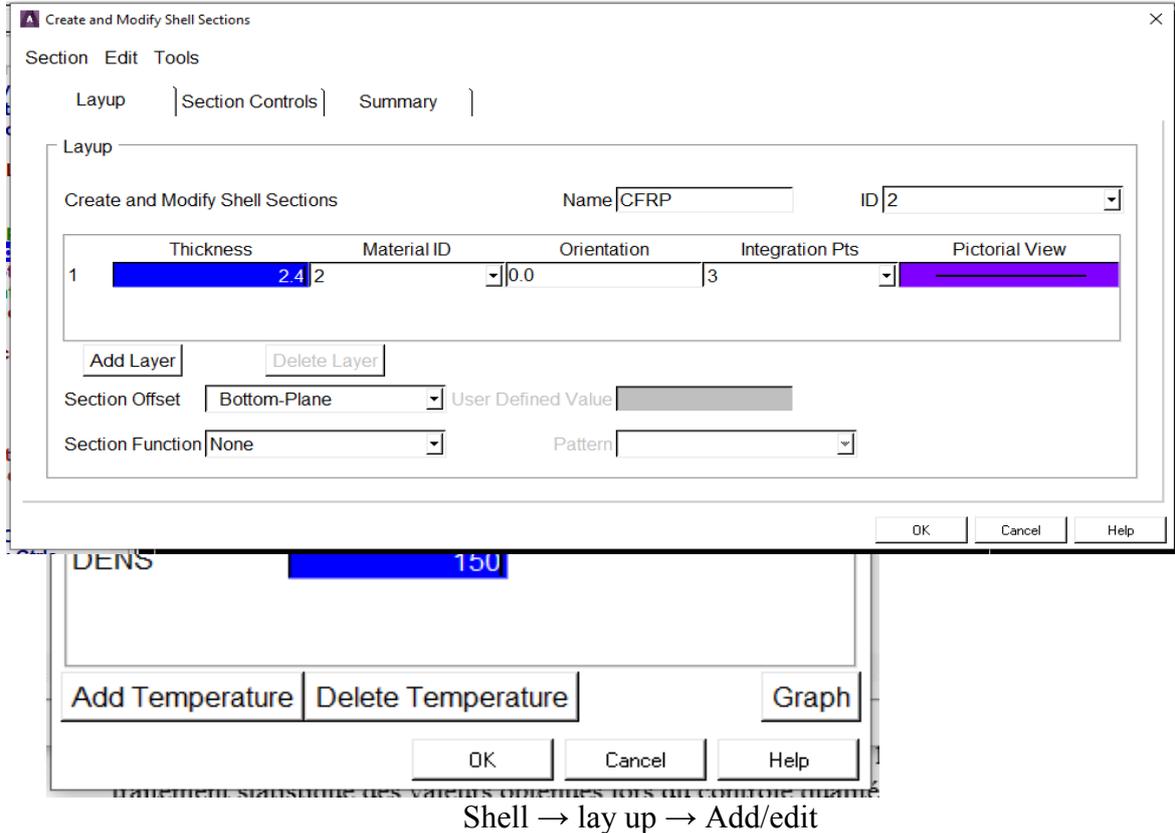




N02: Pour le CFRP:



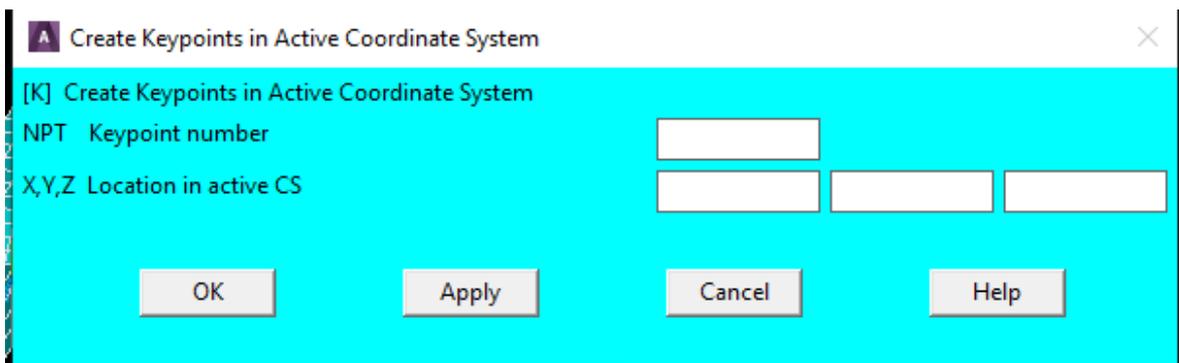
5. Sections:



IV.2.2.3. Discrétisation et lancement du calcul :

6. Modeling:

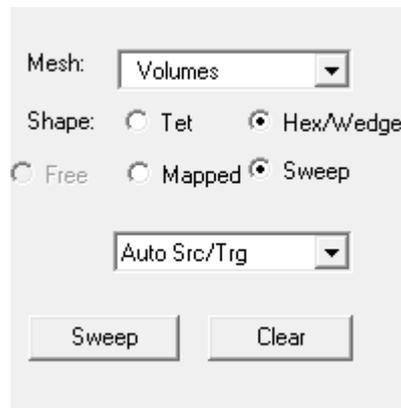
Create → Keypoints → In active CS→



Entrez les coordonnées: (en mm)	
1(0, 0)	2(400.0)
3(0, 2300)	4(10800, 2300)
5(10800, 0)	6(10400, 0)
7(10400, 1500)	8(9900, 1700)
9(900, 1700)	10(400, 1500)

7. Meshing:

MeshTool



IV.3. Modélisation par analyse modale :

Dans cette étude deux différents modèles ont été créés afin d'étudier le comportement d'un Pont cadre en béton armé renforcé avec composites CFRP. Il s'agit :

- a) Modélisation de pont sans renforcement.
- b) Modélisation de pont par matériaux composites traditionnels SikaCarbodur.

La modélisation et la simulation des éléments en béton renforcé par composites est exécutée dans le code commercial d'analyse par éléments finis ANSYS. Pour développer un modèle d'analyse par éléments finis un processus typique d'analyse est suivi. Tous les paramètres qui sont exigés pour exécuter l'analyse sont définis. En premier lieu la géométrie et les propriétés des matériaux constituant les modèles sont définis. Puis on procède à un maillage du modèle. Ensuite, les conditions aux limites pour chaque modèle sont définies et finalement le modèle est soumis au type d'analyse approprié.

IV.3.1. Géométrie des éléments de l'ouvrage :

La structure du pont cadre en béton armé, avec sa configuration géométrique a les caractéristiques géométriques suivantes :

- ❖ Longueur totale tablier : 10.8m
- ❖ Nombre de voiles poutres sous chaussée : 02 de hauteur 2.30m
- ❖ Dalle en BA qui surmonte les deux voiles : Epaisseur : 25cm en BA
 - ❖ Largeur totale du pont : 2 m
 - ❖ Fondation: Radier en béton armé

IV.3.2. Description de la modélisation :

IV.3.2.1. Propriétés des matériaux :

IV.3.2.1.1. Béton armé :

L'élément "Solide 65" est utilisé pour modéliser le béton armé dans ANSYS. Cet élément ayant huit nœuds, et chaque nœud contient trois degrés de liberté, des translations dans les trois directions nodales (Figure36). L'élément est capable de subir une déformation plastique et de se fissurer dans les trois directions [15].

