



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique

جامعة سعد دحلب-البليدة-1-

Université de Saad Dahleb Blida -1-

كلية التكنولوجيا- دائرة الهندسة المدنية

Faculté de Technologie-Département de génie civil

Mémoire de Master 2 Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique

# MÉMOIRE DE FIN D'ETUDE

**THÈME RENOVATION D'UN OUVRAGE D'ART  
ROUTIER  
TECHNIQUE ET PERSPECTIFS**

**Réalisé par :**

- FERHAT Amel
- BENAZOUT Serine Fatma Zohra

**Encadre par :Dr  
M.ABDESSEMED**

Année Universitaire 2020/2021

# Sommaire

Dédicaces

Remercîments

Résumé

Table des matières

Liste des figures

Liste des table aux

Introduction Générale.....	1
I.1 Préambule .....	4
I.2 Pathologie des structures de pont : .....	4
I.2.1 Etudes statistiques : .....	4
I.2.2 Dégradation des ouvrages en béton .....	4
I.2.3 Causes des dégradations.....	5
I.3 Méthodes et techniques de réparation .....	7
I.3.1 Introduction .....	7
I.3.2 Principaux techniques de réparation et renforcement .....	7
I.3.2.1 Traitement de surfaces .....	7
I.3.2.2 La protection du béton et des armatures .....	8
I.3.2.3 Régénération des matériaux.....	10
I.3.2.4 L'ajout de forces (ou de déformations).....	10
I.3.2.5 Ajout de matière .....	10
II.1. Définition :.....	20
II.2. Historique.....	20
II.3 Entretien courant .....	20
II.3.1 Entretien spécialisé .....	21
II.3.2 maintenance et rénovation.....	22
II.4 Programmation de la surveillance et des travaux .....	22
II.5Organisation des actions de surveillance :.....	22
II.5.1.Les actions systématiques de surveillance .....	22
II.5.2. Le contrôle périodique :.....	23
II.5.3. Les inspections détaillées périodiques :.....	24
II.5.4. Les actions conditionnelles de surveillance :.....	25
II.6.L'entretien :.....	26

II.6.1.Évacuation des eaux :	26
II.6.2.Chaussée :	26
II.6.2.1.Pont à tablier :	26
II.6.3.Trottoirs, bordures, réseaux, concessionnaires :	27
II.6.4.Corniches :	29
II.6.5.Garde-corps métalliques :	30
II.6.5.Dispositifs de retenue :	32
II.6.6.Joint de chaussée :	32
II.7.LA RÉNOVATION D'UNE CHAPE D'ÉTANCHÉITÉ :	33
II.7.1.La couche de roulement sus-jacente nécessite une reprise sur toute l'épaisseur :	33
II.7.2.Réparation du garde-corps :	34
II.7.2.1.Changement des parties accidentées des barrières :	34
II.7.2.2.Montage :	34
II.7.2.3.Rénovation des profils fermés :	34
II.7.2.4.Rénovation ponctuelle de parties de garde-corps :	34
II.7.3.Rénovation des barrières de sécurité :	35
II.7.3.1.Rénovation des barrières de sécurité en béton :	35
II.7.3.2. Rénovation des barrières de sécurité métalliques :	35
II.7.4.La rénovation des appareils d'appui :	35
II.7.4.1.La rénovation des appareils d'appui et de leur environnement Vérinage :	35
II.8. Élément porteuse a rénové :	36
III.1 Introduction	21
III.2 définitions	21
III.5 Les composites intelligents	25
III.5.1 Les fibres :	25
III.5.2 Les différents types de fibres :	25
III.5.3 Les Matrices	28
III.5.3.1. Les résine :	29
III.5.3.1.1 Différents types de résines	29
III.6 les techniques de mise en œuvre :	33
IV.1. Logiciel de modélisation	21
IV.1.1. Introduction	21
IV.1.2- Présentation du logiciel	21
IV.1.3 Principaux produits et capacités	22
IV. 1.4- Plateformes ou environnements du logiciel	22
IV.1.5. Organisation de logiciel ANSYS :	23

IV.1.6- Ansys Mechanical APDL:.....	23
IV. 1.6.1- Analyses MEF par AnsysMechanical APDL :.....	23
IV.1.6.2- L'avantage de choisir APDL :.....	23
IV.2.Présentation générale de la Méthode des éléments finis.....	23
IV.2.1. Introduction .....	23
IV.2.2. Bref historique .....	24
IV.2.3. Codes de calcul .....	25
IV.2.4. Utilisation de la MEF : .....	25
Génie militaire.....	25
IV.2.5. Problèmes d'équilibre (Système discret) : .....	25
IV.2.6. Principes de la MEF:.....	26
IV.2.7. Étapes logiques du calcul par MEF :.....	26
IV.2.8. Caractéristique d'un élément fini .....	26
IV.2.9. Etapes pratiques du calcul par MEF:.....	27
IV.3. Conclusion :.....	27

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

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

### Introduction Générale

Les ouvrages d'art constituent un patrimoine important dans le domaine de transport et jouent un rôle important dans l'économie du pays. En effet les ponts, ouvrages d'art par excellence, doivent être toujours en bonne état, afin qu'ils puissent accomplir leur mission et ainsi garantir une bonne exploitation aux usagers. Cependant, des difficultés inhérentes à la surveillance et à l'entretien et maintenance (réparation/renforcement) de ces ouvrages sont liées, paradoxalement, à leur grande durée de vie et à l'occurrence d'événements trop épisodiques pour maintenir l'attention constante des maîtres d'ouvrage. A cela s'ajoutent la fréquente rotation des personnels techniques avec la perte d'information cruciale qui en résulte et l'apparente complexité des processus et du langage des spécialistes. Comme la majorité des ouvrages de génie civil construits en béton armé sont dimensionnés pour une durée de vie de cent ans en moyenne, cette dernière des fois dépassée par quelques constructions, ou réduite par des différents types de désordres, d'où la nécessité d'un renforcement et/ou d'une réparation pour assurer la sécurité des usagers avant d'arriver à leur limite de vie utile. Au cours des dernières années, une méthode innovatrice de réparation est proposée. Grâce à leurs caractéristiques mécaniques et physico-chimiques, leurs faibles densités, leurs remarquables résistances à la corrosion, leurs très bonnes tenues à la fatigue ainsi que leurs facilités d'exécution, les matériaux composites sont apparus très clairement comme la solution à plusieurs problèmes rencontrés. La problématique qui se pose, c'est comment prendre en charge, en termes de réparation renforcement, les ouvrages qui présentent signe de pathologie et qu'elles sont les différents types de dégradations et quelles sont les méthodes de réparation. Enfin comment trouver un modèle numérique capable de refléter le vrai comportement de l'élément de structure renforcé par des matériaux composites avec l'application de la méthode des éléments finis (MEF).

Nous proposons dans notre mémoire de fin d'étude (Master2), une contribution à trouver des méthodes adéquates pour la rénovation de ponts routiers se trouvant dans des zones sismiques selon le dernier règlement parasismique (RPOA 2008). Ce travail consiste à appliquer la technique de collage par matériaux composites, comme technique de réparation, sur les éléments porteurs (tablier, appuis...), d'un pont ancien, se trouvant à Alger, présentant des signes de pathologie. Pour cela, on prévoit, une analyse numérique par le biais de la méthode des éléments finis (MEF) avec l'utilisation d'un logiciel approprié (ANSYS/ APDL). L'objectif est de déterminer les éléments de réduction (contraintes, déformations, moments, efforts tranchants) et voir le comportement dynamique (analyse modale) de la structure modélisée.

Le manuscrit présent est scindé en cinq chapitres. Après une introduction générale, le premier chapitre sera consacré à la présentation de la synthèse bibliographique, dans laquelle, on définira les types de ponts en chiffres statiques et les signes pathologiques observés sur les éléments porteurs. Dans le deuxième chapitre, on définit le terme

rénovation, à quoi consiste et quelles sont les méthodes appropriées pour prise en charge dans le cas des ponts. Pour le troisième chapitre, on présentera la méthode innovatrice appelée “ technique de collage par matériaux composites”, ces avantages et ces domaines d’application. Le quatrième chapitre est consacré à l’analyse numérique, avec l’application de la méthode des éléments finis, avec l’utilisation du logiciel commercial ANSYS/APDL. Un cas d’étude de pont ancien rénové sera étudié et analysé avec paramètres et hypothèses de choix. On traitera dans le dernier chapitre cinq des discussions et commentaires des résultats trouvés. Enfin nous terminons notre travail par une conclusion générale et des recommandations.

# **Chapitre I : Synthèse Bibliographique**

## Synthèse Bibliographique

### I.1 Préambule

Dans cette partie de la synthèse bibliographique, on va s'étaler sur les dégradations des structures de ponts et leurs causes, ainsi que les méthodes et techniques de réparation les plus utilisées. La technique de réparation par composites collés sera détaillée dans la deuxième partie de ce chapitre.

### I.2 Pathologie des structures de pont :

#### I.2.1 Etudes statistiques :

Le pont, ouvrage d'art par excellence, occupe une place très particulière parmi les constructions, et son calcul, ainsi que son entretien exigent une spécification particulière, vu ces conditions de service et le rôle qu'il joue surtout dans les voies de communication. Le recensement national des ponts établi par le secteur des Travaux Publics [1], montre l'existence de plus de 11000 ponts, répartis dans les wilayas du territoire national. La répartition de ces ponts, selon la nature du matériaux constituant, montre clairement le nombre très important des ponts en béton, avec un pourcentage de 48%, suivi des ponts en mixte et en maçonnerie (24%), les ponts en béton précontraint (14%) et les autres types (14%). 35% de ces ouvrages sont dégradés et nécessitent des interventions (réparation ; réhabilitation et entretien) [2].

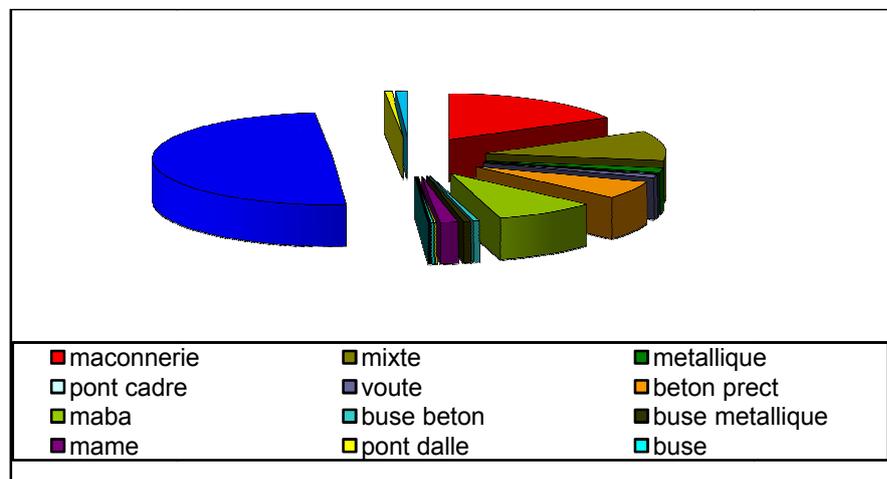


Figure .I.1 : réparation des ponts selon type du tablier

#### I.2.2 Dégradation des ouvrages en béton

Les structures de ponts en béton peuvent être affectés par des désordres de gravité très variables et dont les causes sont multiples, la présence de déformations ou de fissurations inhabituelles est souvent le signe visible d'une pathologie. Mais certains ouvrages peuvent être endommagés, bien avant l'apparition de signes évidents (cas de bétons attaqués par les alcalis -réaction) [3]. Pour cela, lors de constatation de désordres quelconques sur un ouvrage, il faut éviter à procéder à une réparation hâtive en raison de l'urgence qui

s'attache aux travaux, car ceci peut conduire à des résultats néfastes concernant la durabilité de l'ouvrage réparé. Cependant, les désordres peuvent se manifester à n'importe quel moment de la vie de l'ouvrage et des renforcements et réparations sont alors nécessaires, même pour les ouvrages en cours de sa réalisation [4].

On peut trouver divers types de dégradations et les principaux dommages des ouvrages d'art, se manifestent aux niveaux des appuis ou tabliers. La figure I.2, montre quelques anomalies au niveau d'un appui (pile) de pont. Ces dégradations du béton dans les appuis ou memes les poteaux sont dues à un problème du matériau (zone de ségrégation, reprise de bétonnage), ou dues à un problème de fonctionnement de l'élément (effort tranchant, moment fléchissant, etc.).



**Figure I.2 : fissure ascendantes dues à la reprise de bétonnage**

D'autres fissures se manifestent aux niveaux des éléments du tablier comme illustrent les figures I.3 et I.4. Elles sont dues, soit aux problèmes de corrosion, éclatement des enrobages et aux agressions salines (climat marin).



**Figure. I.3 : Traces d'humidité au niveau d'un chevrete** **Figure .I. 4 : corrosion et éclatement du béton**

### **I.2.3 Causes des dégradations**

Il y a plusieurs causes qui conduisent à des dégradations des structures en béton et plus particulièrement celles des ponts. Ces dégradations peuvent être causées par :

- A un renforcement insuffisant vis à vis du niveau de sécurité que l'on attend normalement d'un ouvrage ;
- A une réparation inadaptée qui risque d'être à reprendre au bout d'un an ou deux ;
- A une opération plus onéreuse que la construction d'un ouvrage neuf ;
- A ne réparer qu'une partie des désordres ( ex.: réparer un tablier dont les fondations sont à la limite de la ruine).

C'est pourquoi, avant d'entreprendre toute opération de réparation, ou même de renforcement, il convient de procéder à un examen complet de l'état de l'ouvrage, d'établir les causes des désordres et de s'assurer de la validité des réparations que l'on envisage [5]. Les causes de dégradation des structures sont dues à des erreurs de conception, de calcul ou de réalisation.

### **a) Erreurs de conception**

Parmi ces erreurs, on peut citer :

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

### **b) Erreurs de calcul (étude)**

Ces erreurs sont dues aux :

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

### **c) Erreurs d'exécution et de réalisation**

Dans cette phase, les erreurs sont diverses, parmi ces erreurs, on peut citer :

- Dispositions défectueuses (notamment dispositions d'armatures) dans certains éléments ou dans la transmission des efforts ;
- Désordres résultant de déformations excessives ;
- Fautes d'exécution, surtout la confection des éléments en béton armé (coffrage, bétonnage, ferrailage, décoffrage, fuses manœuvres, autres causes comme les phénomènes chimiques et gel). Ces causes et d'autres, peuvent donner des résultats néfastes soit sur la structure ou sur une partie de ses éléments.

## I.3 Méthodes et techniques de réparation

### I.3.1 Introduction

Diverses techniques de renforcement sont utilisées, comme: le béton projeté, la précontrainte extérieure, les tôles collées et le collage des matériaux composites à bases de fibres de carbone. Les techniques les plus répandues en Algérie sont le chemisage et le béton projeté, qui présentent des inconvénients tels que : la mise en œuvre, la durée, la nécessité de grands aménagements et le changement très apparent de la forme de la structure chemisée. Cependant, les nouvelles associations des matériaux composites, utilisés dans l'industrie aéronautique et spatiale, commencent à avoir leur application comme techniques de renforcement. Ces matériaux sont introduits sur le marché national Algérien par les compagnies Sika Outre-mer, Freyssinet France, Freyssinet Italie, MBT, etc [6] et leurs applications comme matériaux de renforcement commencent à être maîtrisés par beaucoup de nos entreprises travaux publics et peu dans le domaine du bâtiment.

### I.3.2 Principaux techniques de réparation et renforcement

Suivant l'importance et les causes des désordres affectant une structure en béton (pont, bâtiment, autres constructions), le projet de réparation et/ou renforcement repose, en général, sur la mise en œuvre d'une combinaison de plusieurs techniques que l'on peut classer dans l'une des cinq catégories suivantes :

- Les traitements de surface : ragréages et injection des fissures ;
- La protection du béton et des armatures ;
- La régénération des matériaux ;
- L'ajout de forces (ou de déformations).

#### I.3.2.1 Traitement de surfaces

Parmi les principaux traitements de surface sont le ragréage et l'injection de fissures.

##### a- Le ragréage

Cette technique consiste, en premier lieu, à préparer avec soin les surfaces à traiter afin de créer un support sain, rugueux, pour favoriser une bonne adhérence au niveau de la surface de reprise. Les procédures les plus courantes sont l'hydro-démolition, le décapage par marteau pneumatique, ou dans le cas extrême, au brise-béton.

Classe S  $-200\text{mV} < E$  Les aciers sont passivés

Classe M  $-350\text{mV} < E < -200\text{mV}$ . L'enrouillèment est possible

Classe R  $E < -350\text{mV}$ . L'enrouillèment est probable

Dans le cas de présence des aciers corrodés, il est indispensable de les décaper (par sablage ou grenailage), ensuite de leur conférer une nouvelle protection à l'aide de produits hydrauliques ou de résines organiques, voire, de les remplacer dans les cas extrêmes. Les produits de ragréage peuvent être classés en trois types principaux :

- Produits à base de liants hydrauliques, constitués par un mélange de ciment, sable, des résines miscibles dans l'eau et éventuellement des fibres.

- Produits à base de résines de synthèse, constitués de sable (dans le cas de mortier), depolymères organiques réactifs additionnés d'adjuvants spécifiques et, éventuellement, descharges minérales. Les produits les plus utilisés sont ceux à bases de résines époxydiquesou polyuréthanes;
- Produits mixtes, qui sont des produits à base de ciment et de polymères organiquesréactifs.

### **b- Injection de fissures**

Les fissures sont caractérisées par :

- Leur âge, qui peut conditionner l'injectivité;
- Leur tracé, souvent révélateur de leur origine;
- Leur ouverture, mesurable à l'aide d'appareils (fissuromètre, jauges d'épaisseur,...) ;
- Leur profondeur, permettant de distinguer les fissures inertes des fissures actives dontl'ouverture varie en fonction des facteurs extérieurs (charge, vibrations).

Il y a deux grandes catégories de traitement par injection : traitement superficiel (en surface) et le traitement dans la masse :

Pour les traitements superficiels, ce sont des traitements qui permettent essentiellement d'assurer ou de rétablir l'étanchéitéperdue par l'ouverture provoquée par la fissure, de la surface d'une structure et d'éviter oustopper la corrosion des armatures. Parmi ces traitements, le calfeutrement; qui consiste à obturer la fissure par l'application d'un produit déposé dans une engravure façonnée le long deleur tracé avec une ouverture de l'ordre des deux tiers de sa profondeur.L'imprégnation, qui permet d'étancher une surface présente un réseau important et diffus demicrofissures. Le produit est passé sur la surface concernée généralement à la brosse ou auroleau (pontage) et rend hermétique l'ouverture de la fissure par application superficielled'un film généralement armé et adhérent, de 3 mm d'épaisseur, de part et d'autre des lèvres dela surface

Concernant les traitements de masse, caconsiste à injecter en profondeur un produit liquide qui, après durcissement,aura des caractéristiques mécaniques voisines de celles du matériau environnant. L'injectionse fait par cheminement du produit liquide dans la fissure, de l'extérieur vers l'intérieur, aprèsobturation de la partie visible de la fissure. Dans le cas de fissures traversant es aveugles,l'injection est toujours difficile à réaliser, car on ne peut intervenir que sur une seule face. Lasolution la plus couramment utilisée dans ce cas consiste à régler progressivement la viscositédu produit injecté en l'épaississant au fur et à mesure de l'injection, jusqu'à atteindre lapression dite de "refus" à partir de laquelle le liquide ne s'écoule plus.

### **I.3.2.2 La protection du béton et des armatures**

La protection des éléments porteurs des éléments structuraux en béton armé est parmi lesphases primordiales dans la réparation de ces éléments. On distingue :

#### **a- Techniques de protection du béton**

Si l'enrobage des aciers est trop poreux ou d'épaisseur insuffisante, ou lorsqu'lenvironnement est particulièrement agressif, il est souvent nécessaire d'appliquer

untraitement de protection du béton. Une telle protection peut aussi être appliquée à un mortier fraîchement déposé, vis à vis des agressions atmosphériques, des fondants de l'eau de mer, des attaques chimiques ou bactériologiques ou, tout simplement, vis-à-vis de la pénétration de l'eau, afin d'assurer une grande durabilité de la réparation. Les cinq grandes familles de produits de différentes caractéristiques sont :

- Les hydrofuges des surfaces qui sont destinés à rendre la surface du béton imperméable à l'eau. Il s'agit principalement de silicone en solution aqueuse que l'on peut appliquer à une surface légèrement humide.
- Les minéralisateurs qui sont des produits qui contiennent des atomes de silicium capables de réagir avec le calcium contenu dans la chaux du ciment pour donner des microcristaux de C-S-H qui pénètrent dans les pores et créent une sorte de "minéralisation" du support.
- Les peintures qui protègent le béton jouent aussi un rôle esthétique. Ces peintures sont à base de copolymères acryliques ou vinyliques en émulsion aqueuse ou autres résines époxydiques. Parmi les peintures qui constituent des revêtements pour le béton, il y a les revêtements minces, en une ou deux couches sur des épaisseurs totales de 1 à 2 mm, à base de liant hydraulique modifié ou à base de polymère, et les revêtements plastiques épais. D'une épaisseur de 1 à 3 mm.