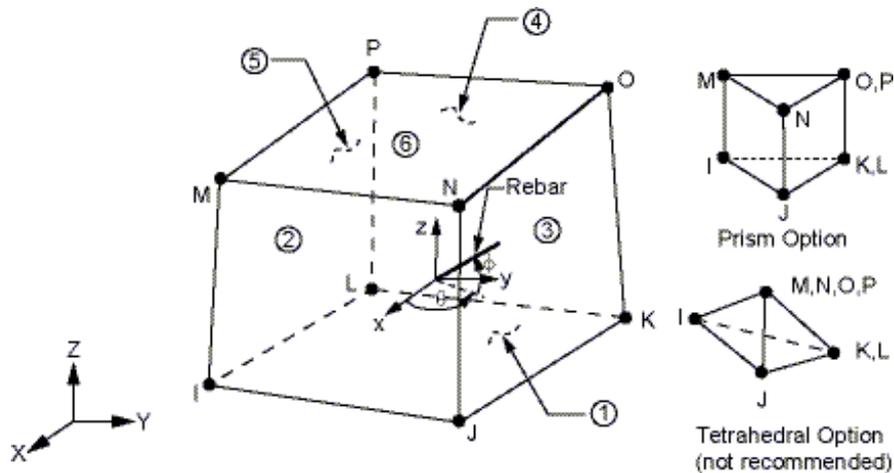


Figure 35 : Schéma du Solid 65 à 3D [15].

Les analyses modales sous ANSYS demandent la connaissance des propriétés thermomécaniques suivantes des matériaux:

- Module d'élasticité (E_c)
- Coefficient de poisson (ν)

- Densité (ρ)

Pour les deux modèles (modélisation de pont sans renforcement et modélisation de pont par matériaux composites CFRP), les propriétés du béton sont identiques et sont les suivantes :

Tableau 4 : Propriétés du béton armé

Module d'élasticité (E_c)	20000Mpa
Coefficient de poisson (ν)	0.2
Densité (ρ)	2500 Kg/m ³

IV.3.2.1.2. Composites :

L'élément "Solid 185", est un élément solide utilisé pour modéliser le comportement des matériaux composites. L'élément peut avoir plusieurs couches pour différentes orientations avec ses propriétés ortho-tropiques dans chaque couche, trois degrés de libertés pour chaque nœud et un déplacement pour chacune des trois directions [15].

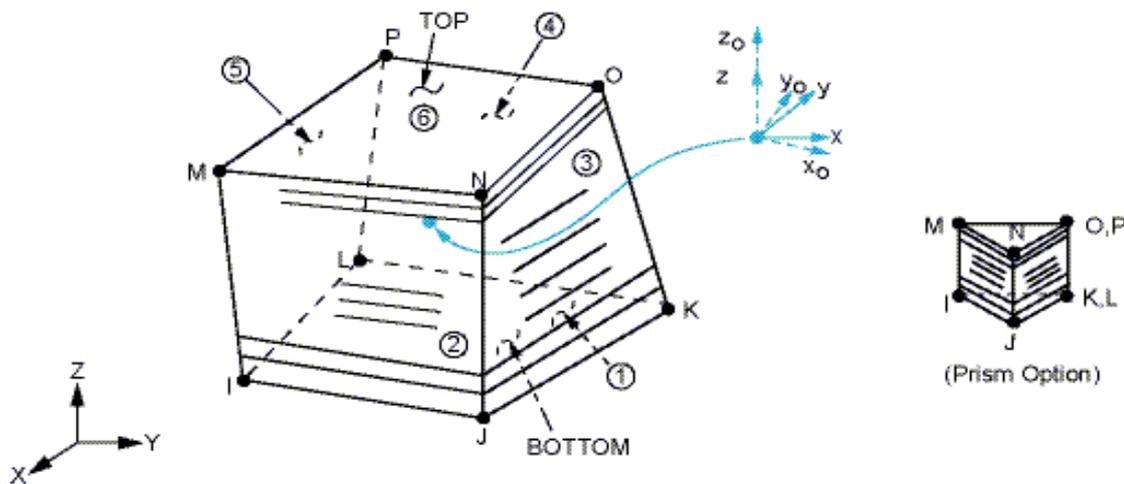


Figure 36 : Solid 185 à 3D [15]

Pour les deux modèles (modélisation de pont par matériaux composites traditionnels et modélisation de pont par nano composites) les propriétés des renforts sont identique mais la différence est dans la résine époxydique comme suite :

IV.3.2.1.3. Renforcement par lamelle CFRP :

Le renforcement en flexion d'éléments d'ouvrages par PRFC est réalisé en collant des lamelles SikaCarboDur en surface des zones tendues du béton armé [16], c'est pour ça dans notre

cas nous utilisant lamelle SikaCarboDur aux dessous du les quatre poutres de pont. Dans notre cas, on prendra les lamelles SikaCarboDur sont des PRFC (Polymères Renforcés de Fibres de Carbone) fabriqués selon le procédé de pultrusion en usine. Contrairement aux tissus que l'on imprègne sur chantier, les conditions de fabrication des lamelles sont strictement contrôlées ce qui permet de garantir les caractéristiques du renfort PRFC. Contrôle de production : chaque lot de produits finis (env. 3000 m) est contrôlé en ce qui concerne le module d'élasticité, la résistance en traction, l'allongement à rupture. La largeur et l'épaisseur des lamelles sont contrôlées sur chaque rouleau de 250 m [16].

Les caractéristiques utilisées dans les dimensionnements des lamelles sont basées sur le traitement statistique des valeurs obtenues lors du contrôle qualité permanent assuré en usine.

Tableau 5 : Propriétés de CarboDur S1512

Module d'élasticité (E_c)	25000Mpa
Coefficient de poisson (ν)	0.3
Densité (ρ)	150 Kg/m ³

Pour la colle époxydique Sikadur-30, qui est une colle époxydique à deux composants A et B sans solvant, thixotrope, de couleur gris clair, utilisée pour le collage des lamelles SikaCarboDur [16], Les propriétés de la colle époxydique Sikadur-30 pour le cas de la modélisation de pont par matériaux composites traditionnels sont les suivantes (Tableau 6).

Tableau 6 : Propriétés de la résine Sikadur-30

Module d'élasticité (E_c)	9600Mpa
Coefficient de poisson (ν)	0.4
Densité (ρ)	1650 Kg/m ³

IV.3.2.2. Maillage :

Le maillage est une méthode pour diviser l'élément en question en particules élémentaires ayant les mêmes propriétés et examiner chaque particule séparément, l'assemblage des particules élémentaires nous ramène à l'élément initial. Dans ce modèle on a utilisé pour le maillage (discrétisation de l'élément), le "MeshTool" a été choisi dans l'étape de création des mailles (éléments finis) qui n'est pas un part à la solution.