#### **b- Protection des armatures**

Afin de protéger les aciers porteurs du béton armé constituant les éléments structuraux, il est impérativement nécessaire de passer par les étapes suivantes :

- Prévention de la corrosion des armatures,
- L'enrobage suffisant des armatures selon l'environnement;
- Qualité du béton meilleure;
- Dosage minimal en ciment, l'épaisseur carbonatée est d'autant plus faible que le dosage du béton en ciment est plus élevé.

Les principales causes de la corrosion des armatures du béton armé, sont la carbonatation et la présence de ions agressifs tels que les chlorures dans un milieu sec et humide. Les armatures peuvent être protégées par une des techniques suivantes, telles que : la protection cathodique (technique permet de stopper le processus de corrosion, elle doit être appliquée avant que les risques d'ordre mécanique soient importants). Cette méthode consiste à abaisser en un point de l'armature le potentiel de ce métal jusqu'à une valeur qui telle que la vitesse de corrosion de l'acier devient négligeable. L'abaissement du potentiel est obtenu en imposant le passage d'un courant électrique qui va de l'enrobage vers l'armature. On cite aussi, les inhibiteurs de corrosion, qui sont des composés chimiques à base de nitrite ou benzoïques de sodium, qui prolonge la passivité de l'acier dans le béton en présence d'agents agressifs, s'ils sont appliqués sur les barres d'acier. Il y a aussi, le revêtement des armatures qui est plus pratiquée et consiste à la protection de l'acier par revêtement organique de polymères comme les résines époxy; ou par revêtement métallique comme le zinc.

### I.3.2.3 Régénération des matériaux

Afin de donner une renaissance aux matériaux (béton, aciers, câbles), plusieurs techniques peuvent être appliquées, parmi ces techniques, on peut citer:

#### a) Technique de réinjection des câbles de précontrainte

Cette technique consiste à remplacer l'air présent dans la cavité (vides laissés par une injection incomplète de câbles de précontrainte), par un produit du type coulis de ciment très fluide et stable. Le remplissage ne peut être complet que si l'on parvient à évacuer l'air emprisonné. Pour ce faire, on utilise la technique du vide qui exige l'emploi de produits spéciaux.

#### b) Extraction des chlorures

Ce traitement, permet d'extraire les chlorures présents dans le béton de la structure. Ce traitement peut durer de 6 à 12 semaines et permet d'extraire 40 à 50 % des chlorures situés dans le béton surtout au voisinage de la surface.

### I.3.2.4 L'ajout de forces (ou de déformations)

Afin d'augmenter la capacité portante ou prolonger la durée d'exploitation d'un ouvrage existant, on applique des efforts d'une intensité connue et suivant des directions définies par les câbles de câbles précontraints, qu'on appelle précontrainte additionnelle. Cette précontrainte, qui est en général extérieure, permet de renforcer la structure. Son application suppose un traitement préalable des fissures par injection car elle ne peut, à elle seule, refermer les fissures. Parmi ces applications, on distingue :

#### a) Renforcement des ouvrages en flexion

On applique ce renforcement en particulier dans les tabliers de ponts, pour augmenter leur résistance à la flexion. Le tracé des câbles précontraints additionnels peut être rectiligne ou polygonal. On peut soit renforcer et/ou réparer les éléments porteurs (poutres, dalles, caissons, Etc...) ou les éléments secondaires (entretoises, éléments de tablier).

#### b) Renforcement des ouvrages vis-à-vis de l'effort tranchant

Lorsque le problème majeur, dans une structure en béton précontraint, est celui de l'effort tranchant, et si l'inclinaison de câbles de précontrainte additionnelle n'est pas possible, on recourt à l'emploi d'étriers actifs, verticaux et constitués de fils, de barres ou de mono torons.

### I.3.2.5 Ajout de matière

Les techniques d'ajout de matière sont :

- L'ajout d'armatures passives (appelé parfois chemisage);
- L'ajout de béton (tel que le béton projeté);
- Les tôles collées (Figure I.5).

#### a) Principe de la tôle collée

L'ajout de matière est la technique la plus répandue dans la réparation des ouvrages en béton armé. Cependant, les techniques de chemisage et de béton projeté présentent beaucoup d'inconvénients tels que: le changement de géométrie, de l'esthétique, les grands réaménagements, le coût et le surplus de poids ajouté par la structure sur la

fondation. Le chemisage est toujours pratiqué dans la réhabilitation du bâtiment et le renforcement des appuis des ponts vétustes ou anciens.

Contrairement aux techniques sus mentionnées, la technique de tôles collées, qui a remplacé ces techniques traditionnelles, a permis d'éliminer pas mal d'inconvénients, vu sa simplicité de mise en œuvre. Cependant, le problème de corrosion en sites agressifs des tôles collées, appliquée pour la première en Afrique du Sud, sur un tablier de pont à poutres en béton reste un inconvénient majeur [6].

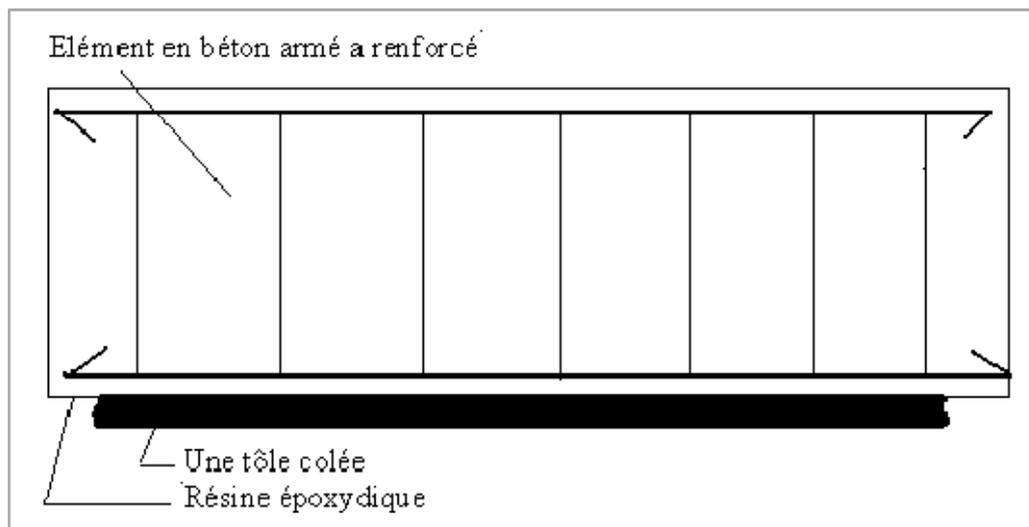


Figure I.5 Technique de tôles collées [6]

Par conséquent, la tôle collée a été remplacée par des matériaux résistants à la corrosion comme les tissus à base de polymères (carbone, verre, aramide, résidu plastique), appelés matériaux composites. Cette technique de collage de tissus de fibres de carbone, consiste à préparer la surface du béton par un sablage à sec en vue d'obtenir un état de surface rugueux et uniforme en tous points avec des reliefs d'impact compris entre 0,5 et 1 mm. Les dépôts de poussières et les particules non adhérentes sont éliminés par un brossage énergétique. Ensuite une couche de résine est d'abord appliquée au rouleau à poils ras. Le tissu de fibre de carbone est ensuite appliqué. Si nécessaire, il est possible de juxtaposer plusieurs bandes de bord à bord puis, une couche d'imprégnation de la même résine est mise en place à la spatule à raison de 700 g/m<sup>2</sup> environ. Cette opération peut être renouvelée pour une deuxième couche de TFC. Enfin, une couche de fermeture est appliquée à la spatule. La figure ci-après montre un pont renforcé avec du tissu de fibres de carbone. On détaillera dans la section suivante l'application de cette technique, ainsi que les caractéristiques, la performance, et la durabilité des matériaux composites [7].

### b) Technique de béton projeté

Cette technique, très au point, utilisée tant pour le renforcement de structures insuffisantes ou défaillantes que pour la réparation d'ouvrage endommagés, consiste à projeter du béton contre la face à bétonner à l'aide d'un jet d'air sous pression. La difficulté de l'emploi de

cette méthode provient essentiellement de mode d'application et de mise en œuvre (matériels, main d'œuvre et problèmes de sécurité) (Figure I.6).

Il existe deux techniques principales de projection : par voie sèche et par voie humide, Dans le procédé par voie sèche, l'eau est ajoutée en bout de lance alors que dans le procédé par voie humide, elle est mélangée en totalité lors de la fabrication du béton en centrale.



Figure I. 6 Renforcement au moyen de béton projeté

Il existe deux procédés du béton projeté :

Le procédé par voie sèche est le plus utilisé pour les réparations. Les matériaux secs, c'est-à-dire le ciment et les granulats, sont incorporés directement dans une canalisation, où ils sont transportés par l'air comprimé jusqu'à la lance. L'eau sous pression est introduite dans le mélange à la lance par l'entremise d'une bague perforée, cette bague permet le mélange de l'eau avec les matériaux. Le malaxage de l'eau et des matériaux secs se produit dans la lance et au contact de la surface. Le procédé par voie sèche a l'avantage de pouvoir être arrêté et reparti à tout moment durant les travaux. En effet, comme le contact du ciment et de l'eau ne se fait qu'à la lance, il n'y a aucune prise possible dans l'appareillage si la production du béton est interrompue. Des résistances élevées peuvent être facilement obtenues avec ce procédé puisqu'il permet d'atteindre de faibles rapports eau/liant (Figure I.7).



Figure I 7. Béton projeté par voie sèche

Pour le procédé par voie humide implique qu'un béton ou un mortier soit pompé de façon conventionnelle dans un boyau et projeté à haute vitesse contre une surface réceptrice en utilisant de l'air comprimé ajouté à la lance (Figure I.8).

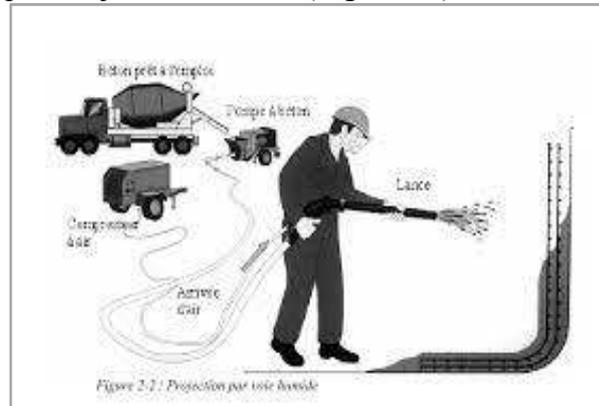


Figure I.8 Béton projeté par voie humide

### c) Réparation par chemisage en acier

Ce type de réparation est utilisé généralement pour les poteaux et moins pour les poutres, l'union de la platine à la structure peut se faire par : Collage, vissage, ou bien ancrage. Afin d'éviter le glissement, les éléments en acier supplémentaires peuvent être joints au moyen de boulons d'extension ou éléments de fixation spéciaux. En variante, des produits novateurs peuvent être également utilisés, tels que par exemple des résines époxy ou collage par mortier. La section transversale de profilés en acier peut être tout simplement à plat ou en forme diverse, selon les exigences de conception. Cette technique permet d'améliorer considérablement la résistance, d'où son efficacité a été clairement démontrée, à la fois par les recherches expérimentales et par des observations sur le terrain effectuées durant le séisme de Northridge en 1994.

### d) Réparation par chemisage en béton armé

Ce procédé a d'ailleurs longtemps été l'une des techniques de réhabilitation les plus courantes. Il consiste en une augmentation considérable des sections par la mise en œuvre. La technique de tôles collées permet, soit d'accroître la capacité portante d'un ouvrage, soit de fournir un ferrailage additionnel à l'ancien élément et d'un nouveau béton d'enrobage pour favoriser l'accrochage. Elle est utilisée pour des poutres à âme verticale ; elle permet un enrobage des parties latérales de l'âme et rend ainsi le renfort plus effectif.

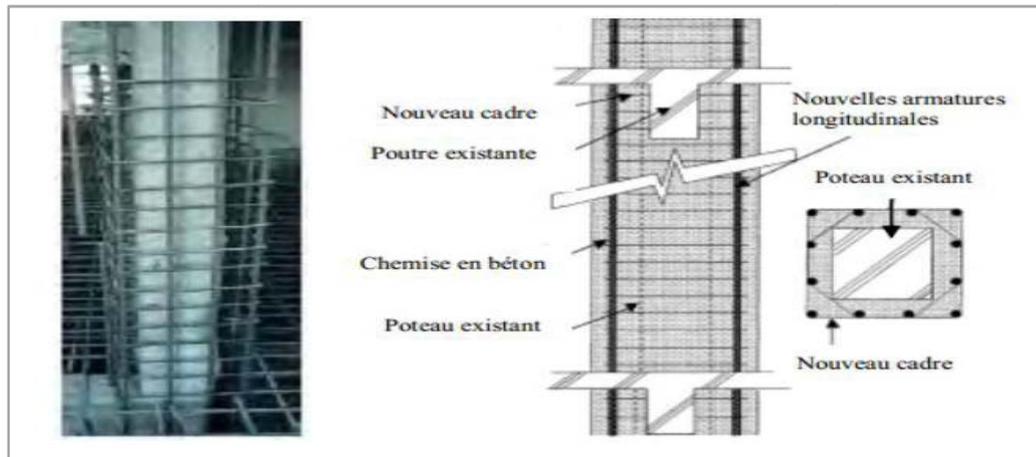


Figure I.9 Chemisage d'un poteau en béton

### e) Réparation par la tôle collée

La technique de tôles collées permet, soit d'accroître la capacité portante d'un ouvrage, soit de renforcer localement une structure présentant des insuffisances de résistance. Cette technique est applicable aux structures en béton armé et aux zones fonctionnant en béton armé des structures précontraintes. Diverses conditions doivent être réunies pour la bonne réussite d'une opération de renforcement ou de réparation. La surface du béton doit subir, avant tout une préparation soignée (burinage, bouchardage, voire sablage à sec ou humide selon les conditions du chantier) avant. Pour but d'éliminer toutes les parties peu adhérentes et de supprimer les imperfections locales afin de la rendre la plus plane possible. Le mortier de ragréage est destiné à pallier, dans certains endroits, le manque d'enrobage des armatures internes ou bien à re-profiler la surface qui n'aurait pu efficacement être traitée par les précédentes techniques, en limitant la surface à ragréer à 20% de la surface de collage et en s'assurant qu'il n'y aucune zone ragréée en extrémité de tôles. L'acier de renfort est constitué dans la plupart des cas de tôles en aciers E24-2. Dans le cas où il est nécessaire de souder les tôles, on utilise de l'acier E24-3. Ces tôles, ont une épaisseur de 3 à 5 mm. Le choix d'un acier de nuance supérieure ou d'épaisseur plus importante est à déconseiller car il faut que l'acier se plastifie avant son décollement de façon à obtenir une structure ductile et non fragile.

La tôle est collée par l'utilisation d'une résine époxydique sur une épaisseur de l'ordre de millimètre après l'application d'une couche préliminaire d'accrochage sur la surface de béton. L'inconvénient de cette technique est la corrosion des aciers, et par conséquent la nécessité de leur protection sur leur surface visible. Des techniques ont été développées précédemment par l'utilisation de matériaux plus performants et non vulnérables à la corrosion (non corrosifs), comme les composites à bases de fibres de carbone. Afin de s'affranchir des difficultés liées à la mise en œuvre des tôles collées, ainsi que la corrosion possible de ces tôles, surtout aux endroits humides, plusieurs groupes d'industriels et de laboratoires ont entrepris des recherches portant sur l'emploi de matériaux composites.

### f) Réparation des structures par précontraintes additionnelles

Cette technique consiste à renforcer une structure à l'aide de câbles de précontrainte ou de torons gainés graissés généralement disposés à l'extérieur du béton. La précontrainte additionnelle (ou précontrainte extérieure) va introduire dans la structure des sollicitations complémentaires, qui vont compenser les défauts de dimensionnement ou de conception ou des efforts supplémentaires, que doit supporter la structure suite à des modifications des

conditions de chargement ou d'utilisation. Les nouveaux câbles ou torons doivent, en apportant de la compression aux zones tendues, sans ajouter d'excès de contraintes dans les zones comprimées.

Elle peut s'appliquer à tous types de structures existantes en béton armé ou en béton précontraint. Cette méthode de renforcement bien que très efficace présente quelques difficultés de mise en œuvre. En effet, elle nécessite de dimensionner soigneusement des ancrages et de déterminer le chemin approprié des câbles. Ainsi, des forages à travers certaines parties de la structure existante sont nécessaires. Ces forages doivent être exécutés sans toucher aux différentes armatures existantes. En fin, il faut prendre toutes les dispositions pour contrôler que la précontrainte additionnelle se répartisse dans la structure et surtout dans les zones fissurées (Figure I.10).



Figure I 10 Procédé de précontrainte additionnelle

### g) Renforcement/réparation par matériaux composites

La plupart des applications à travers le monde de la technique de renforcement par PRF (polymère renforcé de fibres) à structures historiques se trouvent dans de vieux bâtiments de maçonnerie. Cependant, les structures faites de d'autres matériaux aussi, comme le bois et l'enfoncé, ou même vieux béton, ont reçu la mise à niveau à l'aide de PRF. En général, la technique de renforcement avec des matériaux composites peut être utilisée pour améliorer la ductilité ainsi que la capacité de résistance en flexion et au cisaillement de tous les éléments structurels (poteaux, poutres, dalles, murs porteurs), les éléments du pont (piles, tablier) et dans certains cas, des structures en béton précontraint existantes. 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.

Les matériaux composites sont utilisés dans de nombreux domaines tels que la construction, l'aviation et d'autres secteurs. On définit un matériau composite consiste dans le cas général d'une ou plusieurs phases discontinues, réparties dans une phase continue. La phase discontinue a habituellement des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase

continue. La phase continue est appelée " la matrice", la phase discontinue est appelée "le renfort (Figure I.11).

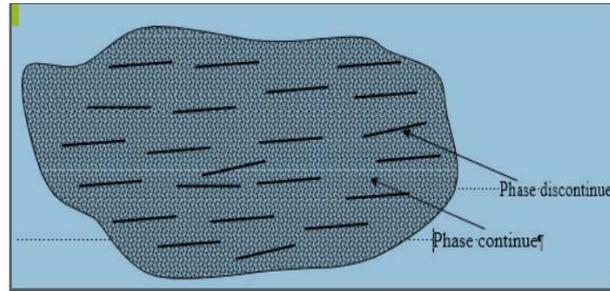


Figure I 11 Composants d'un matériau composite.

Les matériaux composites appartenant à la famille des Polymères Renforcés de Fibres (PRF) conviennent pour une gamme très étendue d'utilisations dans le domaine de la construction. Ceci s'explique notamment par la diversité des formes dans lesquelles ils peuvent se présenter : feuilles, tissus ou enveloppes préformées, lamelles pultrudées, collés sur les parois extérieures de la structure (moulage au contact), sous forme d'engravure, de profilés structuraux ou encore sous forme de barres pour le renforcement interne du béton. Dans le secteur du génie civil, deux types de produits de construction en matériaux composites sont principalement utilisés : les tissus (secs ou pré-imprégnés sous forme de feuilles), et les plats (ou lamelles). Les tissus sont collés sur site et polymérisent lors de la mise en œuvre (moulage au contact), alors que les plats sont préfabriqués (pultrusion). Cependant, ces différents types de matériaux composites ont des propriétés mécaniques proches, qui sont notamment gouvernées par le comportement (résistance et rigidité) des fibres. En effet, les PRF associent des fibres de résistance élevée à une matrice polymère qui les lie et dans laquelle elles sont noyées. Ce sont les propriétés propres à ces deux composants qui confèrent au matériau ses propriétés globales. Ces propriétés dépendent de la fraction volumique de fibres, de leur orientation, du type de matrice utilisé, ou encore de la méthode de fabrication. Par exemple, la pultrusion permet d'introduire un pourcentage plus important de fibres, et donc d'augmenter la rigidité et la résistance du PRF (Figure I.12). Dans le secteur du génie civil, deux types de produits de construction en matériaux composites sont principalement utilisés : les tissus (secs ou pré-imprégnés sous forme de feuilles), et les plats (ou lamelles). Les tissus sont collés sur site et polymérisent lors de la mise en œuvre (moulage au contact), alors que les plats sont préfabriqués (pultrusion). Cependant, ces différents types de matériaux composites ont des propriétés mécaniques proches, qui sont notamment gouvernées par le comportement (résistance et rigidité) des fibres. En effet, les PRF associent des fibres de résistance élevée à une matrice polymère qui les lie et dans laquelle elles sont noyées. Ce sont les propriétés propres à ces deux composants qui confèrent au matériau ses propriétés globales. Ces propriétés dépendent de la fraction volumique de fibres, de leur orientation, du type de matrice utilisé, ou encore de la méthode de fabrication. Par exemple, la pultrusion permet d'introduire un pourcentage plus important de fibres, et donc d'augmenter la rigidité et la résistance du PRF (Figure I.13).