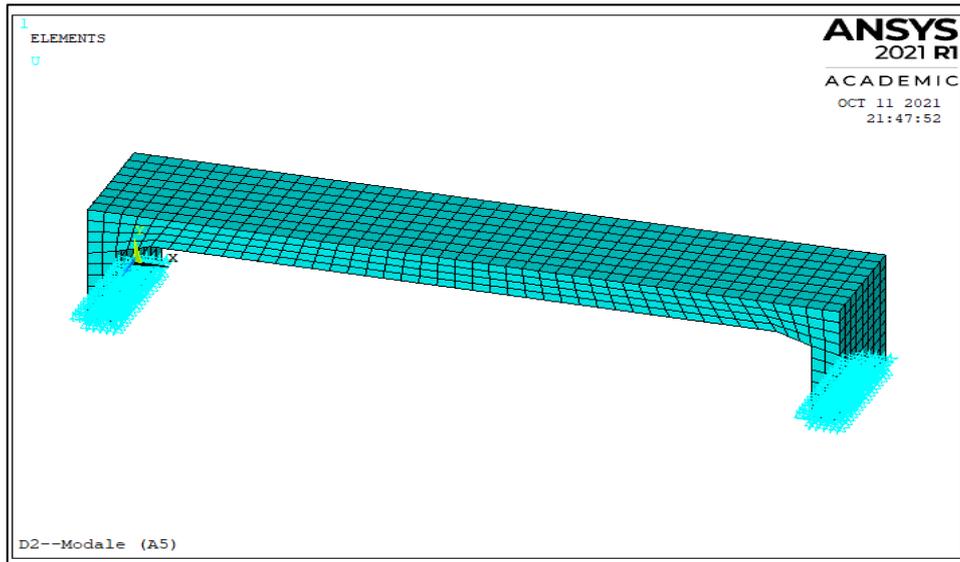


Figure 37 : Maillage de modèle du pont

On a procédé de former un maillage sur certaines lignes choisies (longueur, largeur et hauteur) de pont et gérer ainsi la densité du maillage dans les différentes régions de l'ouvrage. Pour l'élément solid65, la maille a été mise en place pour la création d'éléments rectangulaires.

Les divisions choisies des lignes sont notés et le modèle adopté a été maillé en utilisant des éléments en ligne afin que les nœuds des éléments en ligne soient exactement sur le nœud des éléments (Figure IV.5). Le modèle produit a été maillé en utilisant des éléments cubiques de 250 mm de côté. Le maillage aide à augmenter la précision des calculs en commandant le nombre d'éléments.

IV.3.2.3. Conditions aux limites :

Dans ce modélisation nous avons l'axe x du système des coordonnées coïncide avec l'axe longitudinal du pont et l'axe y coïncide avec le verticale de pont et l'axe z représente l'axe transversal de pont étudié. Les conditions aux limites choisies pour les deux cas de modélisations de ponts (modélisation de pont sans renforcement et modélisation de pont par matériaux composites CFRP, sont identiques et présentent des encastremets aux niveaux des fondations dans laquelle les déplacements été bloqué suivant la direction (Oy). Les dimensions et

les distances aux bords de lamelle et le tissu avec leurs résines époxydiques doit modélisés selon les prescriptions de mise en œuvre particulières au procédé SikaCarboDur et SikaWrap mentionner dans le document technique fourni par la société Sika et agréés par Commission chargée de formuler des Avis Techniques et Documents Techniques d'Application [16].

IV.3.2.4. Pose de la lamelle SikaCarboDur :

On procédera aux étapes suivantes pour la pose des lamelles SikaCarbodur à la partie inférieure de la dalle (Figure 38). En effet :

- a) On applique la colle Sikadur-30 par double encollage : une couche sur le support béton (1mm environ) et une couche sur la lamelle SikaCarboDur (1 à 1,5 mm) .

- b) On respecte la distance aux bords : sur les bords de poutre à renforcer, il faut respecter une distance entre la lamelle et l'arête de la poutre. La lamelle doit être positionnée à une distance équivalente à au moins l'enrobage des armatures internes du béton armé. Cela évite de renforcer une zone non armée sujette à fissuration.

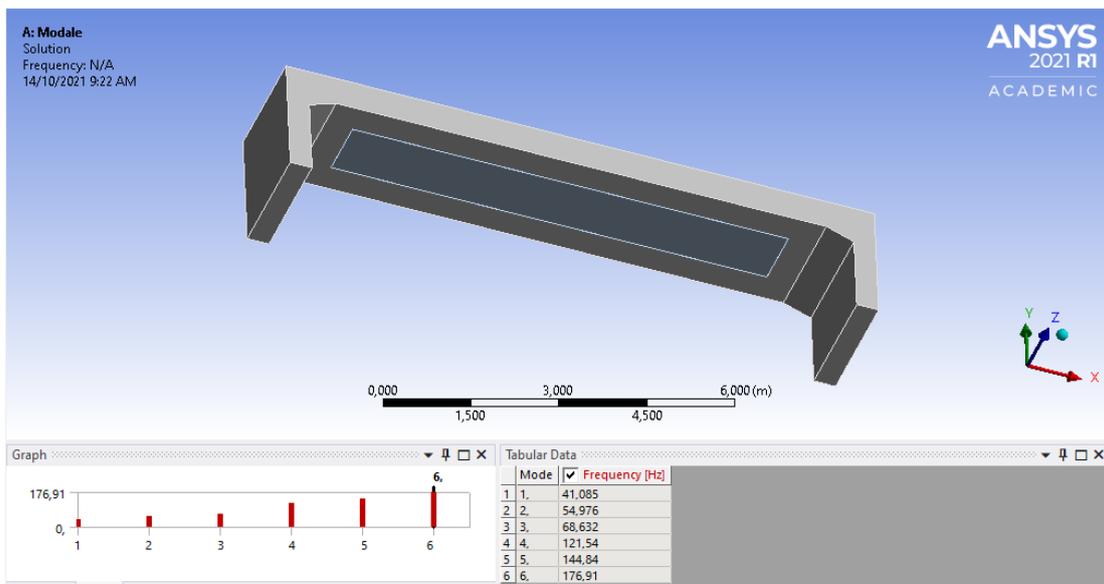
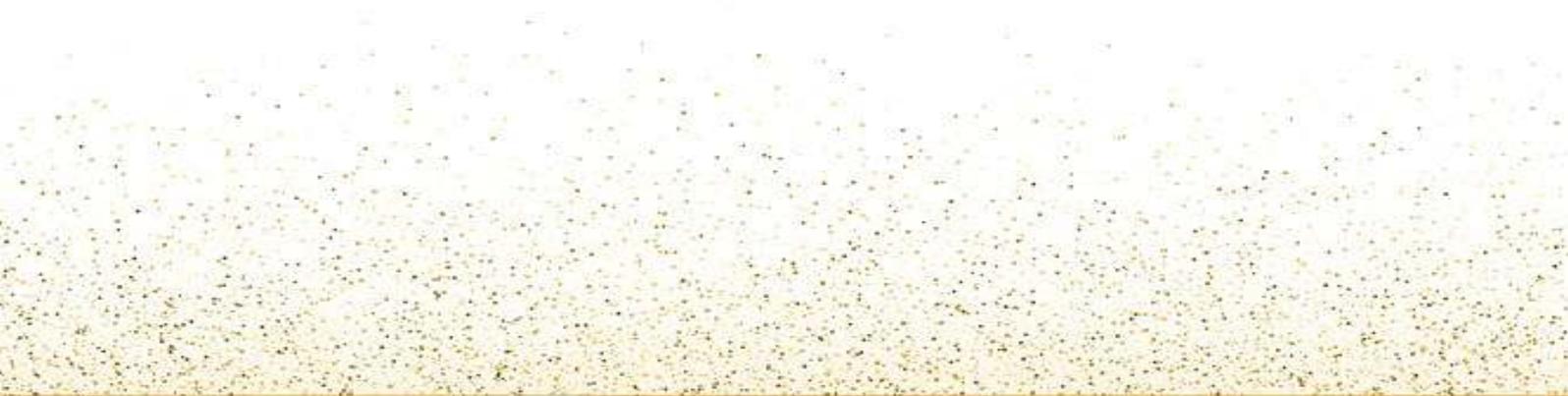


Figure 38 : Emplacement de la lamelle Sika Carbodur



CHAPITRE V :
RESULTATS DE DISCUSSIONS



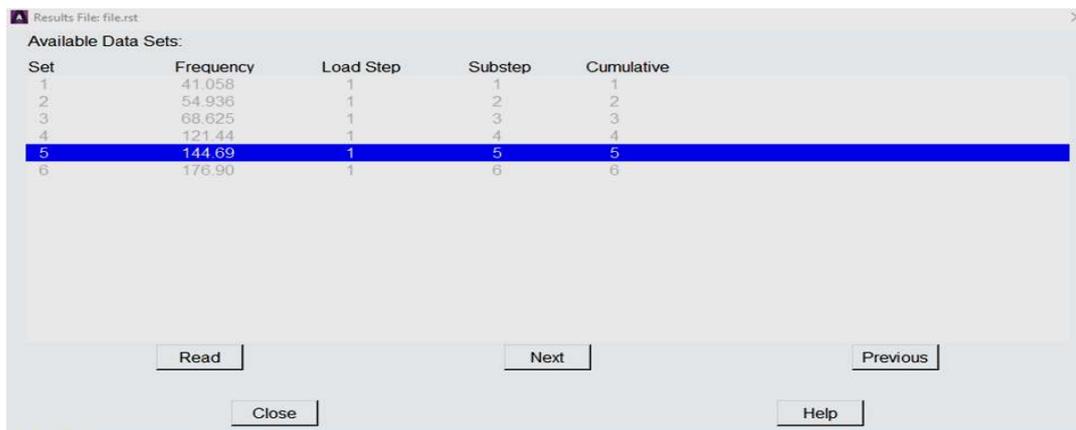
CHAPITRE V : RESULTATS DE DISCUSSIONS

V.1. Préambule :

L'analyse modale du modèle calibré a conduit à l'obtention des paramètres modaux de la structure du pont étudié. Les fréquences modales de l'analyse par la méthode des éléments finis fournies par ANSYS ont données des valeurs qui montrent l'influence des composites colées sur le comportement globale de la structure. Nous présentons les valeurs trouvés, avec commentaires et discussions.

V.2. Modélisation de pont sans renforcement :

Les résultats trouvés de l'analyse modale du pont cadre en béton armé, sans renforcement ont données des fréquences variant entre 41Hz (1er mode) et 177 Hz (6ème mode). Ces valeurs



Set	Frequency	Load Step	Substep	Cumulative
1	41.058	1	1	1
2	54.936	1	2	2
3	68.625	1	3	3
4	121.44	1	4	4
5	144.69	1	5	5
6	176.90	1	6	6

Figure 39 : Ordre des valeurs des fréquences propres

sont significatives, vu la masse non importante de la structure (Figure 39).

Les figures suivantes illustrent les résultats de la modélisation de cette première partie. En effet, les déplacements dans le sens vertical trouvés (Figure 40) sont très négligeables de l'ordre de 8.62 μm , ce qui explique la stabilité de l'ouvrage (encastrement des appuis).

Pour le premier mode de vibration (fléchissement vertical), la valeur de la fréquence est de 41.06 Hz, avec concentration des contraintes à mi travée (dues au poids propre de l'ouvrage) (Figure V.3).

Pour le premier mode de vibration (fléchissement vertical), la valeur de la fréquence est de 41.06 Hz, avec concentration des contraintes à mi travée (dues au poids propre de l'ouvrage) (Figure V.3).

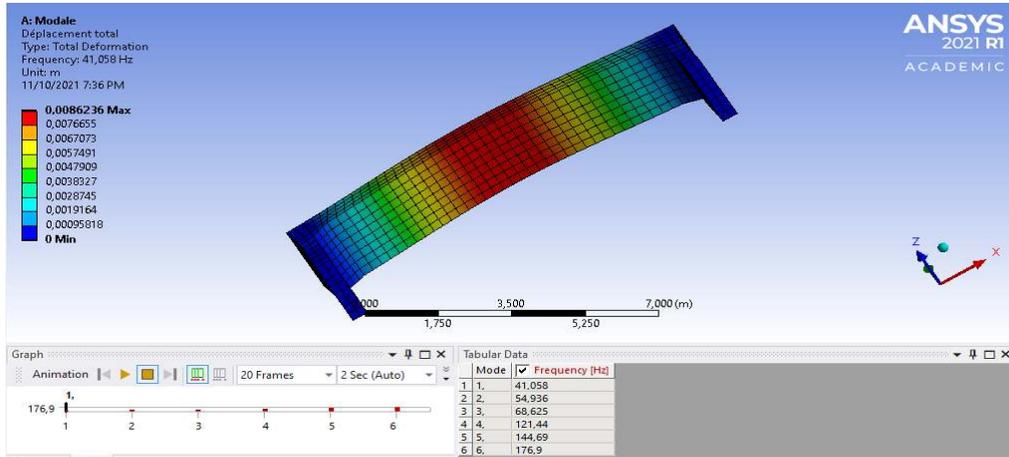


Figure 40 : Valeurs de déplacement de l'ouvrage cadre

Pour le premier mode de vibration (fléchissement vertical), la valeur de la fréquence est de 41.06 Hz, avec concentration des contraintes à mi travée (dues au poids propre de l'ouvrage) (Figure 41).

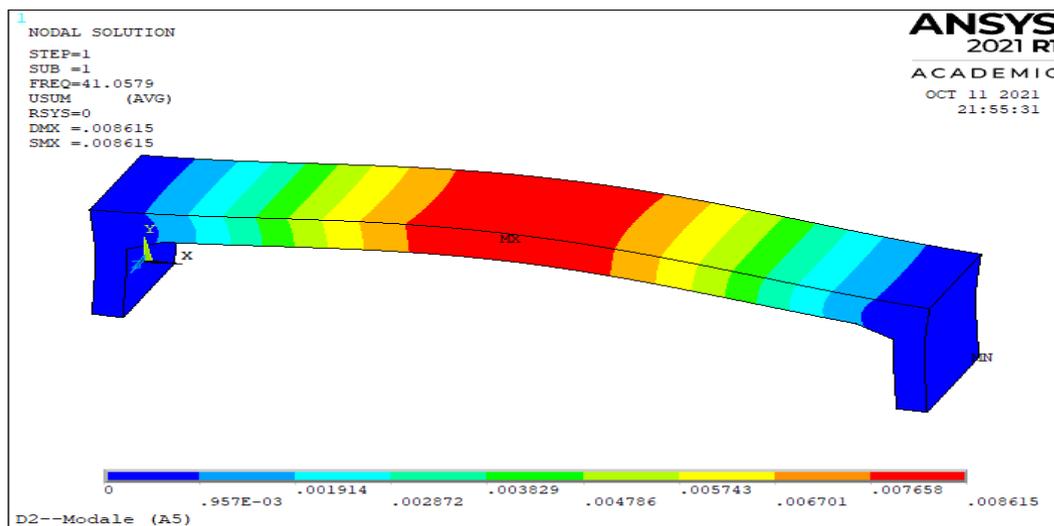


Figure 41 : Mode 1 de vibration propre

Pour le deuxième mode de vibration (Déplacement longitudinal), la valeur de la fréquence est de 53.94 Hz, avec concentration des contraintes aux extrémités des appuis (dues à l'influence des nœuds dalle-voiles) (Figure 42).