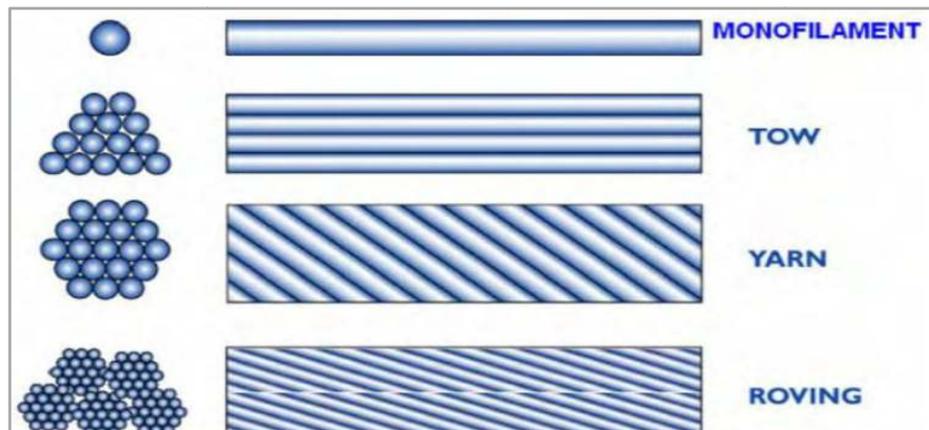


Figure I.12 Les différentes formes de fibres.

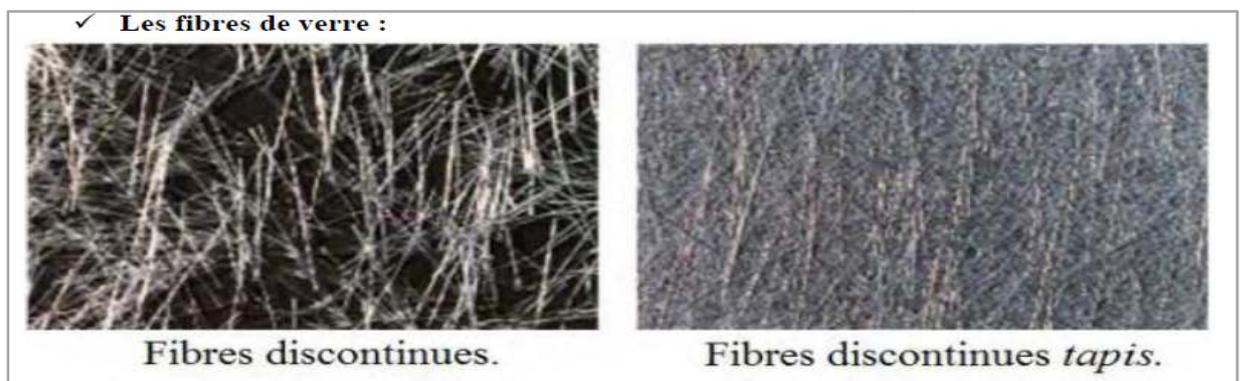


Figure I.13 Exemple de fibres de verre

Les matériaux composites se distinguent de la facilité de mise en œuvre. En effet, il existe différentes techniques de ces mises en œuvre des renforts en matériaux composites sur un substrat béton. On peut citer [2]

- Mise en œuvre par moulage au sac, qui est procédé permettant d'obtenir des caractéristiques mécaniques élevées à court terme. Après avoir ragréé la surface de béton (sablage, application d'un mortier polymère), les couches de tissus pré-imprégnées sont découpées et appliquées sur la zone à renforcer.
  - Une couverture chauffante est ensuite appliquée sur la surface des tissus et une enveloppe étanche, raccordée à une pompe à vide, permet d'appliquer une pression externe pendant toute la durée de polymérisation ou de polycondensation.
  - Mise en œuvre par stratification directe (ou moulage au contact): Cette fois la polymérisation se fait à température ambiante (le renfort atteint sa résistance totale au bout d'une semaine) selon les étapes suivantes : (préparation de surface du béton avec l'application d'une couche primaire d'imprégnation, avec dépose des tissus aux dimensions voulues, ainsi que imprégnation et marouflage des renforts (éventuellement), avec

application d'une couche de protection). Enfin le collage de plaques composites (technique dite du double encollage),

- Traitement de surface du substrat béton par sablage, par eau ou sous pression et meulage et nettoyage de la surface traitée par un dépoussiérage
- Application d'une couche du polymère époxyde (colle) sur la surface nettoyée et -nettoyage à l'acétone de la surface du plat à encoller
- Application d'une couche du polymère époxyde (colle) sur le plat composite.
- Mise en pression du plat sur le support béton (recouvert de la première couche du polymère époxyde) et retrait de l'excédent de colle
- Mise en pression du joint collé par marouflage du plat, permettant d'enlever les éventuelles bulles d'air et assurer ainsi une bonne adhérence.

# **CHAPITRE II : RENOVATION D'UN PONT**

### Rénovation d'un pont

#### II.1. Définition :

La rénovation désigne les opérations par lesquelles un pont ou l'un de ses éléments voit sa condition améliorée, par l'utilisation de matériaux neufs, modernes en remplacement des parties endommagées ou obsolètes. Le plus souvent il s'agit d'une construction neuve après démolition totale. Cette démolition fait différer la rénovation de la restauration, remise en l'état initial, et de la réhabilitation, qui a pour but de rouvrir un lieu fermé, ou ouvert mais pas aux normes les plus récentes. Une rénovation fait parfois partie d'un plan de reconversion ou de restructuration. En effet, un pont en service est exploité, et cette dernière dépend de la conservation de l'intégrité physique de sa superstructure et son infrastructure. Avant de choisir une réparation, il est nécessaire de vérifier la cause du dégât et les mécanismes de la déchéance. L'objectif principal du programme de maintenance proposé par les pouvoirs publics Algériens, c'est de développer une procédure intégrée rationnelle pour l'évaluation physique des éléments structuraux des ouvrages d'art existants qui présentent de signes de vétusté, ce qui impliquent l'introduction des méthodes efficaces, rapides et performants pour redonner la portance à ces structures, telles que les épreuves de tests non destructifs, les épreuves de radar et les méthodes de l'écho de l'Impact afin de détecter les anomalies et dégradations apparentes (corrosion des aciers, éclatements des béton, fissurations de la structure).

#### II.2. Historique

L'entretien et la protection des ponts nécessitent une inspection constante de leur état technique et des travaux de rénovation systématiques, En effet, l'état technique de ces ouvrages d'art est lié à leur âge, à l'intensité des charges qu'intensité des charges qui évolue avec le temps, les processus de vieillissement des matériaux constitutifs et l'état des ponts [9]. Les pouvoirs publics donnent une importance primordiale aux états physiques des ponts en exploitation et par conséquent, ils dégagent des enveloppes budgétaires non négligeables pour leur maintenance et entretien.

En Algérie, en plus de la politique de prédiction des endommagements des ouvrages d'art en cas de risque majeurs (séismes, inondations, glissement, intempéries) [09], le secteur des travaux publics entrepris chaque année des travaux de rénovation et d'entretien de pas mal de ponts routières situés dans des endroits et des réseaux d'intensité importante. On peut citer l'ouvrage d'art de Sidi Rached à Constantine en 1998, l'ouvrage appelé "Pont Blanc" d'El Harrach dans le sud d'Alger en 1999, le pont sur Oued Massaad à Laghouat en 2003, le pont traversant oued Oumazer" à Cherrhell (wilaya de Tipaza) en 2007 et le pont sur oued Messaad à Laghouat en 2009 entre autres [10].

#### II.3 Entretien courant

Il s'agit des tâches courantes d'entretien qui ne nécessitent pas l'application de techniques spéciales et ne concernent pas les interventions structurelles. L'entretien courant comprend des tâches régulières et/ou systématiques (par exemple le nettoyage des dispositifs

d'assainissement) et des tâches conditionnées par l'environnement et l'usage des ouvrages. Pour être bien conduit, l'entretien courant des ouvrages d'art doit être effectué :

- Par une équipe habituée à ce genre de travaux, encadrée par un chef d'équipe ayant acquis une bonne connaissance des ouvrages par formation spéciale ou par expérience ;
- Par une équipe disposant du matériel adapté ;
- Suivant un programme préétabli par itinéraire ou par nature d'intervention ;
- Au moment opportun : par exemple, le nettoyage des ouvrages peut avantageusement trouver place en fin d'hiver, mais aussi à l'automne et comprendre la vérification des dispositifs d'évacuation des eaux.

L'entretien courant peut être réalisé par le maître d'ouvrage en régie (par exemple, les équipes d'exploitation chargées de la voirie) ou par un prestataire extérieur. Pratiquement toutes les opérations d'entretien courant peuvent être programmées ; elles doivent donner lieu à un constat qui mentionne notamment : l'identification de l'ouvrage, la date de l'intervention, l'indication des opérations effectuées. Ce constat peut être regroupé avec celui établi au titre de la visite de contrôle annuel. Il peut également contenir des indications sur l'entretien spécialisé à effectuer et toute opération ayant pour but de maintenir un ouvrage dans son état de service relève de l'entretien. Cet entretien a essentiellement un caractère préventif et tous les ouvrages d'art doivent être entretenus.

### II.3.1 Entretien spécialisé

Malgré un bon entretien, l'ouvrage subit, avec le temps, des dégradations sous l'action de la circulation et de son environnement ; leur rénovation rapide peut éviter une aggravation entraînant des dépenses importantes ; ces travaux d'entretien spécialisés sont toujours décidés et définis après réalisation de constats (contrôles périodiques, inspections détaillées). Ils sont normalement prévisibles et peuvent faire l'objet d'une programmation pluriannuelle. Ces travaux sont souvent de faible importance ; ils portent pour l'essentiel sur les équipements et les éléments de protection et également sur les défauts mineurs de la structure qui ne remettent pas en cause la capacité portante de l'ouvrage ; ils peuvent néanmoins être onéreux rapportés aux dimensions des ouvrages. Ils nécessitent parfois des délais d'attente entre phases d'exécution et des restrictions de l'exploitation des ouvrages pendant leur réalisation. Dans le but d'avoir une certaine efficacité, les travaux doivent être préparés et exécutés avec beaucoup de soin et doivent être surveillés avec beaucoup d'attention. L'expérience enseigne en effet que des travaux qui peuvent paraître simples à première vue (comme la réfection d'un talutage, la réfection partielle d'une peinture anticorrosion d'ouvrages métalliques, des ragréages de béton au droit d'armatures corrodées, etc.) sont en réalité complexes et peuvent donner lieu à des déboires, voire à des accidents, s'ils ne sont pas précédés d'une étude faite par un spécialiste (par exemple le mètre des éléments dégradés, des calculs de vérification...).

Un maître d'œuvre spécialisé peut être requis pour cadrer le marché des travaux et surveiller leur réalisation. Un groupement de divers travaux d'entretien spécialisés de même type concernant un lot d'ouvrages dans un même marché est une solution optimale.[11]

### II.3.2 maintenance et rénovation

Toute opération consistant à remettre partiellement ou totalement un ouvrage dans un état de service attendu constitue une rénovation et le terme maintenance, sous-entend, les services à entreprendre après livraison de l'ouvrage au maître de l'ouvrage.

Une rénovation doit être précédée : • d'investigations, • d'un diagnostic, • d'une réflexion sur le choix du type de réparation, d'une étude approfondie des différentes phases de la réparation, tenant compte notamment des conditions d'exploitation et servant à définir les conditions de réception et de contrôle de l'efficacité de la réparation dans le temps. Un maître d'œuvre spécialisé est requis pour cadrer le marché des travaux et surveiller leur réalisation. Les opérations sont réalisées par des entreprises spécialisées dans la réparation des ouvrages d'art. Toutes les réparations effectuées sur un ouvrage font l'objet d'un archivage.

### II.4 Programmation de la surveillance et des travaux

La programmation des dépenses de surveillance et d'entretien se fait sur plusieurs années ; on se rend bien compte que cette programmation « pluriannuelle » n'est possible que si un suivi régulier est réalisé. Si la surveillance est irrégulière, il est en résulte des pics de dépenses qui sont difficiles à supporter et peuvent entraîner, et si les dépenses sont différées, la dégradation des conditions d'exploitation des ouvrages. La programmation permet d'intégrer l'importance sociale et économique relative des différents ouvrages d'un patrimoine. Concrètement, la programmation des travaux nécessite différentes étapes de diagnostics et d'études :

- les contrôles périodiques et inspections détaillées constituent un premier constat de l'état des ouvrages ;
- les études préliminaires de rénovation permettent de définir et de cerner la nature, l'ampleur des travaux et les contraintes de réalisation, de cadrer la démarche du maître d'œuvre ;
- la décision du maître d'ouvrage permet de hiérarchiser la priorité des travaux à réaliser suivant sa stratégie d'entretien ; la programmation pluriannuelle intervient à cette étape ;
- le rôle du maître d'œuvre est de définir le détail des projets de réparations et de cadrer le marché de travaux ; la maîtrise d'œuvre peut être exercée en régie si le maître d'ouvrage en a les moyens ou faire l'objet d'un marché de prestations intellectuelles ;
- les travaux proprement dits sont réalisés par des entreprises spécialisées retenues en fonction de leurs références ; les travaux sont suivis par le maître d'œuvre.

### II.5 Organisation des actions de surveillance :

#### II.5.1. Les actions systématiques de surveillance

Les actions systématiques de surveillance font l'objet d'une programmation suivant une périodicité définie par le maître d'ouvrage et comprennent :

- un contrôle ou surveillance périodique concrétisé par un procès-verbal ou un rapport synthétique ; ce contrôle, voulu simple, réalisé sans moyens d'accès particulier, peut être effectué par les équipes chargées de l'entretien de la voirie sous réserve d'une formation

préalable ; diverses formes de procès-verbaux peuvent être proposées au moins pour les ouvrages les plus courants ; le contenu d'un contrôle périodique est précisé ci-après ;

- des visites ou des inspections détaillées périodiques (IDP) plus complètes réalisées par déséquipes ou bureaux d'études spécialisés avec utilisation de moyens d'accès ; les périodicités fonction du type d'ouvrage, de sa sensibilité à son environnement et aussi de son état relevé au décours des contrôles périodiques ; par exemple la périodicité peut être de trois ans, six ans ou neuf ans. La définition et la réalisation d'une inspection détaillée nécessitent l'intervention de spécialistes ou de bureaux d'études retenus en fonction de la typologie des ouvrages ; les objectifs principaux d'une inspection détaillée sont précisés ci-après ;

- des visites subaquatiques : dans le cas où l'ouvrage comporte des parties immergées, celles-ci doivent faire l'objet de visites subaquatiques qui constituent un cas particulier d'inspection détaillée réalisée par des équipes de plongeurs spécialisés.

Pour mémoire et bien que cela sorte du cadre de ce guide, deux types de visites doivent également être réalisés systématiquement :

- l'inspection détaillée initiale : l'inspection détaillée initiale (IDI) définit l'état de référence d'un ouvrage neuf ou l'état de référence d'un ouvrage après de grosses rénovation.

Pour un ouvrage neuf cette visite doit avoir lieu avant la mise en service, ou exceptionnellement après mais le plus tôt possible ;[13]



**Figure II.1** : surveillance périodique sans moyens particuliers et inspection détaillée avec nacelle négative visite subaquatique

L'inspection détaillée de fin de garantie : l'inspection détaillée de fin de garantie permet la vérification de l'état d'un ouvrage ou de parties d'ouvrage sous garantie contractuelle ou sous responsabilité décennale. La visite ou l'inspection détaillée nécessaire à cette vérification doit intervenir suffisamment tôt avant l'expiration des délais de garantie ou de responsabilité

### II.5.2. Le contrôle périodique :

**a) Objectifs** :Le contrôle périodique s'applique à tous les ouvrages d'art s'ils ne font pas la même année l'objet d'une autre action (Inspection Détaillée Périodique ou exceptionnelle).

**b) Périodicité** :Ce contrôle est voulu simple ; il est donc réalisé sans moyens d'accès. En revanche la périodicité est généralement courte ; un an à trois ans maximum.

**c) Modalités** :Le contrôle périodique définit ici est un principe général ; la dénomination des contrôles périodiques, leur portée et leur périodicité sont variables suivant les

méthodes de gestion appliquées et les choix du maître d'ouvrage. A titre indicatif, sur routes nationales.

**d) Prescriptions :** Les objectifs sont de permettre de : • déceler l'évolution manifeste des désordres déjà constatés • constater des désordres graves présentant une menace ; • permettre de relever la nature des travaux d'entretien courant et des petits travaux d'entretien spécialisé à réaliser. Le contrôle périodique doit obligatoirement faire l'objet d'un constat qui mentionne : • l'identification de l'ouvrage ; • la date de la visite ; • les anomalies constatées ainsi que les signes d'évolution manifeste ; • les parties de l'ouvrage qui n'ont pu être évaluées et pour quelles raisons (inaccessibilité, fondations immergées, présence de végétation, etc.).

**e) Réalisation :** Ce contrôle est fait, sans moyen d'accès spécial, par les agents désignés par le gestionnaire et ayant reçu une formation ou par un prestataire spécialisé. Il nécessite la connaissance du patrimoine et des ouvrages. Il peut être fait à l'occasion des opérations d'entretien courant (nettoyage) et permet de programmer d'autres interventions telles que l'ensemble des actions d'entretien courant et des travaux spécialisés. Le format du constat de contrôle périodique, la désignation des parties d'ouvrages à Observer, les indicateurs ou indices sur l'état de l'ouvrage, sont souvent prédéfinis à l'avance au moins pour les ouvrages les plus courants.

Il est recommandé que les renseignements recueillis en matière de désordres fassent l'objet de relevés, de photos, de croquis permettant une appréciation desdits désordres.

Toutes les opérations de contrôles (périodiques ou inspections détaillées) obligent à une bonne programmation des opérations de dévégétalisations qui doivent être effectuées avant les actions de surveillance. En cas d'anomalie grave, les mesures de sauvegarde sont prises par le gestionnaire. [14]

### II.5.3. Les inspections détaillées périodiques :

**a) Objectif :** L'objectif est d'établir un bilan de santé de l'ouvrage inspecté ; des actions générales relatives à l'entretien courant ou spécialisé peuvent alors être définies. Au contraire du contrôle annuel, l'inspection détaillée se veut exhaustive et, en conséquence, nécessite la mobilisation de moyens d'accès. Sa périodicité est faible ou moyenne.

**b) Champ d'application :** Ouvrages portés sur la liste arrêtée chaque année par le maître d'ouvrage.

**c) Périodicité :** La périodicité normale est de 6 ans. Elle peut être ramenée à 3 ans pour les ouvrages sensibles ou malades ou portée à 9 ans pour les ouvrages les plus robustes. Cependant, tous les ouvrages devraient bénéficier d'une inspection détaillée sur une période de dix ans au maximum. Pour les visites subaquatiques la fréquence est également à adapter en fonction de la sensibilité de l'ouvrage. Elle peut être différente de celle de l'inspection détaillée « terrestre » : trois à six ans en général ou plus lors d'événements exceptionnels.

**d) Modalités :** Cette action de surveillance nécessite l'intervention de personnel spécialisé et de matériel particulier. La réalisation se fera de préférence par un prestataire spécialisé au moyen de marchés de prestations intellectuelles ; la réalisation des inspections

Détaillées nécessite de mobiliser des moyens d'accès (moyens nautiques, passerelles ou nacelles de visite...) et d'adapter les conditions d'exploitation de l'ouvrage pendant la visite.

**e) Prescriptions :** L'objectif est de vérifier :

- que l'état de l'ouvrage ne s'est pas anormalement dégradé ;
- que les dispositifs assurant la sécurité des usagers sont dans un état acceptable ;
- qu'il n'y a pas de désordres apparents menaçant la sécurité.

Ce contrôle peut utilement être groupé avec l'exécution de travaux d'entretien courant de l'ouvrage. Il peut également conduire à en compléter la liste.

### II.5.4. Les actions conditionnelles de surveillance :

Les actions conditionnelles de surveillance comprennent:

- les visites ou inspections exceptionnelles ou les investigations spécialisées réalisées Lors d'évènements exceptionnels : crues, glissements de terrains, orages violents, tornades, accident... ou en fonction des résultats des actions de surveillance systématiques ;
- les actions de surveillance renforcées ou de haute surveillance qui concernent des ouvrages dans un état critique. La programmation des actions conditionnelles de surveillance nécessite le conseil d'un spécialiste ouvrages d'art afin de cadrer les objectifs, les conditions de réalisation et les résultats à obtenir.

**a) Objectif :** L'objectif est de compléter les actions classiques de surveillance organisée ou de fournir des résultats utiles à la réalisation d'une étude de grosse rénovation.

**b) Champ d'application :** Ouvrages soumis ou non à inspection détaillée périodique dont certaines parties ne sont pas observables lors du contrôle périodique ou ouvrages pour lesquels des gros travaux ont été décidés ; en effet, la réalisation d'un projet de réparation nécessite souvent la réalisation de relevés complémentaires in-situ ou d'essais spécifiques sur des prélèvements de matériaux.