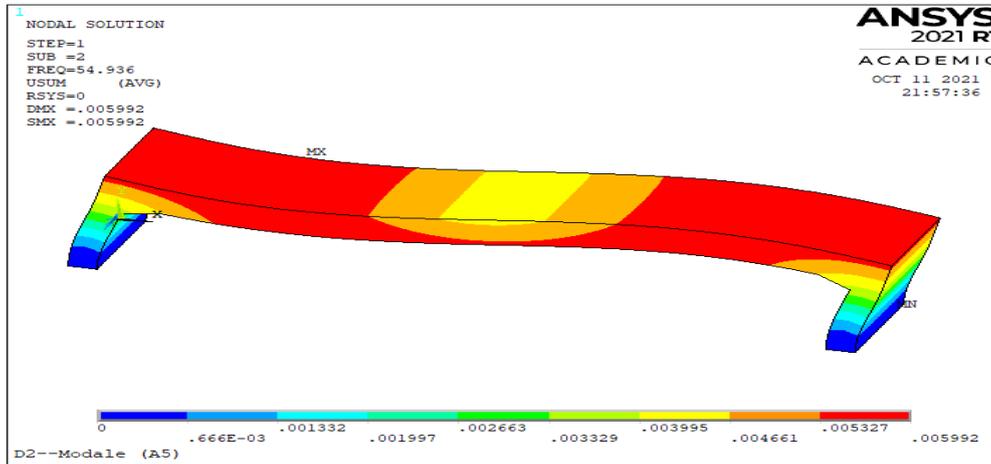


Figure 42 : 2ème mode de vibration du pont

Concernant le troisième mode de vibration (Légère torsion), la valeur de la fréquence est de 69.63 Hz, avec concentration des contraintes au milieu de la dalle (Figure 43).

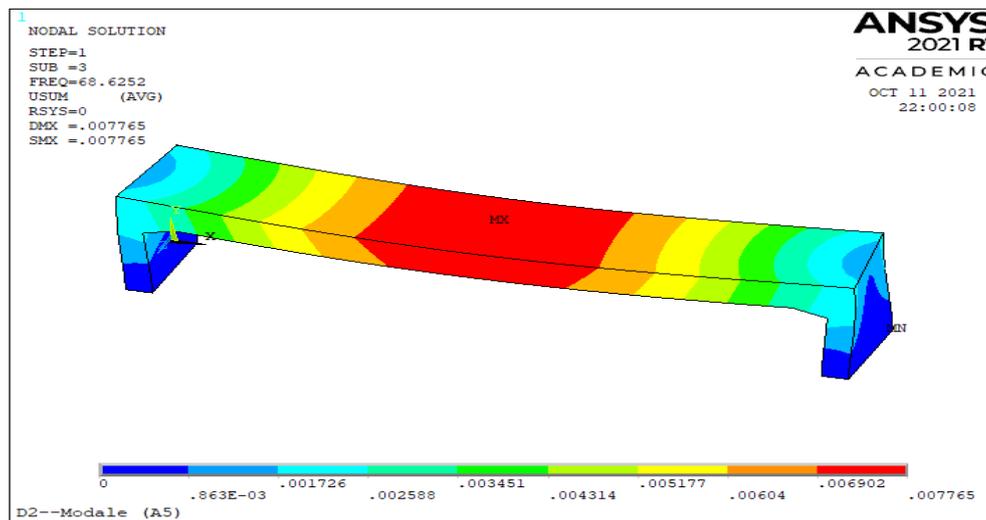


Figure 43 : 3ème mode de vibration du pont

Pour les 4ème, 5ème et 6ème modes, respectivement on a des valeurs de fréquences de 141.43 Hz, 144.69 Hz et 176.90 Hz (Figures 44, 45 et 46).

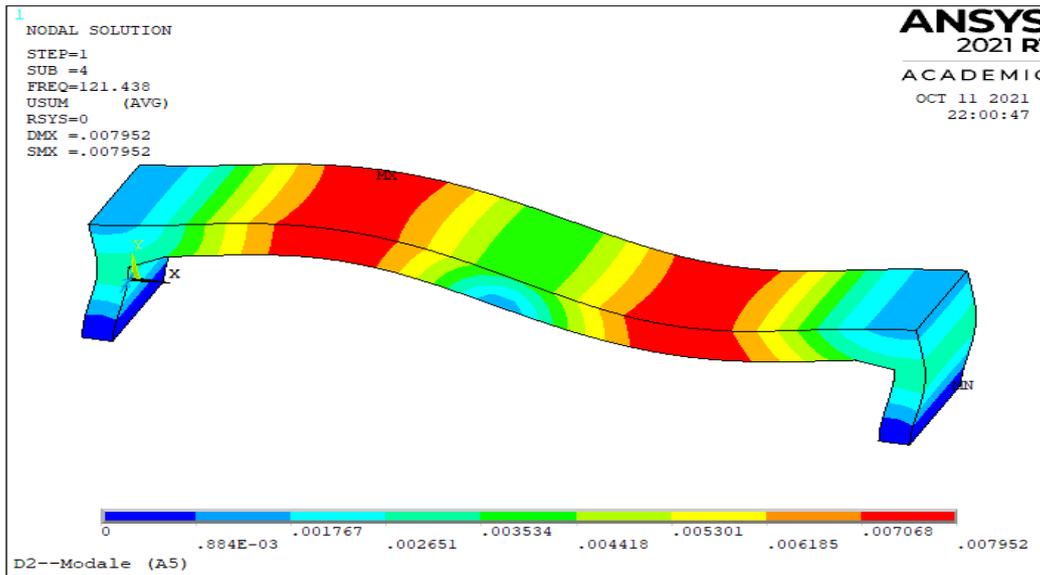


Figure 44 : Double fléchissement (mode 4)