**c) Périodicité ou déclenchement :** Le déclenchement d'une action de surveillance conditionnelle est décidé après examen d'un procès-verbal de contrôle périodique, d'une inspection détaillée, la suite de phénomènes naturels susceptibles d'endommager un ouvrage (par exemple : crue, glissement de terrain, séisme, ...) ou cause de circonstances particulières (par exemple : ouverture d'un chantier à proximité, passage d'un convoi exceptionnel, survenue d'un accident...).

**d) Modalités :** La réalisation se fera de préférence par un prestataire spécialisé et au moyen de marchés de prestations intellectuelles. Cette action de surveillance nécessite l'intervention de personnel spécialisé et de matériel particulier.

### II.6.L'entretien :

L'entretien est celui qui, demandant peu de moyens et peu de technicité, doit être réalisé de façon régulière en étroite liaison avec la surveillance continue. Cet entretien à la charge du maître d'ouvrage doit être exécuté systématiquement pour tous les ouvrages en fonction des observations recueillies au cours de la surveillance (continue et organisée). Il concerne les domaines suivants : • Évacuation des eaux • Chaussée • Équipements [15]

#### II.6.1.Évacuation des eaux :

**a) Dégradations :** Obturation des dispositifs d'évacuation des eaux. Conséquences :

- stagnation de l'eau sur chaussée ;
- pousse de la végétation, infiltrations d'eau dans l'ouvrage ou le tablier.

**b) Interventions nécessaires :** Nettoyage périodique.

**c) Moyens nécessaires :** Crochet, balais, raclette, pelle, brouette.

**d) Modes opératoires :** Nettoyage superficiel, puis dépose des grilles et tampons pour nettoyage manuel des ouvrages. Hydro cureur (furet hydraulique).

En cas de difficultés : utilisation d'un hydro cureur (furet hydraulique). Dans ce cas, travailler de l'aval vers l'amont.



**Figure II.2 :** Nettoyage périodique

#### II.6.2.Chaussée :

##### II.6.2.1.Pont à tablier :

La chaussée d'un pont à tablier est constituée d'un revêtement en béton bitumineux mince, posé sur la chape d'étanchéité. Celle-ci garantit le bon état de l'ouvrage. Il est impératif d'éviter la moindre détérioration de la chape ; si une atteinte y a été portée, elle doit être confirmée par l'inspection d'un spécialiste en ouvrages d'art pour faire procéder à la réparation par une entreprise spécialisée.

**a) Dégradations :** Nids de poule : • arrachement localisé du revêtement.

Pelade localisée : • petits arrachements de matériaux du revêtement localisés ou généralisés.

**b) Interventions nécessaires :** Nids de poule : • nécessité d'intervention d'urgence

• bouchage provisoire éventuel par enrobés à froid, définitif par béton bitumineux à chaud.  
Pelade localisée :

• imperméabilisation par emplois partiels ou enduit général. Peut nécessiter l'exécution d'un Tapis mince ou ultra-mince,

• relève lors de l'entretien spécialisé.

**c) Moyens nécessaires :** Nids de poule : • camion ; • point à temps ; • compresseur avec bêche pneumatique • cylindre vibrant léger ; • matériaux chauds.

Pelade localisée : • camion ; • point à temps ; • signalisation de chantier ; • alternat si nécessaire.

**d) Modes opératoires :**

Nids de poule : • découper les bords du trou pour éliminer les parties endommagées sans attaquer la chape d'étanchéité ; • éliminer l'eau ; • mettre une couche d'accrochage à l'émulsion (0,8 Kg/m<sup>2</sup>) ; • remplir le trou par le matériau choisi (béton bitumineux à chaud sauf pour reprise provisoire). • Compactage.

Pelade localisée : • procéder par emplois partiels ou généralisés suivant techniques routières enduit ou tapis. Veillez à ce qu'il n'y ait pas d'excès d'émulsion, à retirer les gravillons en excès par balayage général. S'assurer que les évacuations d'eau sont en état normal de fonctionnement



**Figure II.3 :** arrachement localisé du revêtement.

### II.6.3. Trottoirs, bordures, réseaux, concessionnaires :

**a) Fonction :** les trottoirs permettent la circulation des piétons et contiennent éventuellement des réseaux, les bordures servent de fil d'eau et évitent que les véhicules ne franchissent le trottoir. Constitution : trottoirs pleins (béton maigre, sable...) ; revêtus (béton, enrobés, asphalte) ou creux couverts par des dalles.

### **b) Dégradations :** Bordures déplacées :

- chocs de véhicules, infiltrations d'eau, flexion du tablier, problème de dilatation : absence de joints secs entre éléments, chocs de véhicules, absence de jeu au droit du joint du tablier...

Affaissement, nids de poule : • dans le revêtement des trottoirs.

Dallettes cassées: • circulation de véhicules sur le trottoir, tassement des remblais, mouvements de l'ouvrage, vandalisme.

### **c) Désordres sur les réseaux :** • fuites, corrosion des supports, dégradations du calfeutrage (cas des conduites d'eau). Ces réseaux appartiennent à des concessionnaires (France Telecom, GDF, EDF syndicats des eaux).

### **d) Interventions nécessaires :** Bordures déplacées :

- mise en place d'une signalisation : • intervention d'entretien spécialisé à prévoir après analyse des causes, création d'un joint libre toutes les 3 ou 4 bordures.

Affaissement, nids de poule : • rénovation pour assurer la sécurité des piétons.

Dallettes cassées : • mise en place d'une signalisation pour les piétons et autres usagers.

La rénovation doit être précédée d'une analyse des causes.

### **e) Désordres sur les réseaux:** • alerter le concessionnaire dès l'apparition du désordre pour qu'il assure l'entretien ou la remise en conformité de son réseau.

### **f) Moyens nécessaires :** Bordures déplacées :

- alternat de circulation éventuel, fourgon, baudriers, gants, brouette, pelle, béton pour pose et calage des bordures.

Affaissement, nids de poule : • fourgon, baudriers, pelles, gants, matériaux enrobés, éventuellement bêche pneumatique.

Dallettes cassées : • alternat de circulation éventuel, fourgon, baudriers, gants.

### **g) Modes opératoires :** Bordures déplacées :

- mise en place de la signalisation de restriction de circulation ; • enlèvement de la bordure gênante ; • balisage ; • dépose des bordures puis pose avec joints libres.

Affaissement, nids de poule : • boucher et reprofiler les trottoirs après avoir déterminé la cause de la dégradation pour effectuer la réparation définitive ultérieure.

Dallettes cassées :

- mise en place d'une signalisation de la zone dangereuse pour les piétons et autres usagers;

- remplissage de sable, mise en place de planches ou de matériaux enrobés à froid en attendant le remplacement.

Désordres sur les réseaux : • intervention auprès du concessionnaire.



**Figure II.4** : intervention auprès du concessionnaire

### II.6.4. Corniches :

**a) Fonction** : permettent la fixation des garde-corps ; jouent un rôle esthétique et pour l'évacuation des eaux dans le cas des corniches-caniveaux, doivent permettre les dilatations du tablier pour les joints de chaussée et des trottoirs.

**b) Constitution** : béton, acier, aluminium. En général, elles sont préfabriquées.

**c) Dégradations** : Salissures diverses :

- sur corniches dues aux projections par les véhicules, à la pluie, aux ruissellements ;
- détérioration des joints entre éléments.

Éclats, taches de rouille : • suite au gel et à l'insuffisance d'enrobage des aciers pour les corniches en BA.

Traces de chocs : • heurts par des véhicules hors gabarit en hauteur occasionnant cassures, épaufrures ; • déplacement ; • détérioration de la fixation à la structure par chocs ou corrosion.

**d) Interventions nécessaires** : Salissures diverses :

- nettoyage car inesthétique ; • détérioration des joints entre éléments ; • colmatage du joint entre éléments (opération délicate à réaliser).

Éclats, taches de rouille :

- enlever les éclats pour qu'ils ne tombent pas sur la voie franchie ; • une visite est nécessaire chaque printemps ; • passivation et peintures des aciers apparents.

Traces de chocs ou déplacement : Si les désordres sont importants, mise en place d'une signalisation de restriction de circulation sur et sous ouvrage.

Rénovation selon l'importance des désordres :

- peu importants : rénovation de surface, enlèvement des éclats, passivation des aciers apparents, ragréage de surface ;
- importants : analyse des causes par un spécialiste en

ouvrages d'art, remplacement de l'élément. • Vérification et renforcement des fixations des autres éléments.

**e) Moyens nécessaires :** Salissures diverses : • alternat de circulation éventuel, agents, fourgon, boudriers, gants, cirés, grosses éponges, brosses pour les impuretés ; • jet, pulvérisateur ou nettoyeur moyenne pression avec dispositif d'aspiration, cuve à eau. Éclats, taches de rouille : • marteaux, balais, pelles, matériel de signalisation; • passivant pour le traitement des aciers (attention: le produit utilisé devra être compatible avec le produit de réparation du béton).

**f) Modes opératoires :** Salissures diverses : • pulvérisation eau et savon ou eau et détergent à moyenne pression (limité à 0,5 Mpa, soit 5 bars) pour ne pas dégrader les parements ; • rinçage à l'eau.

L'emploi du nettoyeur moyenne pression sera interdit lorsqu'une voie passe sous l'ouvrage (la méthode pulvérisation sera alors retenue), l'emploi de détergents sera proscrit au-dessus d'un milieu aquatique.

Éclats, taches de rouille : • faire tomber les éclats décollés. Appliquer un produit passivant pour aciers permettant d'éviter une corrosion plus importante (opération relevant de l'entretien spécialisé).



**Figure II.5 :** suite au gel et à l'insuffisance d'enrobage des aciers pour les corniches en BA.

### II.6.5. Garde-corps métalliques :

**a) Fonction :** permet d'éviter la chute des piétons mais n'est pas un dispositif de retenue pour les véhicules. Les prescriptions techniques auxquelles doit répondre le garde-corps sont indiquées dans la norme XP P 98405. On peut également consulter le fascicule « Garde-corps » du Sétra.

**b) Dégradations :** Fixation défectueuse :

- montants descellés par rupture du mortier de scellement.

Attaques de corrosion localisées : • en pied de montants et lisse inférieure par absence de ventilation ; • suite à des chocs ou à une déficience ponctuelle du dispositif anticorrosion.

Problème de dilatation : • par absence de dispositif au droit des joints de chaussée ; • par blocage par fixation de glissières ; • déformation linéaire suite à accident ; • déformation linéaire d'ensemble.

**c) Interventions nécessaires :** Fixation défectueuse : • mesure de sécurité immédiate par mise en place d'une signalisation de la zone dangereuse pour les piétons ; • intervention d'entretien spécialisé pour réparation. Attaques de corrosion localisées : • percement de trous de 10 mm de diamètre maximum à réaliser en partie inférieure des montants et de la lisse où stagne l'eau circulant dans les éléments ; • reprises localisées de peinture.

Problème de dilatation : • mettre un élément avec manchon ; • désolidariser la glissière du garde-corps et mettre un manchon sur glissière.

Déformation linéaire suite à accident :

• neutraliser la partie de trottoir au droit du garde-corps par des barrières ou rétablir sa continuité provisoirement.

Le redressage sur place même s'il semble satisfaisant ne suffit pas. Les éléments tordus ayant été fragilisés, il faut des redressements linéaires d'ensemble : • ceci peut indiquer un défaut de la structure, un décollement de bandeau, un affaissement ou un déversement. Pour analyser les causes, faire réaliser un diagnostic par un spécialiste en ouvrages d'art.

**d) Moyens nécessaires :** Corrosion localisée : • personnel compétent et suffisamment informé. Matériels nécessaires : • brosse métallique pour le décapage ; • brosse pour l'application de la peinture ; • compresseur pour le dépoussiérage ; • peinture homologuée type A (se reporter au fascicule 56 CCTG/ACQPA) ; • perceuse électrique portative pour percement.

**e) Modes opératoires :** Corrosion localisée :

• décapage par brossage des parties oxydées à mener de pair avec phosphatation ; • mise en peinture si la température est supérieure à 5° C ; • application à la brosse ; • utilisation de produits prêts à l'emploi sans diluant et respect des consignes d'utilisation ; • emploi d'un primaire adapté à un fond résiduel de rouille et la présence de vieille peinture ; • traiter par éléments entiers ou section avec arrêts francs. • déplacer l'élément.



**Figure II.6 :** Fixation défectueuse

### II.6.5. Dispositifs de retenue :

**a) Fonction :** ces barrières ou glissières ont pour but de retenir les véhicules et leur éviter la chute sur la voie franchie. Elles sont fixées à la structure pour pouvoir résister aux chocs.

**b) Dégradations :** Eléments tordus : • les désordres consécutifs à des heurts de véhicules sont les plus fréquents.

Visserie : • desserrage ou absence d'écrous ; • corrosion.

### c) Interventions nécessaires :

Éléments tordus : • mesure de sécurité immédiate (signalisation, protection provisoire). Vérification de l'état de la structure du tablier ; • changement de l'élément tordu. Si la fixation est détériorée, voir fiche d'entretien spécialisé.

Visserie : • resserrer les écrous ou remplacer les écrous manquants et les contre écrous ; • remplacer les pièces corrodées (entretien spécialisé) ; • dans tous les cas, s'assurer que les tiges de fixation sont bien scellées et qu'il n'y a pas éclatement du béton de la structure.

**d) Moyens nécessaires :** Matériel de signalisation. Matériel pour boulonnage et déboulonnage, pour percement. Matériel de remplacement.

**e) Modes opératoires :** Mise en place de la signalisation de sécurité. Mise en place, si possible, d'éléments provisoires. Démontez l'élément détérioré et le remplacez par un élément neuf. Changez la visserie manquante ou détériorée. Serrez suffisamment sans écraser l'élément.



Figure II.7 : Elément tordus

### II.6.6. Joint de chaussée :

**a) Fonction :** permet les mouvements relatifs (dilatation) entre le tablier et ses appuis ou deux éléments de structure, assure la continuité de la surface de roulement.

**b) Constitution :** joints de chaussée à composants métalliques, joints à revêtement amélioré.

**c) Attention :** les décalages dans un plan vertical ou les décalages transversaux des joints de dilatation peuvent être le signe de désordres importants de fonctionnement de la

structure. Les ouvertures anormales (ouverture totale ou butée) peuvent également être un signe de désordre grave. Pour tous ces examens, il conviendra toujours de comparer une extrémité du tablier à l'autre. Toute butée du joint dans le sens longitudinal ou transversal, la rupture d'éléments (que la butée soit due à un objet d'apport extérieur, soit du fait du fonctionnement de l'ouvrage), ou tout autre défaut visuel (usure, déformation, choc, déchirure, décollement, fissure, arrachement du remplissage), ou sonore (battement, claquement au passage des véhicules) constatés sont préjudiciables à l'intégrité du joint.

Avant toute intervention autre qu'une intervention de sécurité, il faut vérifier si le joint ne bénéficie pas d'une garantie, auquel cas il conviendra de faire revenir l'entreprise qui avait fourni et posé le joint.



**Figure II.8** : détérioration due au passage des véhicules

**d) Dégradations** : Joint de chaussée mécanique : • détérioration due au passage des véhicules • écrous ou vis desserrés, élément manquant, tassement du mortier de calage, éléments bloqués. Joint à profilé élastomère : • sortie du profilé élastomère de son logement.

**e) Interventions nécessaires** : Joints de chaussée mécaniques : • prendre des mesures de sécurité immédiate avec neutralisation d'une voie .

### II.7.LA RÉNOVATION D'UNE CHAPE D'ÉTANCHÉITÉ :

On peut avoir à intervenir pour la réparation d'une chape d'étanchéité dans les Situations suivantes.

#### II.7.1.La couche de roulement sus-jacente nécessite une reprise sur toute l'épaisseur :

Ceci implique qu'on ne peut pas se limiter à une couche de surface de quelques centimètres. La dépose de toute les couches jusqu'au support en béton de l'étanchéité constitue une opération de réfection lourde qui ne s'apparente pas véritablement à une «rénovation» au sens de ce document. A noter qu'il est, en pratique, utopique de penser pouvoir déposer une couche de roulement sans toucher à la chape d'étanchéité. Si cela se pratique parfois, il faut bien considérer que c'est peu conseillé. En effet, l'enlèvement des couches provoque des effets sur la chape d'étanchéité (griffures, efforts de cisaillement, etc.) et, en outre, il paraît intéressant de profiter de cette intervention lourde pour repartir pour une nouvelle période de vie de l'ouvrage avec une étanchéité remise à neuf. Pour l'étanchéité, il importe que le support soit adapté pour recevoir la nouvelle chape d'étanchéité prévue par le Maître d'œuvre. En particulier, pour minimiser les dégradations

sur le support en béton, il est fortement conseillé de procéder selon le phasage indiqué sur la figure.

### **II.7.2.Réparation du garde-corps :**

#### **II.7.2.1.Changement des parties accidentées des barrières :**

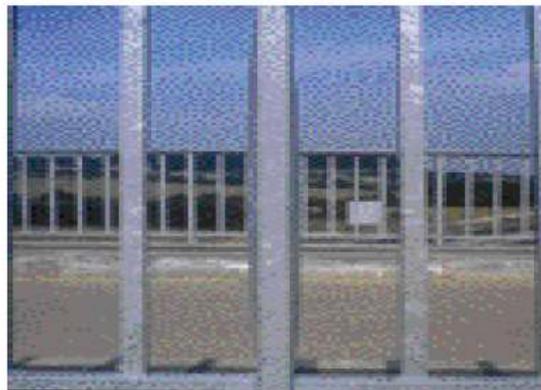
De sécurité Pour ce qui concerne les barrières, les parties accidentées doivent être changées.

#### **II.7.2.2.Montage :**

Le montage doit être fait conformément aux normes ou aux documents d'autorisation d'emploi, ce qui suppose que ces documents sont en possession du gestionnaire (travaux en régie) ou du responsable travaux de l'entreprise (travaux sur commande). Le dossier d'ouvrage doit être mis à jour de l'information relative à ces travaux et des éventuelles difficultés rencontrées ainsi que des adaptations.

#### **II.7.2.3.Rénovation des profils fermés :**

Si le garde-corps a été mal conçu, il arrive que l'eau puisse pénétrer à l'intérieur de certains profilés ou tubes constituant le garde-corps sans possibilité d'évacuation. Si le volume d'eau devient important, en cas de gel, l'expansion provoque la déformation, voire l'éclatement du profilé.



**FigureII.9** : déformation d'un profilé creux par le gel de l'eau y ayant pénétré.

#### **II.7.2.4.Rénovation ponctuelle de parties de garde-corps :**

Suite à un accident ou pour d'autres raisons, on peut être amené à reprendre une partie de ce garde corps in situ en réalisant des réparations partielles, par exemple en renforçant les pièces par soudures sur chantier. Il est très important que ces soudures soient effectuées en respectant les règles de l'art et les normes afférentes dans ce domaine. Pour l'avoir négligé lors de la reprise d'un garde-corps après un accident, le donneur d'ordre et l'exécutant ont vu leur responsabilité engagée lorsqu'un nouvel accident sur ce garde-corps a eu de graves conséquences. Ceci est également valable pour toute intervention in situ sur un garde-corps autre qu'en acier.

### II.7.3. Rénovation des barrières de sécurité :

#### II.7.3.1. Rénovation des barrières de sécurité en béton :

Dans le cas des barrières en béton, ces interventions sont effectuées sur la base des guides de rénovation des parties en béton de pont.

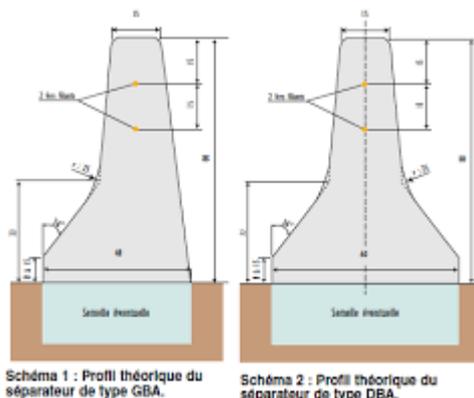


Figure II.10: principe de réparation d'une barrière GBA/DBA.

#### II.7.3.2. Rénovation des barrières de sécurité métalliques :

##### a) Rehaussement d'ancrage :

Il est possible d'envisager de tels rehaussements. Ces travaux nécessitent des précautions pour éviter des déboires ou des défauts de fonctionnement. Il faut éviter de rehausser en rallongeant les vis fusibles dans des gaines en PVC. Ceci présente les inconvénients suivants :

- Cela nécessite la fourniture de vis fusibles de longueur différente de celle de la norme. Or ces vis sont d'une qualité bien précise et non-conforme à la norme de boulonnerie sur certaines caractéristiques mécaniques. Il y a risque de mettre en place des vis non adaptées à la fonction (et surtout non-conformes à la norme). Par ailleurs, quand bien même on obtiendrait des fournitures conformes, lors des interventions en réparation, la fourniture de vis très spéciales n'est pas assurée et ne sera probablement pas faite.
- En second lieu, on observe un comportement particulier au niveau des vis fusibles car leur allongement se fait dans une partie libre du tube PVC. De ce fait, en poussant sur le support, ces tiges travaillent plus en flexion, ce qui ne donne pas le même niveau de rupture dans les vis fusibles.