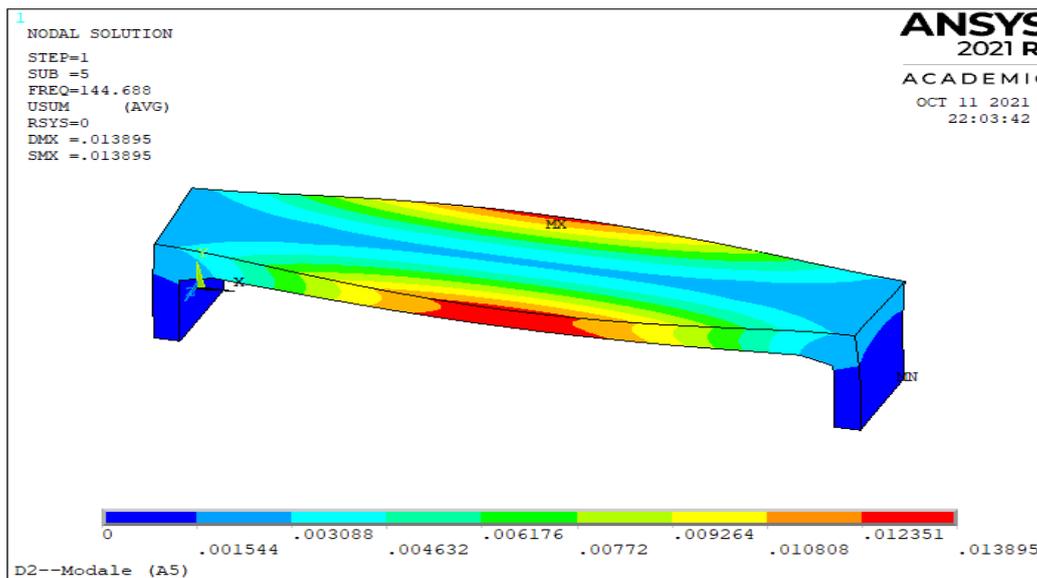


Figure 45 : Mode 5- Déplacement latéral transversal de l'ouvrage

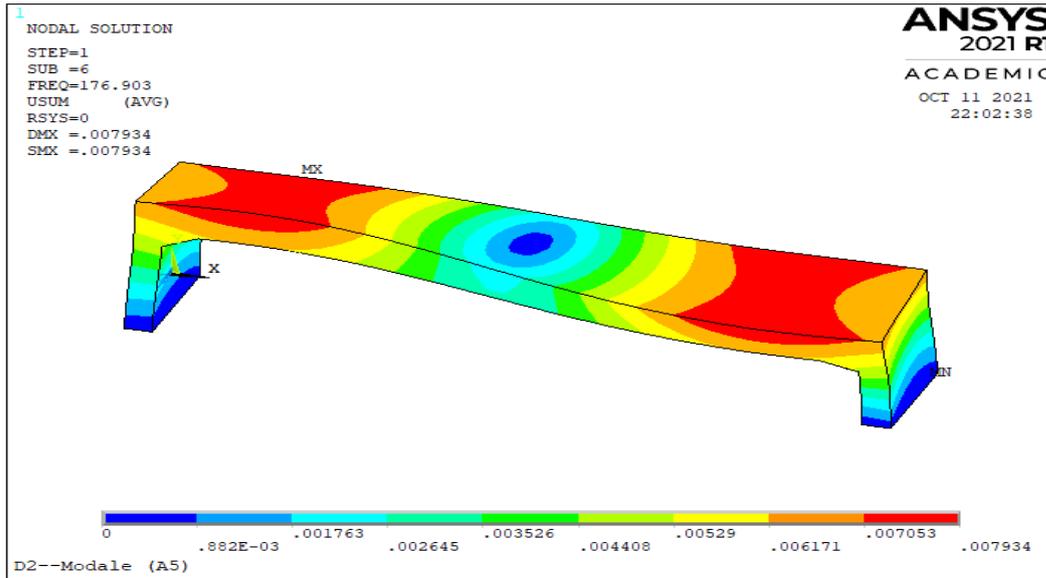


Figure 46 : Mode 6- Torsion de l'ouvrage

V.3. Modélisation de pont avec renforcement :

Les résultats de l'analyse modale de l'ouvrage après avoir renforcé la dalle par des lamelles SikaCarbodur, à sa partie inférieure, ont donné des modes de vibration identiques à celle du pont sans renforcement. Cependant, les fréquences diffèrent par excès. Avec la prise en charge d'un module de Young du CFRP équivaut à 250 000 MPa (Figure 47).

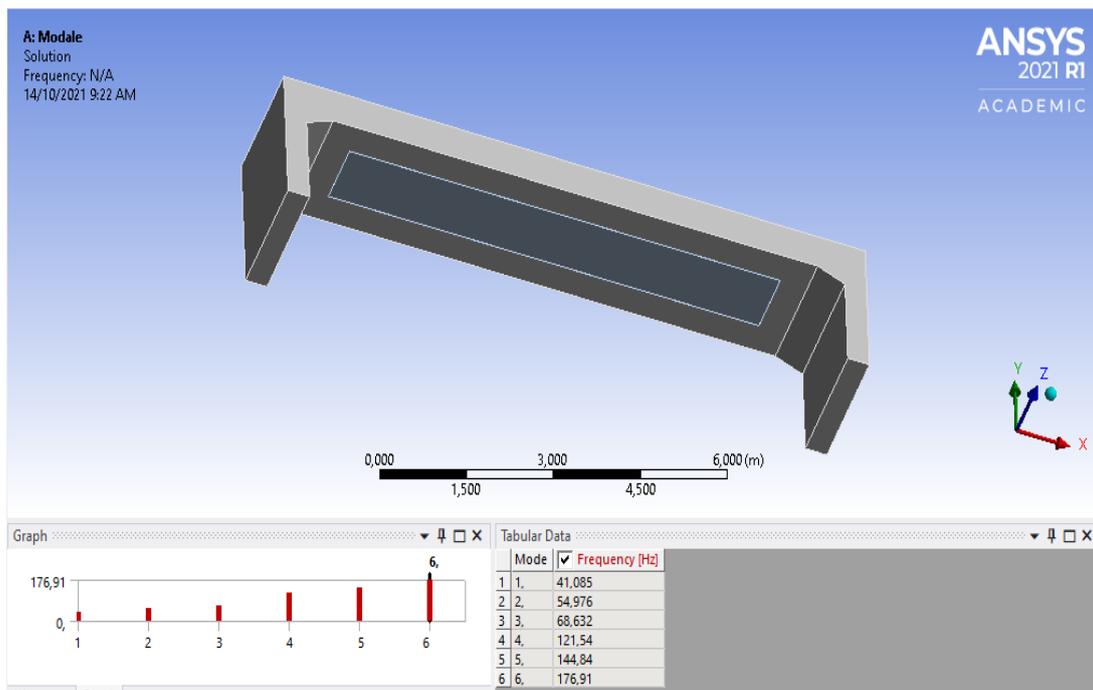


Figure 47 : Renforcement de la dalle du pont dalot

Les figures de 46 à V14, illustrent les modes de vibration de l'ouvrage testé, ainsi que les valeurs des fréquences trouvés.

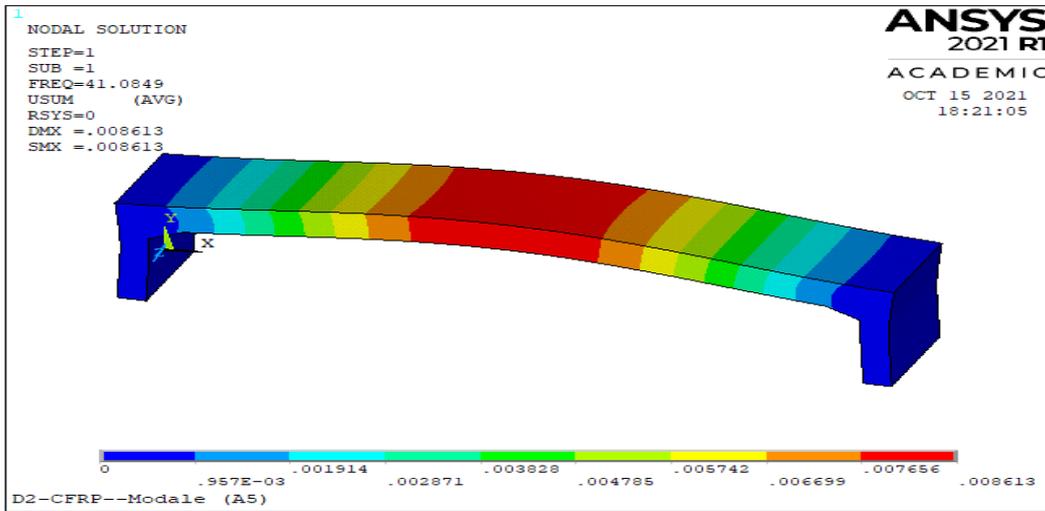


Figure 49 : Fléchissement simple (mode1)

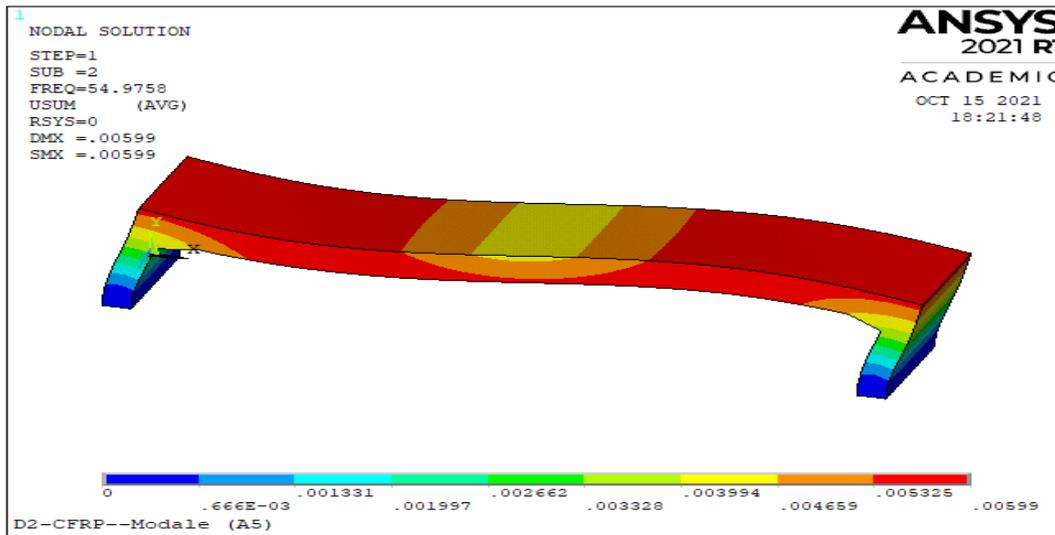


Figure 48 : 2ème mode de vibration (Déplacement longitudinal)

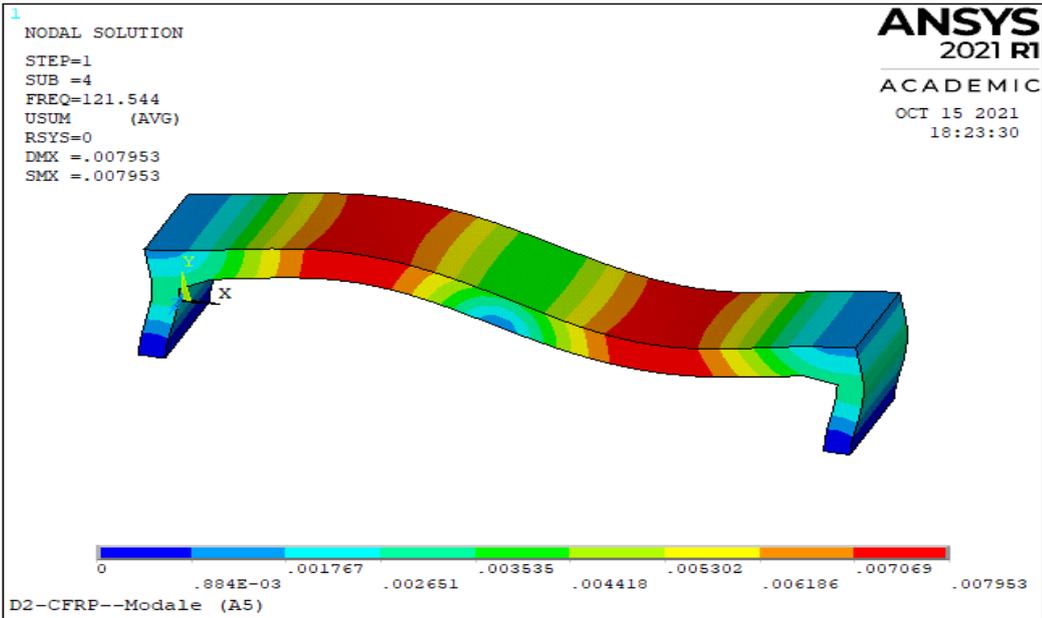


Figure 50 : 4ème mode de vibration (Double fléchissement)

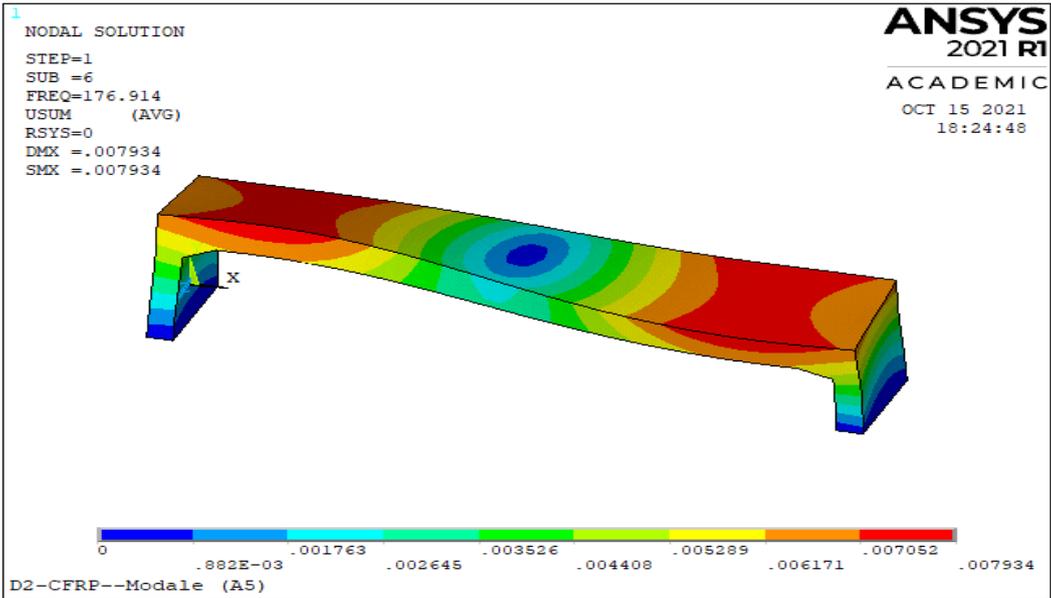


Figure 51 : Mode 5- Déplacement latéral transversal

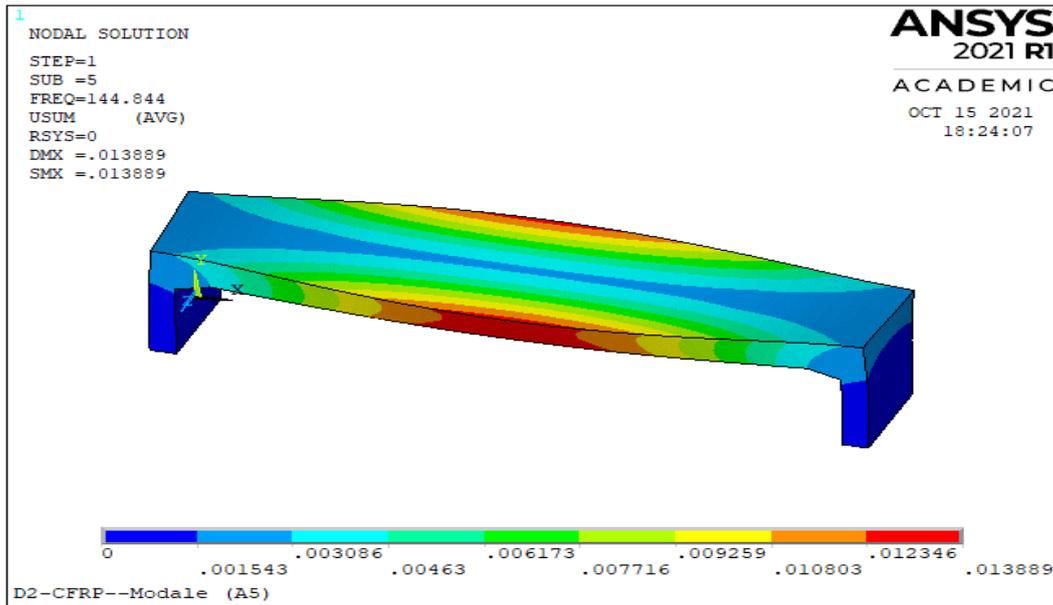


Figure 52 : Mode 6- Mode de torsion

V.4. Comparaison et commentaires :