Pour éviter ce phénomène, il faut que les vis soient vissées dans des douilles «rallonge

#### II.7.4. La rénovation des appareils d'appui :

##### II.7.4.1. La rénovation des appareils d'appui et de leur environnement Vérinage :

Le vérinage est l'opération qui permet de soulever le tablier d'un ouvrage d'art pour :

- un recalage des appareils d'appui ou une reprise de distorsion,

- des interventions sur la zone d'appui,
- le changement à l'identique ou le remplacement des appareils d'appui.

L'opération doit être conduite par une maîtrise d'œuvre expérimentée s'appuyant sur le réseau technique si nécessaire.

Le vérinage doit faire l'objet d'une étude spécifique par un organisme spécialisé et présentant des références vérifiées avant l'établissement du DCE. Cette étude doit comprendre un certain nombre de points, notamment :

- la vérification de l'absence de liaisons entre appui et tablier (ex : section rétrécie de béton, appareils anti-soulèvement, canalisation),
- le relevé des emplacements possibles pour les vérins et les calages de sécurité,
- la définition des types de vérins utilisables,
- la détermination des efforts à reprendre tant dans la structure que dans les vérins et les capacités de la structure à les supporter compte tenu des emplacements disponibles».

### II.8. Elément porteur à rénover :

a) **Chevêtres:** Les chevêtres des piles sont les plus touchés.

- corrosion avancée des armatures.
- détérioration du béton d'enrobage.
- fissuration multidirectionnelle du béton.
- poussée à vide des armatures d'encrage à retour d'équerre.



Figure II.11 : Dégradation du chevêtre



**Figure II.12 :** Les fissures multidirectionnelles localisées aux extrémités du chevêtre

C'est aux extrémités des chevêtres que les dégradations sont importantes ; dans leur partie médiane, Elles ne sont que très peu dégradées. Ceci s'explique par la stagnation des eaux au niveau de ces extrémités.

### b) Fûts :



**Figure II.13 :** Corrosion des armatures    **Figure II.14 :** Fissures axiales sur les fûts

La Figure 2 indique aussi les fûts en fonction de leur degré de dégradation. On observe que les fûts intermédiaires sont intacts, par contre certains fûts de rive (amont et aval) présentent des dégradations. La dégradation se manifeste sous les formes suivantes :

- fissurations parallèles, verticales et équidistantes, la position des fissures coïncide le plus souvent avec la position des aciers.
- Eclatement par endroits et début de décollement de plaques de béton.

## **Chapitre II : Rénovation d'un pont**

---

Corrosion importante des armatures observée après décapage de béton d'enrobage fissuré.

**CHAPITRE III : MATERIEIAUX  
COMPOSITES**

# Matériaux Composites

## III.1 Introduction

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de forme. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés. Ils offrent une meilleure isolation thermique et pour certains d'entre eux une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger les structures et de réaliser des formes complexes aptes à remplir plusieurs fonctions. Dans chacun des marchés d'application (bâtiment, automobiles, équipements industriels...) ces performances remarquables sont à l'origine de solutions innovantes. Les matériaux composites offrent aux industriels et aux concepteurs des possibilités nouvelles d'associer fonctions, formes et matériaux au sein de la réalisation. C'est un système de plus en plus performant. Le poids, la plurifonctionnalité sont autant d'atouts de principes de processus nouveaux de conception, d'industrialisation, qui permettent d'étendre les possibilités techniques et de mieux satisfaire des besoins parfois contradictoires (poids-fonction ...) auxquels les matériaux homogènes classiques répondent difficilement. [16]

## III.2 définitions

Dans un sens large, le mot " composite" signifie, constitué de deux ou plusieurs parties différentes. En fait l'appellation "matériau composite" ou "composite" est utilisée dans un sens beaucoup plus restrictif, qui sera précisé tout au long de ce travail. Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Et dans un sens plus précis, un matériau composite utilisé dans la réparation des structures est par définition, toute matière première comportant un renfort sous forme filamentaire et nécessite l'association intime d'au moins deux composants: le renfort et la matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser, ce qui introduit la notion d'un agent de liaison. Contrairement aux matériaux classiques dont on connaît à l'avance les caractéristiques mécaniques, celles des composites ne sont réellement connues qu'après fabrication, car on réalise en même temps, le matériau et le produit bien définis. Actuellement, les composites à matrice organique représentent plus de 99% des matériaux composites; toutefois, il existe également des composites à matrice inorganique (métalliques ou céramiques) dont la diffusion reste encore marginale. [17]

## III.3. Historique

Les matériaux composites offrent de multiples possibilités dans le domaine de la construction où ils se sont développés progressivement à partir des années 90. On peut ainsi noter les progrès de leur utilisation en Europe, au Japon et en Amérique du Nord .En effet, dans les années 1990 au Japon, de nombreux ponts en béton ont dû être renforcés

extérieurement en raison de la corrosion des aciers. Les renforts ont été appliqués sur les piles ou sur les surfaces inférieures des tabliers en utilisant des tissus pré-imprégnés à base de fibres de carbone mis en œuvre suivant la méthode de « stratification directe » décrite ci-dessus.

Suite à divers séismes, la Japan Highway Public Corporation (JHPC), société dépendant du gouvernement japonais et responsable de 6 500 km d'autoroutes à péages, a été confrontée à la destruction de nombreux ponts et il a été décidé de renforcer, à terme, la totalité des ponts gérés par cette société, ce qui a amplifié le développement et l'utilisation des matériaux composites comme méthode de renforcement. On peut ainsi citer à titre d'exemple, le renforcement par matériaux composites des ouvrages suivants : Fujimi Bridge (Tokyo, en 1993), Johetsu Shinkansen Bridge (Nigata, en 1994), ou encore le Sakawa River Bridge (Tomei Highway, en 1994) Pour ce dernier ouvrage les piles de plus de 7m de diamètre (dont certaines dépassaient 60m de hauteur) ont été renforcées. Le chantier se termina en 1998, après un an de travail durant lequel 2 tonnes de fibres de carbone furent posées.

\* Aux États-Unis :

Les recherches concernant le renforcement des structures du génie civil par matériaux composites ont été initiées suite au séisme de Loma Prieta (Californie) survenu en Octobre 1989. À partir de 1994, des tests sismiques en laboratoire, sur des maquettes d'échelles de plus en plus importantes, ont démontré l'intérêt de l'utilisation des PRF. La validation de la technique de renfort par composites collés a été suivie par le renforcement d'ouvrages réels tels que le Highway Bridge à Butler (Ohio, en 1996), le Great Western Bank Building à Sherman Oaks (Californie, en 1997) ou encore le Foulk Road Bridge à Delaware (Californie, en 1997).

\* En Europe :

Les principales applications en réhabilitation de structures sont apparues en Suisse fin 1991, puis en France à partir de 1996. En 1996, Freyssinet a renforcé le premier pont autoroutier français en remplaçant les plats collés métalliques classiques par des tissus secs et imprégnés sur place par un adhésif spécifique à base de résine époxydes, mis au point par Atofindley, compatible avec le béton et capable d'imprégner les fibres de carbone. Bien qu'initialement utilisés pour des applications en aéronautique, les PRF ont progressivement gagné le domaine du génie civil, et même si la France est loin d'égaliser l'utilisation intensive des PRF au Japon (évaluée actuellement à environ 1 million de m<sup>2</sup> par an), on estime qu'environ 40 000 m<sup>2</sup> de renforts en fibres de carbone ont été utilisés, sur le territoire national, pour le renforcement de structures en béton armé en 2007. [18]

\* Au Canada :

Au Canada les études ont été menées pour renforcer extérieurement des ponts anciens corrodés ou ne pouvant supporter l'augmentation des surcharges de calcul. Le procédé l'Hermite devient peu applicable dans ce pays, de fait de la très forte corrosion saline liée aux énormes quantités de sels répandues sur l'ensemble du réseau routier pendant la longue période hivernale. Plusieurs ouvrages ont été renforcés par cette technique, on peut citer en 1993, renforcement du pont de Calgary (Alberta) par des câbles de 6 m de long, l'objet de ce travail était essentiellement de contrôler la durabilité d'un tel renforcement; en 1995,

à Sherbrooke, renforcement par frettage à l'aide de tissus de fibres de carbone pré imprègnés de plusieurs colonnes de bâtiment dans l'enceinte de l'université, en 1996, réhabilitation du ponts Clearwater Creek (Alberta) à partir de bandes de tissus de fibres de carbone pré imprégnées ; en 1997, renforcement d'un pont âgé de 27 ans à Winnipeg (Manitoba) par pose de tissus de fibres de carbone en 1997, dans le centre de Winnipeg (Manitoba).

Une structure de toiture a été renforcée par le même procédé. Il faut noter que l'utilisation de fibres de carbone en génie civil représente aux Etats-Unis et au Canada environ 30 tonnes en 1996 et un peu moins de 50 tonnes en 1997. La croissance de ce marché devrait être supérieure à 30% par an pendant les cinq années qui suivent.

\* En Algérie :

L'application du procédé de renforcement par matériaux composites a commencé en 1999, dans la réhabilitation de quelques ouvrages d'art tels que le pont routier voûte Sidi Rachad et l'ouvrage rail PK 459 sur oued Bili Braguette (Constantine), avec le partenariat SAPTA Freyssinet-France (fourniture et pose de TEC) 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. [19]

### III.4. Généralités sur les matériaux composites

Les matériaux composites appartenant à la famille des Polymères Renforcés de Fibres (PRF) conviennent pour une gamme très étendue d'utilisations dans le domaine de la construction. Ceci s'explique notamment par la diversité des formes dans lesquelles ils peuvent se présenter : feuilles, tissus ou enveloppes préformées, lamelles pultrudées, collés sur les parois extérieures de la structure (moulage au contact), sous forme d'engravure, de profilés structuraux ou encore sous forme de barres pour le renforcement interne du béton. Dans le secteur du génie civil, deux types de produits de construction en matériaux composites sont principalement utilisés : les tissus (secs ou pré-imprégnés sous forme de feuilles), et les plats (ou lamelles). Les tissus sont collés sur site et polymérisent lors de la mise en œuvre (moulage au contact), alors que les plats sont préfabriqués (pultrusion). Cependant, ces différents types de matériaux composites ont des propriétés mécaniques proches, qui sont notamment gouvernées par le comportement (résistance et rigidité) des fibres. En effet, les PRF associent des fibres de résistance élevée à une matrice polymère qui les lie et dans laquelle elles sont noyées. Ce sont les propriétés propres à ces deux composants qui confèrent au matériau ses propriétés globales. Ces propriétés dépendent de la Fraction volumique de fibres, de leur orientation, du type de matrice utilisé, ou encore de la méthode de fabrication. Par exemple, la pultrusion permet d'introduire un pourcentage plus important de fibres, et donc d'augmenter la rigidité et la résistance du PRF. [20]

Dans le secteur du génie civil, deux types de produits de construction en matériaux composites sont principalement utilisés : les tissus (secs ou pré-imprégnés sous forme de feuilles), et les plats (ou lamelles). Les tissus sont collés sur site et polymérisent lors de la mise en œuvre (moulage au contact), alors que les plats sont préfabriqués (pultrusion).

Cependant, ces différents types de matériaux composites ont des propriétés mécaniques proches, qui sont notamment gouvernées par le comportement (résistance et rigidité) des fibres. En effet, les PRF associent des fibres de résistance élevée à une matrice polymère qui les lie et dans laquelle elles sont noyées. Ce sont les propriétés propres à ces deux qui confèrent au matériau ses propriétés globales. Ces propriétés dépendent de la fraction volumique de fibres, de leur orientation, du type de matrice utilisé, ou encore de la méthode de fabrication. Par exemple, la pultrusion permet d'introduire un pourcentage plus important de fibres, et donc d'augmenter la rigidité et la résistance du PRF.

Les fibres fournissent la résistance et la rigidité au matériau composite. Cependant la fonction mécanique du renfort doit être préalablement définie, car le positionnement de la fibre définit une direction privilégiée des caractéristiques mécaniques ; ainsi les matériaux composites sont beaucoup plus efficaces dans la direction des fibres. Il existe actuellement différents types de fibres, mais les fibres les plus utilisées dans le domaine de la construction sont les fibres de carbone, les fibres de verre, et les fibres d'aramide (dont la plus connue est le Kevlar). Chaque fibre possède des propriétés bien spécifiques qui détermineront leur emploi. Les fibres de carbone présentent un coût élevé (environ 10 fois celui des fibres de verre) mais sont néanmoins de plus en plus employées en raison de leur haut module élastique, de leur très haute résistance, de leur faible masse volumique et de leur résistance à la fatigue et aux divers effets environnementaux. Nous nous intéresserons donc plus particulièrement à ce type de fibres [21]

**Tableau.III.1: Caractéristique mécanique des quelques fibre**

	Module D'Young (GPa)	Résistance à la traction (MPa)	Allongement à la rupture (%)	Densité (g/cm <sup>2</sup> )
Fibre de verre E	70-80	2000-3500	3.5-4.5	2.5-2.6
Fibre verre C	85-90	3500-4800	4.5-5.5	2.46-2.49
Fibre carbone HM	390-760	2400-3400	0.5-0.8	1.85-1.89
Fibre carbone HR	240-280	4100-5100	1.6-1.73	1.75
Fibre Armide	62-180	3600-3800	1.9-5.5	1.44-1.47

Même si ce sont les fibres qui confèrent au PRF sa résistance et sa rigidité, la matrice joue néanmoins plusieurs rôles essentiels au bon fonctionnement du PRF : elle lie les fibres ensemble tout en les répartissant sur l'ensemble du volume du composite, elle les protège d'un environnement parfois agressif, et permet de transférer les efforts entre les différentes fibres. Un des principaux avantages des PRF réside dans leur très faible poids, la masse volumique de la matrice doit être minimisée et être inférieure à celle des fibres. Les polymères les plus utilisés sont les polyesters, en raison de leur faible coût et de leur facilité de fabrication. Les vinylesters, d'un coût plus élevé que les polyesters, sont très résistants aux acides et aux alcalins et sont donc particulièrement adaptés pour protéger les fibres de verre du milieu cimentaire en évitant les réactions acide-base (de type réaction alcali-silice) qui les détérioreraient. Les vinylesters sont donc employés pour la fabrication des barres d'armatures composites internes de certaines structures en béton. Enfin les matrices époxydes présentent de très bonnes qualités d'adhérence et sont donc largement

employées lors de l'imprégnation sur place des feuilles de PRF (technique dite du moulage au contact). Elles ont cependant un coût encore supérieur au coût des vinylesters. Finalement, les Polymères Renforcés de Fibres de Carbone (PRFC) étant les plus couramment utilisés en renfort structurel.[22]

### III.5 Les composites intelligents

#### III.5.1 Les fibres :

Les fibres couramment utilisées dans les matériaux composites sont les fibres de verre, de carbone et d'aramide. Leur géométrie monodimensionnelle unique, en plus d'être particulièrement adaptées à la réalisation du composite, procurent aux joncs et lamelles en PRF une rigidité et une résistance plus grandes que les PRF en formes tridimensionnelles. Cela est dû à la faible densité, par défauts, dans les configurations monodimensionnelles par proposition aux membres trois-dimensionnelles

#### III.5.2 Les différents types de fibres :

Les renforts se présentent le plus souvent sous forme de fibres:

- Fibres de verre (silice, alumine, etc.),
- Fibres d'aramide (kevlar: coût élevé).
- Fibres de carbone
- Fibres métalliques (bore, silice, polyamide, etc.),
- Fibres céramiques.

On utilise rarement les deux derniers types, car ils sont très onéreux

#### **a-fibre de carbone :**

Ce sont les plus utilisées pour les composites, les étapes successives de leur fabrication sont : l'oxydation (250-400 °C):La carbonatation (600 - 1300 °C), qui permet l'obtention de fibres de haute résistance (à la traction). La graphitisation (>1800°C) qui permet l'obtention de fibres à haut module (pour la flexion),le premier 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. Les fibres de carbone bénéficient de caractéristiques sans équivalent et de propriétés physiques très étendues 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):
- Bonnes conductivités thermiques et électriques,

- Grande résistance à la corrosion vis-à-vis des acides, bases, sels et des produits organiques,
- Transparence aux rayons X. [23]



Figure III.1 Tissu de fibre de carbone

### **b. Fibres de verre :**

Les fibres de verre sont élaborées à partir d'un verre fondu appelé verre textile, composé de silice ( $\text{SiO}_2$ ), alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), chaux ( $\text{CaO}$ ), magnésium ( $\text{MgO}$ ), etc. Ces produits peu coûteux, associés à des procédés assez simples d'élaboration, confèrent aux fibres de verre un excellent renfort qui les place de loin au premier rang des renforts. Les fibres de verre présentent plusieurs avantages:

- Rapport performance mécanique/prix,
- Bonne performance spécifique (pour verre R),
- Bonne adhérence avec toutes les résines (existence d'ensimages);
- Tenue température élevée (50% de la résistance conservée à  $350^\circ\text{C}$ ).
- Dilatation et conductivité thermique faibles,
- Bonnes propriétés diélectriques.



Figure III.2 Aperçu sur les fibres de verre

### c. Fibres d'aramide :

La fibre d'aramide est directement issue de la chimie organique; on l'appelle souvent Kevlar", marque d'origine de "Du Pont de Nemours", qui fut le premier producteur, On parle de poly amides aromatiques à liaisons amides dont les propriétés sont différentes des aliphatiques courants du type nylon 6-6. La fibre renfort est produite par synthèse chimique à bases températures (-10 C) et l'on opère par cristaux liquides en solution ce qui donne des molécules auto-orientées, donc une bonne tenue mécanique. Ces fibres présentent les avantages suivants:

- bonne résistance spécifique à la traction:
- très faible densité.
- dilatation thermique nulle.
- absorption des vibrations, amortissement.
- excellence résistance aux chocs et a la fatigue.
- bon comportement chimique vis-à-vis des carburants.

Mais aussi les inconvénients :

-prix élevé, faible tenue a la compression. reprise importante d'humidité (4%) nécessitant un étuvage avant imprégnation, faible adhérence avec les résines, usinabilité difficile et faible tenue au feu, décomposition a 400°C.

On note cependant deux classes de fibres qui se distinguent par leur module :

- bas module (70GPa) utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles

Haut module (130Gpa) utilisées pour les composites HIP.



Figure III .Fibres d'aramide

### d. Fibres diverses :

Si les fibres citées sont les plus utilisées, il existe néanmoins d'autres types de fibres renfort. On peut citer : Les fibres à bases de bore, carbure de bore et carbure de silicium. Elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur âme en tungstène portée à 1200°C qui sert de substrat. On obtient des fibres de 100 à 150 microns de diamètre (ce qui est supérieur au diamètre des autres fibres) mais leur prix est élevé et elles sont difficiles à mettre en œuvre (fragilité, usinage difficile, manipulations dangereuses). [24]

- Les fibres à bases de silice ou de quartz: Elles sont obtenues par fusion et utilisées surtout dans des composés à haute tenue thermique (bonnes propriétés d'ablation avec les résines phénoliques).

- \* Les fibres de polyamide ou de polyester : Elles sont utilisées parfois comme fibres de renfort dans des structures peu sollicitées.