Le tableau 7 présente une comparaison des valeurs numériques des fréquences et des modes de vibration, obtenues par la modélisation en élément finis de pont avec les deux cas de simulation étudiés (modélisation de pont sans renforcement et modélisation de pont par matériaux composites CFRP).

Les valeurs trouvées, montrent l'influence du composite collé sur le comportement dynamique de l'ouvrage. Malgré le gain très minime, de l'ordre de 1.5 % en moyenne, qui est du éventuellement au choix de l'emplacement et à l'épaisseur du composite qui est petit (discussion sur le nombre de couches), le renforcement des structures en béton armé et en particulier les ouvrages d'art demeure très bénéfique.

Tableau 7 : Tableau comparatif des fréquences et modes de vibration des deux cas étudiés

N°	Fréquence avant renforcement	Fréquence après renforcement	Ecart	Mode de vibration
01	41.06	41.086	0.63%	Déplacement horizontal
02	53.94	54.97	1.92%	Déplacement longitudinal
03	69.63	69.83	0.29%	Légère torsion
04	141.43	141.54	0.078%	Double fléchissement
05	144.69	144.84	0.105%	Déplacement latéral
06	176.90	176.93	0.017%	Torsion



Conclusion Générale



Conclusion Générale

Les composites à base de fibres de carbone sont des produits utilisés pour le renforcement et/ ou la réparation des structures élevées (bâtiments, ponts, tunnels, ect...). Depuis plus de trente ans d'utilisation de ces produits, très efficaces, ont montré des performances très élevées.

Par le biais de ce travail, on a essayé de comprendre la technique des matériaux composites CFRP et montrer son efficacité dans la réduction des périodes (augmentation des fréquences) de vibration en faisant une analyse modale avec le logiciel ANSYS 2021, par application de la MEF. En effectuant une comparaison des résultats de cette modélisation, avant et après renforcement de la dalle du pont cadre (dalot), on a constaté ce qui suit :

- Un patrimoine important, d'ouvrages en béton, nécessite une attention particulière et un choix adéquat de moyens de renforcement de ses éléments porteurs (poutres, entretoises, dalles).
- La modélisation numérique par application d'un logiciel professionnel (ANSYS 2021), qui est amplement utilisé universellement, a permis de choisir un modèle numérique proche de la réalité et qui a donné une lecture approfondie des résultats.
- Il est possible d'appliquer la technique de renforcement des composites collés, sur les éléments porteurs ire son comportement dans le temps d'un pont dalot en béton armé pour prédire son comportement dynamique dans le temps.
- Le renforcement en traction (flexion) donne un effet de gain avoisinant les 1.5 %, de la fréquence de vibration.
- L'application de la technique composite, comme solution innovante donne un gain appréciable, à sa portance et à la stabilité de l'ouvrage

Nous recommandons, pour les futurs travaux, de faire un travail expérimentale et prendre ces composite, en prenant des cas de grandeur réelle (in situ) ou réduites (au laboratoire), afin de caler le modèle choisi dans la modélisation numérique.



Références bibliographiques



Références bibliographiques

- [1] **Calgaro J.A. et Lacroix R.** (1999), Pathologie et évaluation des ponts existants, Vol. C4, Techniques de l'Ingénieur, Paris, France.
- [2] **Boularouk Ch.** (2015), Analyse numérique du comportement des structures renforcées par matériaux composites, mémoire de fin d'études, Ecole Nationale Polytechniques, El Harrach, Alger.
- [3] **Misistère des Travaux Publics, Direction des Routes et oivrages d'art** (2020), Rapport statistiques des ponts en Algérie, 240 pages, Alger, Algérie.
- [4] **Abdessemed M., Kenai S., Attar A. and Kibboua A.** (2008), Maintenance and Rehabilitation Program for Algerian Bridges, 11 DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components "Globality and Locality in Durability", Istanbul, Turkey, May 11-14, 2008.
- [5] **Calgaro J.A et Lacroix R.** Maintenance et réparation des ponts. Presse de l'école des ponts et chaussées (1997), P. 666.
- [6] **Guides STRESS « FABEM 6.1 et 6.4 »**, (2011). Réparation et renforcement des maçonneries. Édition du Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement de structures.
- [7] **Lacombe J. M.** (2013). Cours de pathologies des ponts. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat. Lyon-France.
- [8] **Berthelot J.M.** (1992), Matériaux composites, Comportement et analyse des structures, (livre), Edition Masson, Paris, France.
- [9] **Abdessemed M.** (2003), Comportement des poutres isostatiques en béton armé renforcées par tissus de fibres et lamelles de fibres de carbone, Mémoire de Magister, Université de Blida, Algérie.
- [10] **Abdessemed M.** (2011), Etude expérimentale et modélisation du comportement des poutres en béton armé renforcées par des matériaux composites sous flexion cas des ponts, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin 2011.
- [11] **Luyckx J.** (2010), Composites à fibres de carbone dans le génie civil, Tome : Techniques de l'Ingénieur, Edition 2010, France.

- [12] **Chatain M.** (2000), Matériaux composites présentation générale, Techniques de l'ingénieur, Volume AM5, Edition spéciale 2000, France.
- [13] **Van Erp G., Cattell C. and Ayers S.** (2006), A fair dinkum approach to fiber composites in civil engineering (Australia), Elsevier, Construction and Building Materials N°20, 2006.
- [14] **Abdessemed M., Kenai S. , Bali A. et Kibboua A.,** Dynamic analysis of a bridge repaired by CFRP, Experimental and numerical modelling, Science Direct, Elsevier, Journal "Construction & Building Materials", Volume 25, Issue 3, March 2011, Pages 1270-1276.
- [15] **David E., Djellal Ch. et Buyle-Bodin F.** (1996), Endommagements et réparation des poutres en béton armé à l'aide de matériaux composites, 14ème Rencontre Universitaire de Génie Civil, Clermont Ferrand, 9-10 Mai 1996, France.
- [16] **Dlubal Software SARL** (2020), Logiciel de calcul des structures, Analyse aux éléments finis (MEF), N° 93464, Tiefenbach, Allemagne.
- [17] **Ministère des Travaux Publics, Direction des Routes** (2008), Guide Parasismique Algérien des Ouvrages d'Art (RPOA 2008), Alger, Algérie.
- [18] **Ansys. Inc south point** (2009), Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications" 2009, 275, Technology Drive, pp.: 671.
- [19] **Avis Technique 3/16-875** (2012), "SikaCarboDurSikaWrap", Annule et remplace l'Avis Technique 3/10-669, (arrêté du 21 mars 2012).