- \* Le polyéthylène de haut module (base carbonée) permet également d'obtenir des fibres de grande rigidité, mais cette fibre reste onéreuse et sa mouillabilité difficile. [24]

### III.5.3 Les Matrices

La matrice composée elle-même d'une résine (polyester, époxy etc.), et de charges dont le but est d'améliorer les caractéristiques de cette résine tout en diminuant le coût de production. D'un point de vue mécanique l'ensemble résine-charges se comporte comme un matériau homogène et le composite est constitué de ce matériau homogène (la 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. [25]

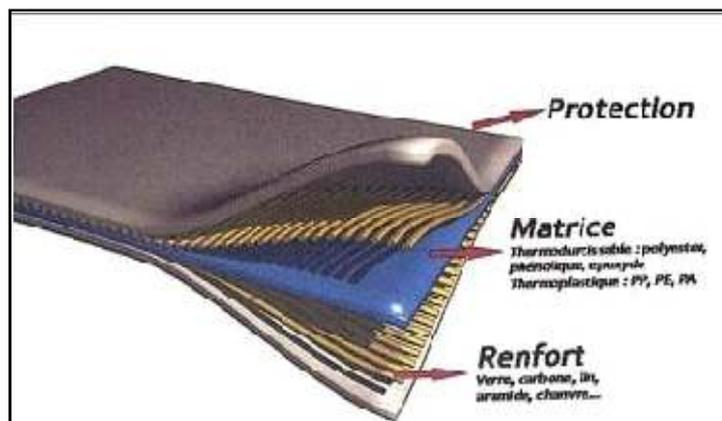


Figure III.4 : le rôle de la matrice

### III.5.3.1. Les résine :

#### III.5.3.1.1 Différents types de résines

Les résines utilisées dans les matériaux composites ont pour rôle de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de les protéger de l'environnement extérieur, les résines doivent donc être assez déformables et présentent une bonne compatibilité avec les fibres. En outre elles doivent avoir une masse volumique, et des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées. Compte tenu des contraintes, les résines utilisées sont des polymères modifiés[26] par différents adjuvants et additifs (agents de démoulage stabilisant etc.), les résines sont livrées en solution sous forme de polymères en suspension dans des solvants. Deux grandes familles de résines polymères existent: les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables. Ces deux types de résines possèdent, la faculté de pouvoir être moulés ou mises en forme pour donner, soit un produit fini soit un produit semi-fini dont la forme peut être modifiée. Les résines thermodurcissables (TD) sont associées à des fibres longues, leur structure a la forme d'un réseau tridimensionnel qui se pontent (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme, de façon définitive lors d'un échauffement (la transformation est donc irréversible). Ces résines conduisent à une structure géométrique qui ne peut être détruite que par un apport important d'énergie thermique, ainsi, elles possèdent des propriétés mécaniques et surtout thermomécaniques plus élevées que les résines thermo-plastiques. Du fait de ces caractéristiques plus élevées, les résines thermodurcissables sont les plus employées actuellement dans la mise en œuvre des matériaux composites, parmi ceux qui sont les plus utilisées : [27]

Pour les résines polyesters insaturées, ce sont des résines les plus utilisées dans les composites de grande application. Elles passent successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible. La réaction du durcissement dépend de la réactivité de la résine, et de la forme de l'objet fabriqué (épaisseur, etc.). Suivant leur module d'élasticité, les résines polyesters sont classés en: résines souples, résines semi-rigides et résines rigides. Les résines habituellement utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont de type rigide,

Leurs avantages sont:

- bonne rigidité résultant d'un module d'élasticité assez élevée.
  - une bonne stabilité dimensionnelle.
  - une facilité de mise en œuvre.
  - un faible coût de production.
  - une bonne tenue chimique.
- Une bonne résistance chimique aux hydrocarbures (essence, fuel, etc.).

Et leurs inconvénients sont:

- Emission d'éléments polluants
- inflammabilité.
- une dégradation à la lumière rayons ultraviolets.
- une mauvaise tenue à la vapeur

Les époxydes sont les plus utilisés après les résines polyesters insaturées, du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, ces résines époxydes sont généralement utilisés sans charges ou additifs, ce sont des matrices de composites à haute performance (la construction aéronautique spatial, missiles, etc.). Toutefois pour bénéficier réellement de ces performances, il est nécessaire d'avoir des durées de transformation et surtout de recuisons très longues, correspondants à des températures relativement élevées de l'ordre de 100°C.

Les avantages sont :

- une adhérence parfaite sur les fibres.
- une bonne propriété mécanique (en traction, flexion, compression, choc, et fluage, etc.), supérieure à celles des polyesters.
- une mise en œuvre facile, sans apport de solvant.
- une bonne tenue thermique, chimique et à la fatigue.

• **ses inconvénients:**

- coût élevé.
- temps de polymérisation long.
- vieillissement sous température.
- sensibilité à l'humidité et aux rayons ultra-violets.
- nécessité de prendre des précautions lors de la mise en œuvre.

• **les résines vinylesters:** Elles sont considérées comme des variantes de polyesters, qui se produisent à partir d'acide acryliques, elles possèdent une bonne résistance à la fatigue et un excellent comportement à la corrosion, mais demeurent combustibles. Les résines phénoliques, se caractérisent par une bonne tenue au feu sans fumée, elles restent fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à colorer et mettre en œuvre. Aussi, les résines polyuréthanes et polyurées. Dans la fabrication des pièces composites, il est utilisé surtout des formules, dont la faible viscosité permet un bon remplissage du moule, les constituants sont livrés à l'état de pré polymères liquides.

• **Poly-imides :** Ces résines sont surtout utilisées dans les composites à haute performance pour leur stabilité à haute température (de l'ordre de 250°C), elles restent toutefois difficiles à mettre en œuvre utilisées essentiellement dans les pièces de structure pour les réacteurs.

• **Bismaléimides:** Ces des matrices très peu utilisées, elles offrent une bonne tenue à la fois au choc et à la température, mais restent difficiles à mettre en œuvre, elles sont utilisées comme support dans les circuits imprimés.

**b- les résines thermoplastiques (TP):**

La famille des résines thermoplastiques est très vaste, et peut être séparée en plastique de grande diffusion et plastique technique. Les plastiques de grande diffusion sont mises en

œuvre par injection pour obtenir des objets moulés, soit par extension pour obtenir des films, des plaques, des tubes, des profilés, etc.

Les plastiques sont généralement mis en œuvre par injection. Les résines thermoplastiques possèdent la propriété de pouvoir être mises en forme plusieurs fois par chauffage, et par refroidissement successifs, donc elles peuvent être récupérées et facilement recyclées.

La structure de ces résines a la forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour mettre en forme (les chaînes se plient) et les refroidir pour les fixer. Les principales résines thermoplastiques utilisées sont les suivantes:

- polyamide: une bonne tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures.

- poly téréphtalate éthylénique et butylique: bonne rigidité.

- polycarbonate: une bonne tenue au choc.

Polysulfures de phényles: une résistance à l'hydrolyse.

- polyoxyméthylènes: une bonne tenue à la fatigue.

- polysulfurés: une bonne stabilité chimique.

- polypropylène: assez stable en température, mais combustible.

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

Ces diverses résines peuvent être renforcées par des fibres courtes, cependant dans le domaine des composites ces résines ont un développement limité du fait de la nécessité de faire appel à des transformations à haute température de produits solides.

### **III.5.3.2 Les charges et additifs :**

Il est désigné sous le nom général de charge ou additif toute substance inerte, minérale, ou végétale qui incorporée à la résine, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface, de réduire le prix de revient du matériau transformé ou de faciliter la mise en œuvre du matériau composite. À l'inverse des matrices thermoplastiques (TP), les matrices thermodurcissables (TD) contiennent toujours des charges de nature et de forme variées, à des taux souvent élevés pouvant atteindre 60% en termes de masse. Pour une résine donnée, le choix des charges ou des additifs est déterminé en fonction des modifications recherchées, d'une manière générale ce choix devra satisfaire un certain nombre d'exigences:

- compatibilité avec la résine de base.

- uniformité de qualité et de granulométrie.

- faible action abrasive.

- bas prix de revient.

a- les charges: Il y a plusieurs types de charges: Les charges organiques:

Les charges cellulosiques utilisées comme étant des charges de résines thermodurcissables. Ces avantages sont d'un coût peu élevé et d'une faible densité.

• les charges minérales: Sont les craies et les carbonates: Les craies sont à 99% de calcite, de la silice et d'autres minéraux, Les carbonates de calcium ou de magnésium, sont utilisés comme des charges et aussi comme des retardateurs de flamme.

• Oxydes et hydrates métalliques:

• Poudre et micro sphères: L'alumine, les oxydes de zinc, de magnésium et de titane sont utilisés sous forme de poudre fine.

Ils permettent de diminuer le prix de revient et augmenter la densité de la matière élastique.

• Alumine et tri hydrate d'aluminium:

L'alumine apporte aux résines une meilleure résistivité électrique ainsi qu'une bonne conductivité thermique, elle diminue le coefficient de dilatation thermique, augmente l'rigidité ainsi que la résistance à l'abrasion et au feu. L'hydrate d'aluminium est une charge qui du point de vue prix, est concurrentielle, elle réduit l'inflammabilité ainsi que l'émission de fumées de combustion.

Trioxyde d'antimoine: Il apporte aux résines une coloration blanche.

• Les céramiques: Il existe des microsphères en céramique dont la densité varie entre 0.4 et 2.4 et la dimension au-delà de 300 µm.

Elle apporte une réduction de masse de 15 à 25% avec une amélioration de la résistance à la compression et au choc.

• Le verre:

- poudres de verre : Une nouvelle variété de poudre de verre de granulométrie de 13 µm, son incorporation confère aux thermodurcissables une meilleure résistance à l'abrasion et à la compression, elle permet par ailleurs d'obtenir un retrait plus faible et plus homogène des pièces mouillées. billes de verre creuses: Sont obtenues par chauffage de billes de verre contenant un agent dégonflement, elles améliorent la résistance à la pénétration de l'eau et au vieillissement

- microsphères de verre: l'utilisation de microsphères de verre permet de réduire de 25 à 35% la masse des pièces obtenues (destinées à l'industrie d'automobiles)

Le carbone: Le carbone est utilisé depuis très longtemps dans l'industrie des plastiques à la fois colorant, barrière anti-ultraviolet, et antioxydant, il améliore la résistance à la chaleur,

b- Les Additifs: Les additifs se trouvent en faible quantité, quelques pourcentages de moins, par contre les charges peuvent atteindre des dizaines de pourcentage et interviennent comme étant: • Lubrifiants et agents de démoulage: Ces agents ont pour objet de faciliter le façonnage de la résine et de réduire la tendance de la résine à adhérer aux moules.

•pigments et colorants:Les pigments sont des produits insolubles, se présentent sous forme de poudres ou de paillettes généralement, Ils sont obtenus à partir d'oxydes ou de sels métalliques.

A partir de ces pigments, il est également possible d'obtenir des pâtes colorantes, constitué dedispersions de pigment dans une pâte de manière à avoir une utilisation aisée.Les colorants sont des composés organiques solubles dans l'eau ou dans un solvant organique,leur emploi est généralement limité, à savoir sa mauvaise tenue chimique et thermique.Le choix de ces agents est fonction de sa compatibilité avec la résine du composite et del'utilisation du matériau composite.

### • Agents anti-retrait et agents de fluage:

Ces agents peuvent aboutir à un mauvais état de surface, un gauchissement ou desmicrofissurations de la pièce moulée, bien que l'incorati des charges à la résine en limitée retrait; il est souvent nécessaire d'ajouter des produits spécifiques anti-retrait (additif appelé "lowshrink") qui diminuent ou annulent le phénomène de retrait. Ces produits améliorent également l'écoulement de la matière dans certaines techniques de moulage.Ces agents anti-retrait sont généralement des produits à base de thermoplastiques ou d'élastomères, se présentent sous forme de poudre ou de solution.

### • Agents anti-ultraviolets:

Les agents anti-ultraviolets ont pour fonction de protéger les résines des rayons ultraviolets. Le principe de ces agents est d'absorber le rayonnement ultraviolet et éviter ainsi la détérioration prématurée de la résine par rupture de liaisons atomiques ou par passage à un état excité qui favorise l'oxydation. [28]

## III.6 les techniques de mise en œuvre :

Il existe différentes techniques de mise en œuvre des renforts en matériaux composites sur un substrat béton:Mise en œuvre par moulage au sac : Ce procédé permet d'obtenir des caractéristiques mécaniques élevées à court terme. Après avoir ragréé la surface de béton (sablage, application d'un mortier polymère), les couches de tissus pré-imprégnées sont découpées et appliquées sur la zone à renforcer.

Une couverture chauffante est ensuite appliquée sur la surface des tissus et une enveloppe étanche, raccordée à une pompe à vide, permet d'appliquer une pression externe pendant toute la durée de polymérisation ou de polycondensation.Mise en œuvre par stratification directe (ou moulage au contact): Cette fois lapolymérisation se fait à température ambiante (le renfort atteint sa résistancetotale au bout d'une semaine) selon les étapes suivantes : - préparation de surface du béton

- (éventuellement) application d'une couche primaire d'imprégnation
- dépose des tissus (aux dimensions voulues) - imprégnation et marouflage desRenforts
- (éventuellement) application d'une couche de protectionCollage de plaques composites (technique dite du double encollage):Cette méthode consiste à coller des plats composites

sur la surface à renforcer à l'aide d'une colle époxyde. Les plats sont généralement en carbone ou en verre époxy et fabriqués par pultrusion. Les étapes à respecter sont les suivantes :

- traitement de surface du substrat béton par sablage, par eau ou sous pression et meulage
- nettoyage de la surface traitée par un dépoussiérage
  
- application d'une couche du polymère époxyde (colle) sur la surface nettoyée. nettoyage à l'acétone de la surface du plat à encoller
- application d'une couche du polymère époxyde (colle) sur le plat composite
- mise en pression du plat sur le support béton (recouvert de la première couche du polymère époxyde) et retrait de l'excédent de colle
- mise en pression du joint collé par marouflage du plat, permettant d'enlever les éventuelles bulles d'air et assurer ainsi une bonne adhérence. [29]

<b>CHAPITRE IV :</b> <b>NUMIRIQUE</b>	<b>ANALYSE</b>
--	----------------

## Analyse numérique

### IV.1. Logiciel de modélisation

#### IV.1.1. Introduction

Toutes descriptions de phénomènes physiques fait largement appel au langage et aux concepts des mathématiques tels que les équations différentielles ou plus généralement les équations aux dérivées partielles. La résolution de ces dernières occupe une place importante en ingénierie et en mathématiques appliquées. Chacune de ces disciplines apporte une contribution différente mais complémentaire à la compréhension et à la résolution de tels problèmes. Il existe plusieurs techniques permettant de résoudre les équations aux dérivées partielles. On pense par exemple à la méthode des éléments finis qui est la plus répandue. Cette popularité n'est pas sans fondement. La méthode des éléments finis est très générale et possède une base mathématique rigoureuse qui est fort utile, même sur le plan pratique. En effet, cette base mathématique permet de prévoir jusqu'à un certain point la précision de notre approximation et même d'améliorer cette précision, via les méthodes adaptatives. Dans ce chapitre nous présentons d'une manière générale le concept de base de la méthode des éléments finis pour l'analyse des structures.

#### IV.1.2- Présentation du logiciel

ANSYS est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique. L'entreprise a son siège à Canonsburg en Pennsylvanie (États-Unis). Ses produits majeurs sont des logiciels qui mettent en œuvre la méthode des éléments finis, afin de résoudre des modèles préalablement discrétisés. La fiabilité des résultats résulte de la variété des modèles de matériaux disponibles, de la qualité de la bibliothèque d'éléments, de la robustesse des algorithmes de résolution et de la possibilité de modéliser n'importe quel type de produit. Le confort et la facilité d'utilisation du logiciel permet de se concentrer sur la partie la plus importante du processus de simulation, c'est à dire l'interprétation des résultats. Les outils intégrés au logiciel permettent de résoudre les problèmes de validations produits de manière efficace. Ils permettent d'optimiser le processus de conception (gain de temps énorme) et donc de proposer des produits plus innovants (intégration d'une pré-analyse dans le cycle de conception), de qualité plus élevée tout en minimisant les coûts. En effet, intégrer l'Analyse de conception, c'est permettre de décupler ses capacités d'innovation et de prendre une réelle avance technologique. L'outil de simulation se présente sous plusieurs niveaux de licences. Les logiciels de calculs par éléments finis sont généralement peu accessibles car ils nécessitent des connaissances dans le calcul. L'interface "Workbench", qui encapsule les différents niveaux de l'outil de simulation et ses modules a été conçue pour être utilisée sans avoir une formation basée sur les éléments finis.

L'interface est très intuitive, elle permet une prise en main très rapide du logiciel. Les difficultés des calculs par éléments finis sont ici gommées, notamment par l'automatisation de la reconnaissance des zones de contacts et la génération du maillage. [30]

### IV.1.3 Principaux produits et capacités [31]

- ✓ **ANSYS Structural** : Ce produit permet d'effectuer des simulations mécaniques en calculant les structures. Ses principales capacités sont : (1) l'analyse statique, (2) l'analyse modale, (3) l'analyse harmonique (réponse forcée), (4) l'analyse temporelle ou transitoire, (5) la gestion de différentes situations non linéaires (contacts, plasticité des matériaux, grands déplacements ou grandes déformations).
- ✓ **ANSYS Mechanical** : Ce produit dispose des mêmes capacités qu'ANSYS structural, en y ajoutant notamment une solution thermique, avec modélisation au rayonnement.
- ✓ **ANSYS CFX et Fluent** : Ces deux logiciels permettent d'effectuer des simulations en matière de la 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.
- ✓ **ANSYS AUTODYN et ANSYS LS-DYNA** : Ces logiciels possèdent des solutions 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.
- ✓ **ANSYS Electromagnetics**: Ce produit permet de résoudre des modélisations mettant en jeu des phénomènes électromagnétiques.
- ✓ **ANSYS Multiphysics**: Ce produit rassemble l'ensemble des capacités d'ANSYS en matière de simulation numérique implicite.

### IV. 1.4- Plateformes ou environnements du logiciel

Deux environnements permettent de mettre en œuvre le code ANSYS : [31]

- ✓ **ANSYS classique** : Chronologiquement, c'est la première solution de ce logiciel qui est développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques. À partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en se basant sur les commandes disponibles dans le code ANSYS. Il est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.
- ✓ **ANSYS Workbench**: Cette plateforme 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 pièce) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul. Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. 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 génère reste néanmoins manipulable en insérant des commandes propres au code ANSYS.

### IV.1.5. Organisation de logiciel ANSYS :

Il y a deux niveaux primaires dans le programme d'ANSYS : [31][32]

- Passage dans et hors d'ANSYS et de plate-forme : pour utiliser ce globales telles que le titre de travail changeant, etc.
- Processeur de niveau : Ce niveau contient les processeurs (préprocesseur, solution. post processeur, etc.) qui sont employés pour réaliser des analyses par éléments finis.

### IV.1.6- AnsysMechanical APDL:

#### IV. 1.6.1- Analyses MEF par AnsysMechanical 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 a 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, lanens que les professionnels de l'ingénierie apprécieront la compréhension approfondie presence 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. [37]

#### IV.1.6.2- L'avantage de choisir APDL :

Naviguez 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 avantage d'utiliser le produit APDL par apport à 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. [38][39]

## IV.2.Présentation générale de la Méthode des éléments finis

### IV.2.1. Introduction

Pour analyser un phénomène naturel en générale ou un problème d'ingénierie en particulier, on est souvent amené à développer un modèle mathématique pouvant décrire

d'une manière aussi fiable que possible le problème en question. Le développement d'un modèle mathématique s'appuie généralement sur quelques postulats de base et plusieurs hypothèses simplificatrices pour aboutir à des équations gouvernantes qui sont souvent des équations différentielles auxquelles sont ajoutées des conditions aux limites. La résolution analytique d'équations différentielles pose parfois des difficultés insurmontables et une solution exacte décrivant bien le problème étudié n'est pas toujours facile à trouver. Le recours aux modèles physiques et à la simulation expérimentale pour la recherche d'une solution analogue à la solution recherchée peut s'avérer coûteux en temps et en moyens.

La méthode des éléments finis est l'une des techniques numériques les plus puissantes. L'un des avantages majeurs de cette méthode est le fait qu'elle offre la possibilité de développer un programme permettant de résoudre des problèmes. En particulier, toute forme complexe a un domaine géométrique où un problème bien posé avec toutes les conditions aux limites, peut être facilement traité par la méthode des éléments finis. Cette méthode consiste à diviser le domaine physique à traiter en plusieurs sous domaines appelés éléments finis à dimensions non infinitésimales. La solution recherchée est remplacée dans chaque élément par une approximation avec des polynômes simples et le domaine peut ensuite être reconstitué avec l'assemblage ou sommation de tous les éléments.

### IV.2.2. Bref historique

L'idée fondamentale derrière la méthode des éléments finis remonte loin en arrière. Les grecs par exemple avaient reconnu que l'on peut approcher la solution d'un problème complexe en le divisant en problèmes plus simples. On peut par exemple approcher le périmètre d'un cercle en calculant le périmètre d'un polygone à  $n$  côtés, pourvu que  $n$  soit suffisamment grand. Il suffit alors de connaître la longueur d'un segment de droite, problème beaucoup plus simple que celui de la longueur d'un arc de cercle. Et donc l'appellation éléments finis vient de la décomposition du domaine d'étude en éléments qui sont souvent représentés par un maillage. L'application de la solution des équations aux dérivées partielles est évidemment plus récente, Robert Courant [33] a introduit le concept de formulation variationnelle en 1943, avec des fonctions de base à support locaux ouvrant la voie à une division d'un domaine considéré en 'élément', qui est à la base de toute méthode d'éléments finis. Pour la méthode de Ritz, [34] on part d'un problème posé dans un espace de dimension infinie. On approche ensuite la solution du problème initial en cherchant une solution dans une suite croissante de sous-espaces de dimensions finies. Ces problèmes sont en général beaucoup plus faciles à résoudre. On peut de plus espérer que la solution du problème en dimension infinie peut être obtenue par un passage à la limite. Le choix des fonctions de base constituant ces espaces de dimension finie est délicat et initialement on les construisait globalement sur le domaine.

C'est Courant qui eut l'idée d'introduire des fonctions à support local qui simplifient grandement leur construction. Cependant ce n'est qu'avec le développement des ordinateurs que ces travaux trouvent leurs applications avec les travaux pionniers de Zienkiewicz et Argyris qui définirent la méthode en 1960. Par la suite, l'apport du calcul matriciel introduit par un ingénieur civil anonyme, amène le succès de la méthode et sa puissance. La méthode connaît alors un développement fulgurant accompagné par les progrès de l'informatique. La méthode des éléments finis est une méthode puissante basée sur une théorie mathématique rigoureuse. [35]

### IV.2.3. Codes de calcul

Les codes des éléments finis font maintenant partie des outils couramment utilisés lors de la conception et à l'analyse des produits industriels. Si l'utilisation de la méthode se démocratise de par la simplicité croissant de mise en œuvre, la fiabilité des algorithmes et la robustesse de la méthode, il reste néanmoins des questions essentielles auxquelles l'ingénieur devra répondre s'il veut effectuer une analyse par éléments finis dans de bonnes conditions:

- ✓ Formaliser les non-dits et les réflexions qui justifient les choix explicites ou implicites de son analyse du problème.
- ✓ évaluer la confiance qu'il accorde aux résultats produits.
- ✓ analyser les conséquences de ces résultats par rapport aux objectifs visés.

Les principes de cette méthode seront utiles pour maîtriser les deux principales difficultés de mise au point d'un modèle numérique :

- ✓ problèmes préliminaires à la phase de calcul.
- ✓ problèmes liés à l'exploitation des résultats et le retour à la conception.

Il ne faut pas perdre de vue que l'analyse des résultats nécessite une bonne compréhension des différentes étapes mathématiques utilisées lorsqu'on effectue une approximation, pour pouvoir estimer l'erreur du modèle numérique. Sans oublier que le modèle numérique ne peut fournir que des résultats relatifs aux informations contenues dans le modèle mathématique qui découle des hypothèses de modélisation. Nous nous limiterons à la présentation de modèles élémentaires utilisés dans le cadre des théories linéaires. Bien que simples ces modèles permettent déjà de traiter un grand nombre d'applications liées aux problèmes de l'ingénieur.

### IV.2.4. Utilisation de la MEF :

On utilise la méthode des éléments finis dans plusieurs disciplines, comme :

- ✓ Génie mécanique.
- ✓ Génie civil.
- ✓ Domaines de transport.
- ✓ Aéronautique.
- ✓ Spatial.
- ✓ Nucléaire.
- ✓ Energétique.

### Génie militaire.

### IV.2.5. Problèmes d'équilibre (Système discret) :

Pour un système discret (système de ressorts, réseaux électriques, réseaux hydrauliques...). les équations de comportement peuvent en général s'écrire sous la forme matricielle suivante :  $[K] \{U\} = \{F\}$

$[K]$  -Matrice caractérisant le système

$\{U\}$  -Variables inconnues du problème.

DDL - Degré De Liberté

DOF - Degré Of Freedom

{F} - sollicitations connues (second membre).

### IV.2.6. Principes de la MEF:

La MEF est basée sur une idée simple : subdiviser (discrétiser) une forme complexe en un grand nombre de sous-domaines interconnectés en des points appelés nœud.

La considération du comportement mécanique de chaque élément, ces éléments sont assemblés de telle façon que l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements soient satisfaits en chaque nœud.

La MEF des approximations simples des variables pour transformer les équations aux dérivées équations algébriques. Les nœuds et les éléments sont basés sur des considérations de précision de l'approximation. [30]

### IV.2.7. Étapes logiques du calcul par MEF :

1. Définir les nœuds et les éléments (Créer le maillage).
2. Pour chaque élément, établir la matrice de rigidité élémentaire  $[K]$  reliant les degrés de liberté (déplacements) nodaux  $\{u\}$  et les forces  $\{f\}$  appliquées aux nœuds :  $[k_e]\{u_e\} = \{f_e\}$
3. Assembler les matrices et les vecteurs élémentaires en un système global  $[K] \{U\} = \{F\}$  de manière à satisfaire les conditions d'équilibre aux nœuds.
4. Modifier le système global en tenant compte des conditions aux limites.
5. Résoudre le système  $[K] \{U\} = \{F\}$  et obtenir les déplacements  $\{U\}$  aux nœuds.
6. Calculer les gradients (flux de chaleur, déformations et contraintes) dans les éléments à réactions aux nœuds sur lesquels les conditions aux limites sont imposées. [30]

### IV.2.8. Caractéristique d'un élément fini

Un découpage, artificiel d'un milieu continu, en éléments finis permet, d'isoler un élément fini pour l'étudier et en établir les caractéristiques. L'identification d'un élément fini comprend les points suivants.

- Géométrie : un élément fini peut être segment de droite ou de courbe, triangle ou quadrilatère (plan ou courbe), tétraèdre, prismes ou hexaèdre. Les frontières entre éléments peuvent être respectivement des points, des segments de droite ou de courbes, des faces planes ou courbes.

- Matériau : le matériau d'élément est défini par une loi de comportement (loi de Hooke isotrope, etc.)

- Nœuds les nœuds définissent la géométrie et assurent la connexion des éléments les uns aux autres. Ils occupent les sommets, les extrémités, les milieux des arêtes et faces, etc. on y choisit et définit les degrés de liberté du problème.

- Degrés de liberté : la fonction d'approximation choisie (en général le champ déplacement) est exprimé en fonction des valeurs particulières qu'elles prennent aux nœuds communs des

différents éléments adjacents, permet de reconstituer la solution complète (assemblage) tout veillant à respecter certains règles, dite critère de convergence.

Forces nodales : à travers les nœuds transitent des forces associées aux degrés de liberté. Ces paramètres d'identification permettent d'identifier les deux caractéristique clés d'un élément fini qui sont sa matrice de rigidité et son vecteur force. [30]

### IV.2.9. Etapes pratiques du calcul par MEF:

Organisation générale d'un code de calcul : [30]

- Pré-processeur
- Solveur
- Post-processeur

#### Pré- processeur:

- ✓ 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.

#### Solveur:

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

#### Post-processeur:

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

### IV.3. Conclusion :

Le problème du choix de la schématisation doit permettre, au moyen de calculs mathématiques, de comprendre les phénomènes observés et de prévoir ceux à venir. La finesse de la modélisation à retenir dépend des moyens que l'on est capable, mais aussi disposé, à mettre en œuvre pour effectuer les mesures expérimentales qui seront comparées

aux résultats théoriques obtenus par les calculs. La modélisation mathématique du comportement mécanique d'un matériau ou d'une structure peut servir à expliquer certains mécanismes caractéristiques de ruine comme le flambage ou le cisaillement (en liaison avec ses propriétés mécaniques). La modélisation peut également permettre de déterminer, par exemple, les zones de concentrations de contraintes ou de déformation et par là, d'étudier le phénomène de ruine du matériau étudié. Cette présentation de la MEF nous facilite la modélisation numérique des plaques. En même temps l'utilisation d'un élément finis rectangulaire, nous a permis d'estimer la matrice de rigidité élémentaire ainsi que la matrice des forces.

**CHAPITRE V :**  
**RESULTAS DESCUTION**

## Résultats et Discussions

### V.1 Introduction

L'analyse modale du pont renforcé par composite avec le 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 Présentation du cas d'étude

Le projet est situé sur la route nationale RN20 PK36+500 reliant Constantine à Guelma et franchissant un Oued important. Classée selon le RPOA 2008 dans la zone IIb. Il s'agit un ouvrage en béton armé d'une seule travée isostatique de longueur 27.5m. Le tablier est composé de quatre poutres (04) principales en béton armé, de hauteur 2m et de longueur totale 27.5m chacune, la poutre est composée d'une section rectangulaire et d'un talon à sa partie inférieure. L'entraxe des poutres est 2.5m, les quatre (04) poutres sont solidarisiées par une dalle de couverture et des entretoises d'about et intermédiaires en béton armé. Le tablier (poutres, dalle et entretoises) est de type coulée sur place et repose sur deux culée en maçonnerie (Figure V.1).



Figure V.1 Pont du pont à réparer

Le pont nécessite des renforcements et/ou réparations, vu les anomalies et dégradations, dans plusieurs endroits, qu'il présente (Figure V.2).



Figure V.2 Dégradations aux niveaux des poutres du pont

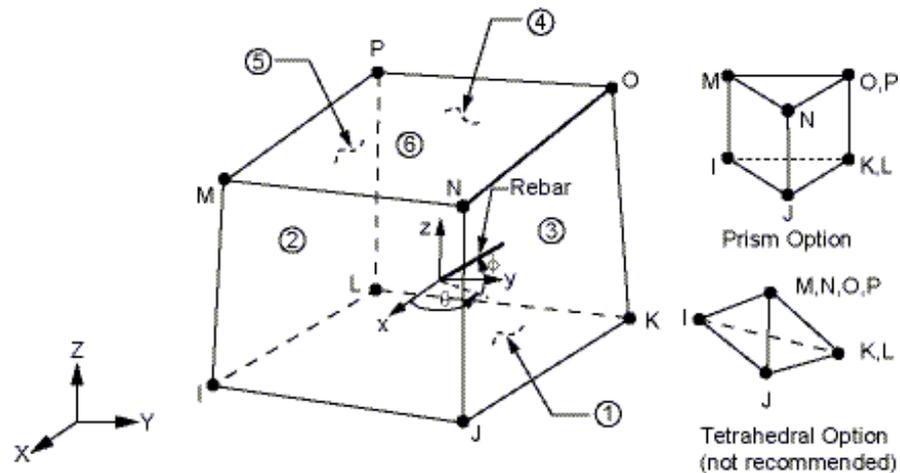
Les remèdes consistent à appliquer des composites à base de fibres de carbone sur les parties dégradées et plus particulièrement sur les faces inférieures en traction des poutres. Pour cela, nous avons établi des calculs préalables pour déterminer le comportement de la structure réparée et ce, avant et après l'application des CFRP collés.

### V.3 Modélisation de pont sans renforcement

#### V.3.1. Propriétés des matériaux :

##### 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 (Figure 36). L'élément est capable de subir une déformation plastique et de se fissurer dans les trois directions [15].



**Figure V.3** : Schéma du Solid 65 à 3D .

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

- Module d'élasticité ( $E_c$ )
- Coefficient de poisson ( $\nu$ )
- Densité ( $\rho$ )

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 1 : Propriétés du béton armé

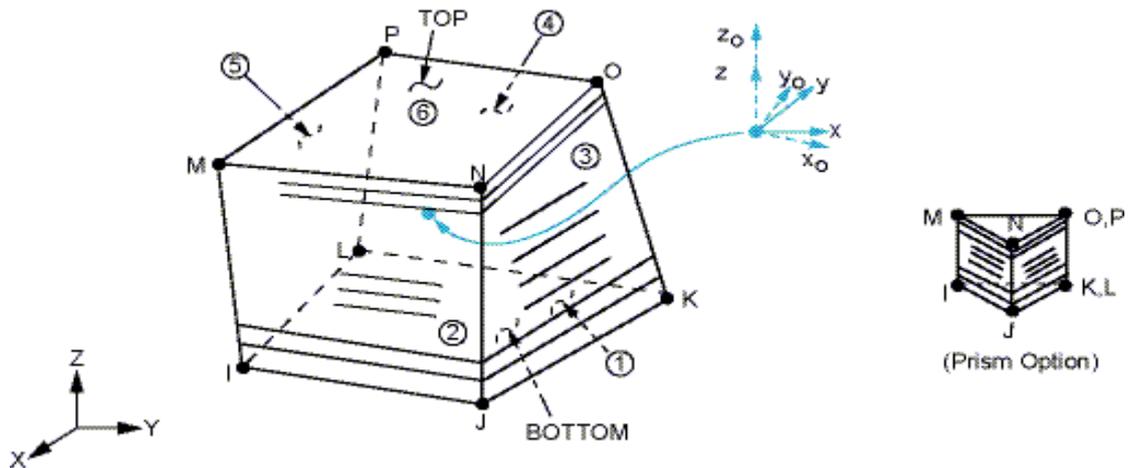
<b>Module d'élasticité (<math>E_c</math>)</b>	32000Mpa
<b>Coefficient de poisson (<math>\nu</math>)</b>	0.2

<b>Densité (<math>\rho</math>)</b>	2500m <sup>3</sup>
------------------------------------	--------------------

**2- les 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].

Pour les deux modèles (modélisation de pont par matériaux composites traditionnels et



**FigureV.4 : Solid 185 à 3D [15]**

modélisation de pont par nano composites) les propriétés des renforts sont identique mais la différence est dans la résine époxydique comme suite :

**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 .

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 2 : Propriétés de CarboDur S1512**

<b>Module d'élasticité (<math>E_c</math>)</b>	170000Mpa
<b>Coefficient de poisson (<math>\nu</math>)</b>	0.3
<b>Densité (<math>\delta</math>)</b>	1600 Kg/m <sup>3</sup>

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 V.3 : Propriétés de la résine Sikadur-30**

<b>Module d'élasticité (<math>E_c</math>)</b>	9600Mpa
<b>Coefficient de poisson (<math>\nu</math>)</b>	0.4
<b>Densité (<math>\delta</math>)</b>	1650 Kg/m <sup>3</sup>

#### **IV.8.2.2- Renforcement par tissu :**

Les tissus de la gamme SikaWrap sont principalement utilisés en tant que renfort d'éléments de structures travaillant à l'effort tranchant (poutres), à la compression (confinement de poteau). Ils peuvent aussi être utilisés en tant que renfort d'éléments de structures travaillant en flexion (dalles, poutres) [36], c'est pour ça que dans notre cas nous utiliserons les tissus SikaWrap pour le renforcement des poteaux de rive de la structure. -

##### **a) Les tissus SikaWrap -600 C :**

Le renfort composite PRFC, fabriqué in situ, est réalisé en associant un tissu SikaWrap marouflé dans une résine Sikadur bien définie. Chaque tissu doit donc être utilisé avec la résine spécifiée, le système ainsi formé ne peut faire l'objet d'aucune modification car les performances du PRFC dépendent à la fois du tissu et de la résine d'imprégnation. Le tissu dit « lourd » SikaWrap-600 C est un tissu unidirectionnel de fibres de carbone assemblées par couture, applicable après imprégnation du support et du tissu.com application se fait « par voie humide».[36]

Tableau V.4: Propriétés de Sika Wrap -600 C

<b>Module d'élasticité (<math>E_c</math>)</b>	2350000
<b>Coefficient de poisson (<math>\nu</math>)</b>	0.3
<b>Densité (<math>\delta</math>)</b>	1800 Kg/m <sup>3</sup>

##### **b) Colle époxydique Sikadur-300 :**

Le Sikadur-300 est la résine d'imprégnation du tissu SikaWrap-600 C et le primaire pour le support. [39] Matériaux composites traditionnels Les propriétés de la colle époxydique Sikadur-300 pour le cas de la modélisation du bâtiment par matériaux composites traditionnels sont les suivantes [36] :

Tableau V.3 : Propriétés de la résine Sikadur-300

Module d'élasticité ( $E_c$ )	2800
Coefficient de poisson ( $\nu$ )	0.4
Densité ( $\delta$ )	1160 Kg/m <sup>3</sup>

### V.3.1 Modèle de calcul

Le modèle choisi introduit dans le logiciel "Ansys" est donné par le schéma suivant (Figure V.3). On a pris le tablier du pont en question, vu que le tablier est le plus touché par les dégradations.

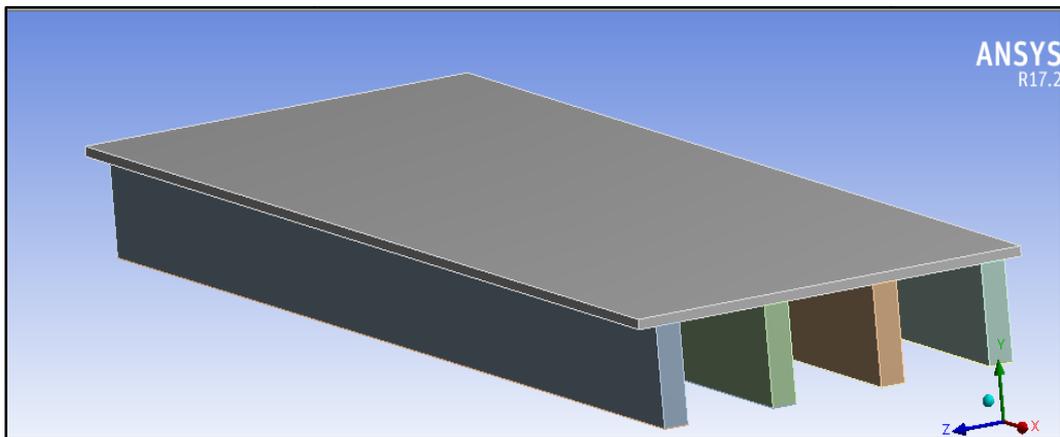


Figure V.3 Modèle du tablier du pont analysé par "Ansys"

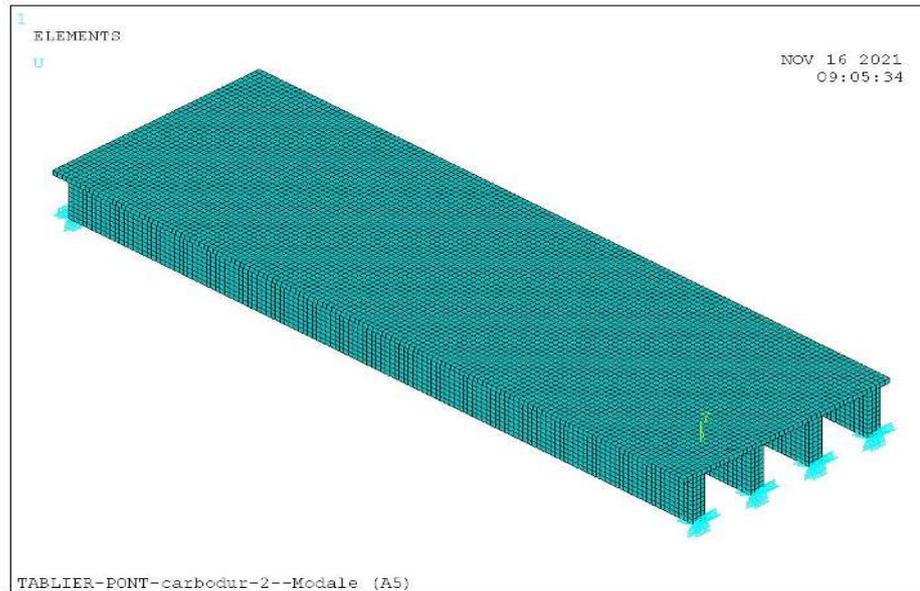
### V.3.2 Maillage :

L'opération de maillage consiste à diviser le domaine  $\Omega_i$  en sous-domaines appelés mailles. Il faut donc :- Définir le domaine , -  $\Omega_i$  Le diviser en mailles  $i$ , telles que l'ensemble des  $\Omega_i$  soit une partition de  $\Omega_i$

Considérons un maillage d'éléments finis, on subdivise d'avantage le domaine en éléments plus petits, chaque nouvelle division contenant la précédente, et on conserve, pour les éléments de même type constamment la même approximation des champs.

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', qui a été choisi  $\Omega_i$  dans l'étape de création des mailles (éléments finis).



### V.3.2 Résultats trouvés

Les résultats trouvés de l'analyse modale du tablier du pont en béton armé, sans renforcement ont données des fréquences variant entre 6.52Hz (1<sup>er</sup> mode) et 16.17 Hz (6<sup>ème</sup> mode). Ces valeurs montrent que le premier est prépondérant et que la fréquence dépend de la masse de l'ouvrage et de sa rigidité  $k$ . Les modes avec leurs fréquences trouvés sont donné (Figures : V.4 à V.9).

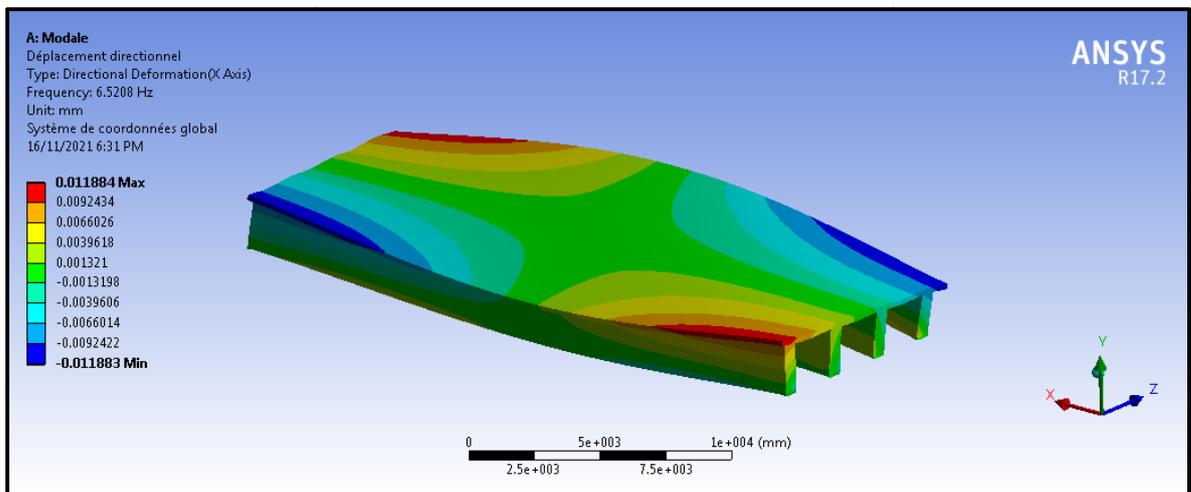


Figure V.4 Mode 1 de vibration (sans renforcement)

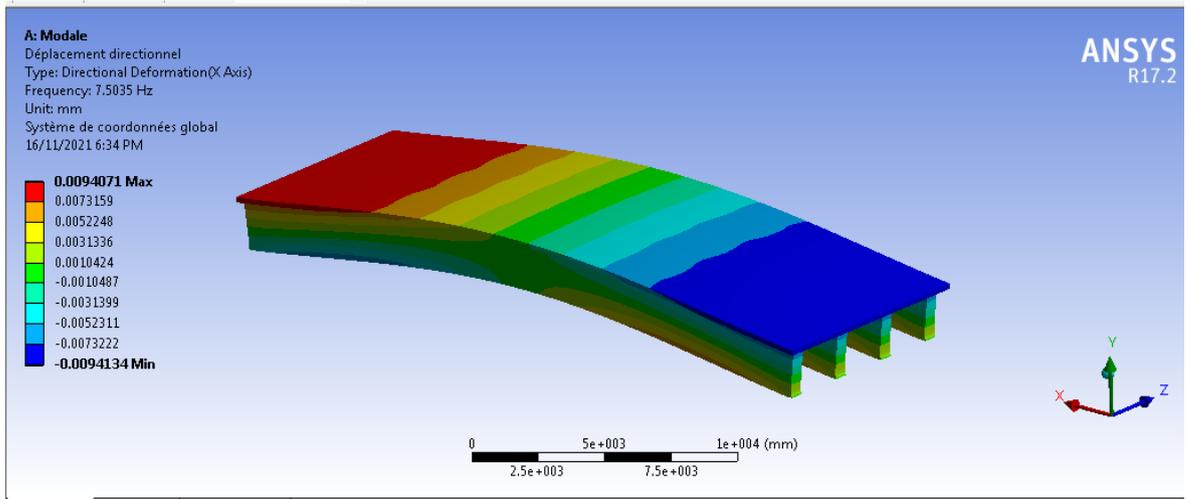


Figure V.5 Mode 2 de vibration (sans renforcement)

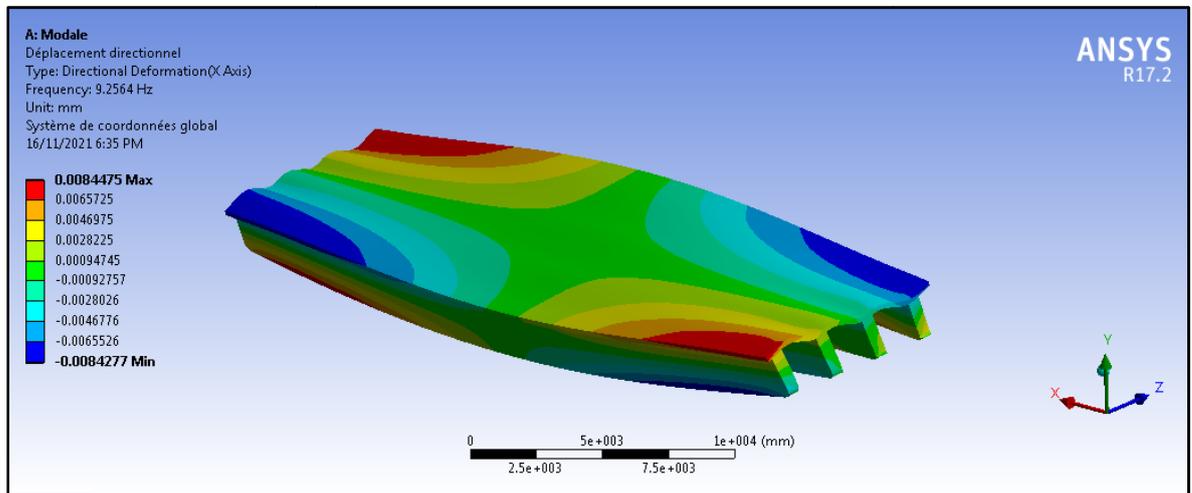


Figure V.6 Mode 3 de vibration (sans renforcement)

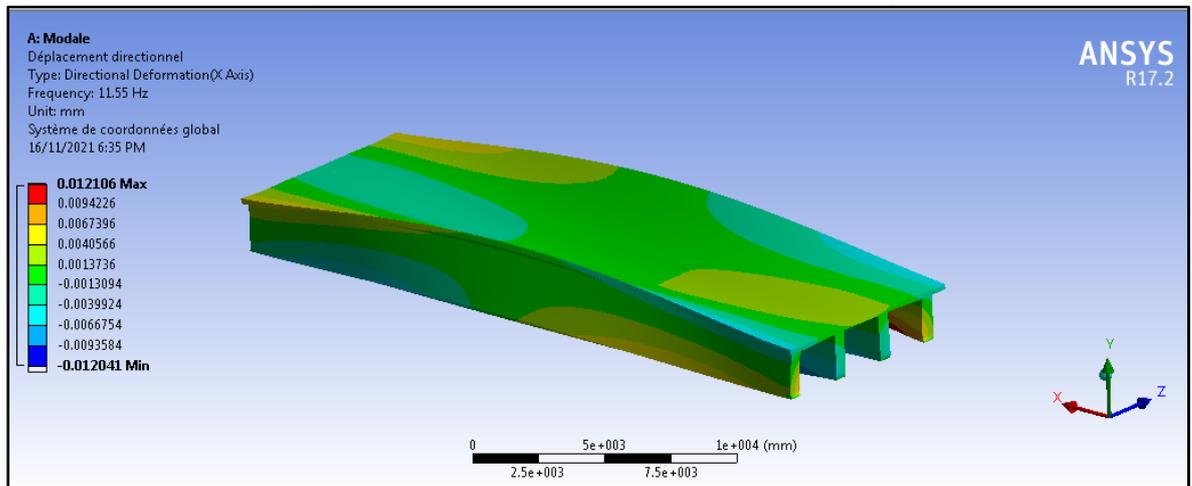


Figure V.7 Mode 4 de vibration (sans renforcement)

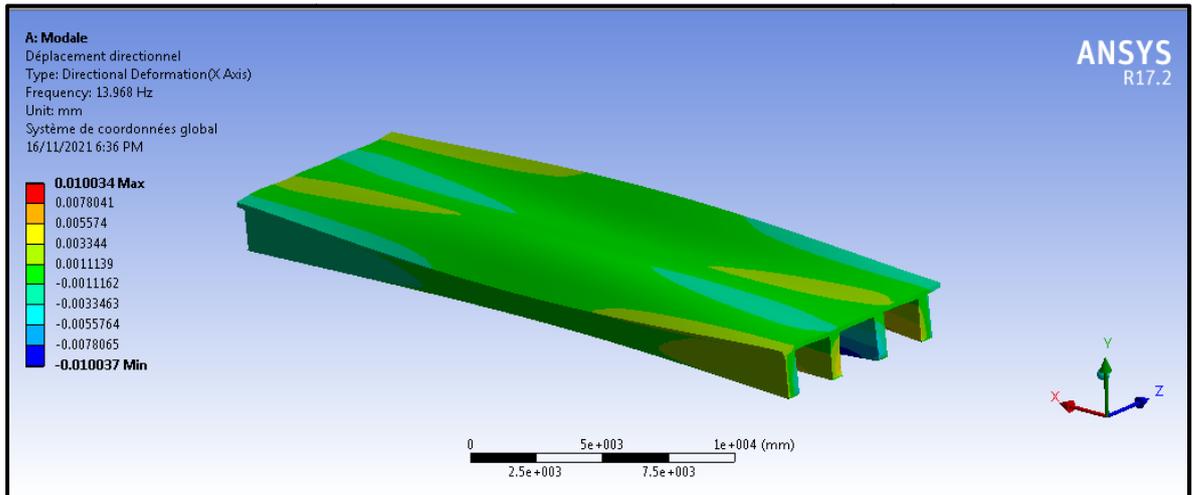


Figure V.8 Mode 5 de vibration (sans renforcement)

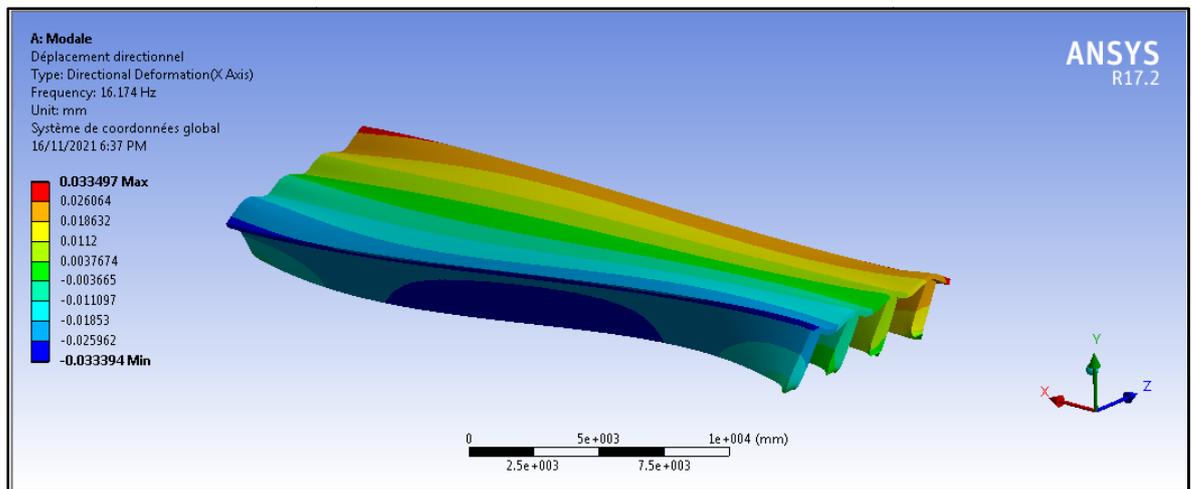


Figure V.9 Mode 6 de vibration (sans renforcement)

### V.3.3 Résultats et commentaires

Les résultats obtenus montrent l'influence des modes de vibration sur les valeurs des fréquences pour cette analyse modale. Le tableau ci-après donne les valeurs des fréquences trouvés avec les modes observés (Tableau V.1).

Tableau V.1. Tableau des fréquences et modes de vibration du pont non renforcé

N°	Fréquence avant renforcement (Hz)	Mode de vibration
01	6.52	Flexion simple
02	7.50	Déplacement latéral

03	9.25	Déplacement latéral
04	11.55	Torsion
05	13.96	Déplacement longitudinal
06	16.17	Double torsion

### V.4 Modélisation de pont avec renforcement

#### V.4.1 Renforcement adopté

Pour le renforcement en flexion, les résultats trouvés de l'analyse modale du pont en béton armé Il s'agit de l'application au niveau de la partie inférieure des plaques lamelles SikaCarbodur (Figure V.10).

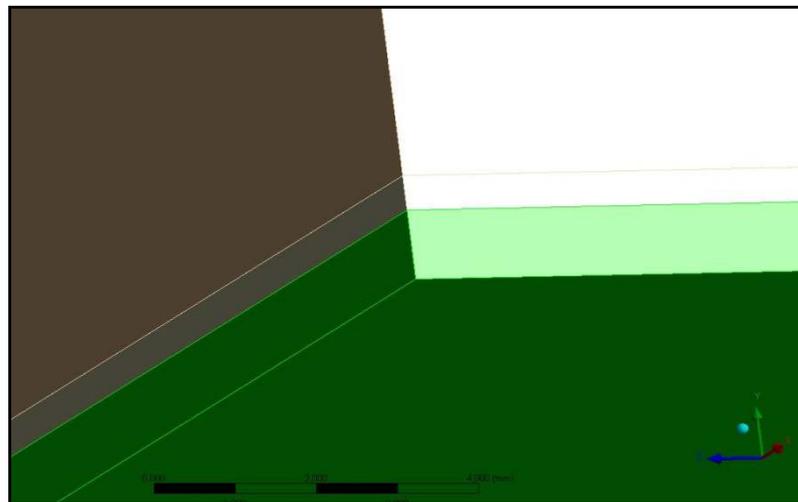


Figure V.10 Lamelles de SikaCarbodur appliquée

#### V.4.2 Résultats trouvés

Les résultats ont données des fréquences variant entre 6.62 Hz (1<sup>er</sup> mode) et 16.37 Hz (6<sup>ème</sup> mode). Ces valeurs montrent que la masse n'a pas d'influence sur ces fréquences, contrairement à la rigidité de la structure. Les modes avec leurs fréquences trouvés sont donné (Figures : V.11 à V.17).

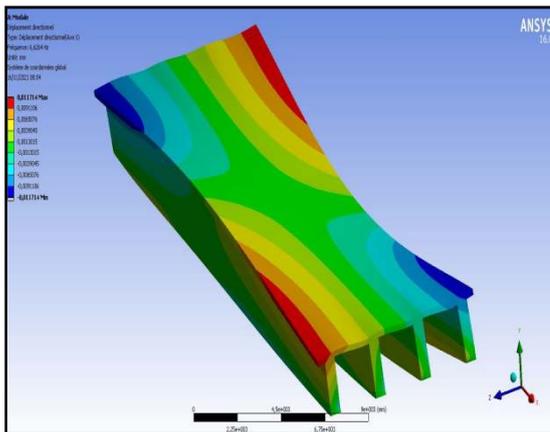


Figure V.11 Mode 1 de vibration (1<sup>er</sup> renforcement)

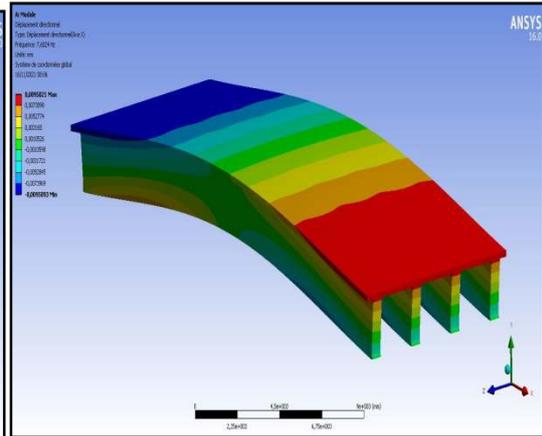


Figure V.12 Mode 2 de vibration (1<sup>er</sup> renforcement)

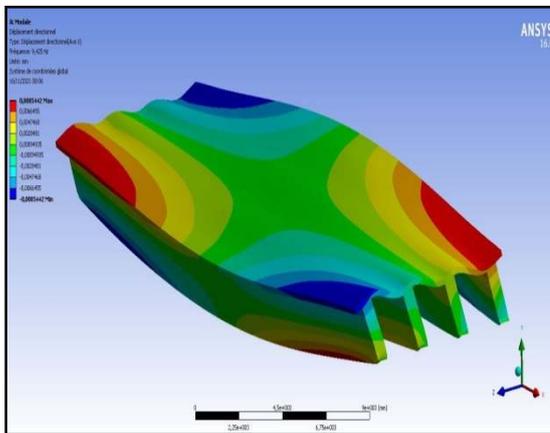


Figure V.13 Mode 3 de vibration (1<sup>er</sup> renforcement)

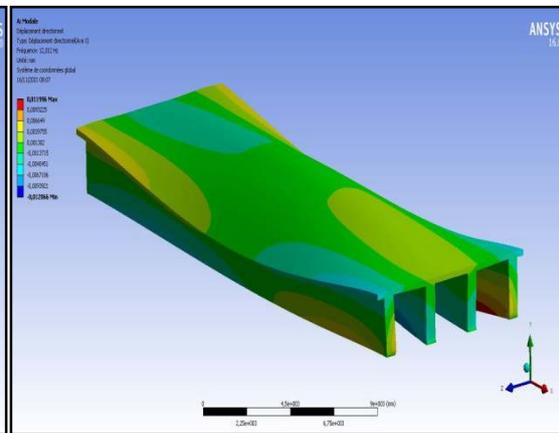


Figure V.14 Mode 4 de vibration (1<sup>er</sup> renforcement)

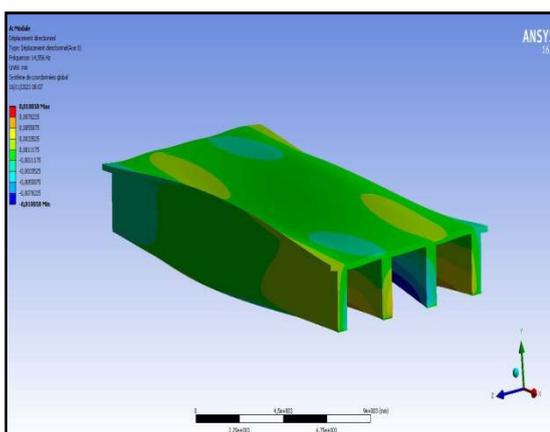


Figure V.15 Mode 5 de vibration (1<sup>er</sup> renforcement)

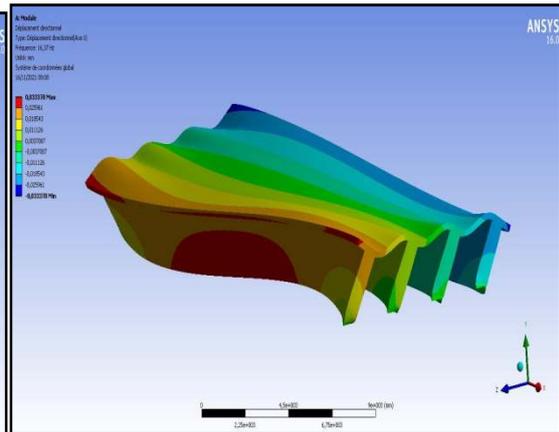


Figure V.16 Mode 6 de vibration (1<sup>er</sup> renforcement)

Le tableau ci après donne les valeurs des fréquences trouvés avec les modes observés (Tableau V.2).

Tableau V.2. Tableau des fréquences et modes de vibration du pont (1er renforcement)

N°	Fréquence 1 <sup>er</sup> renforcement (Hz)	Mode de vibration
01	6.62	Flexion simple
02	7.60	Déplacement latéral
03	9.42	Déplacement latéral
04	12.01	Torsion
05	14.55	Déplacement longitudinal
06	16.37	Double torsion

### V.5 Modélisation de pont avec 2<sup>ème</sup> renforcement

#### V.3.1 Double renforcement

Pour le double renforcement en flexion et au cisaillement (Figure V.17), les résultats trouvés de l'analyse modale du pont en béton armé, montre que les modes sont les mêmes qu'au auparavant, mais les valeurs sont différentes.

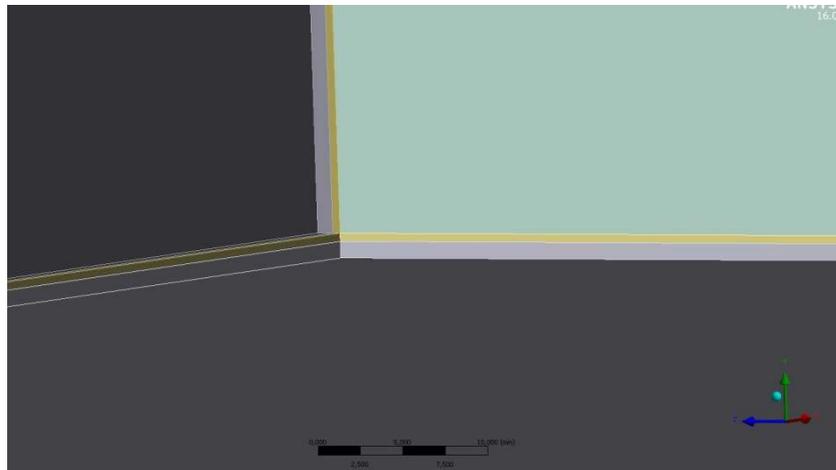


Figure V.17 Renforcement en U des poutres du pont

Les résultats trouvés, concernant les mode et fréquences de vibration, montrent le gain apporté par le double renforcement sur le comportement dynamique de l'ouvrage testé. En effet, les valeurs des fréquences de vibration (Figures : V.16 V.21), varient entre 6.87 Hz (1<sup>er</sup> mode) et 16.84 Hz (6<sup>ème</sup> mode). Le tableau V.3, ci après donne les valeurs des fréquences trouvés avec les modes observés pour ce type de renforcement.

# Introduction Général

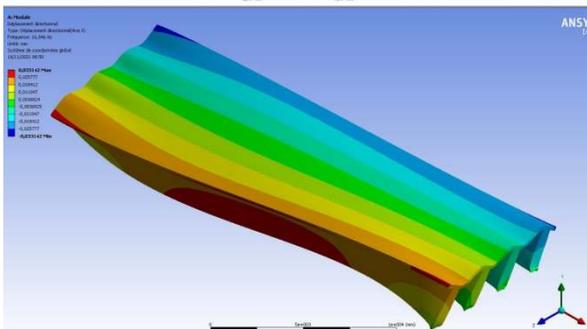
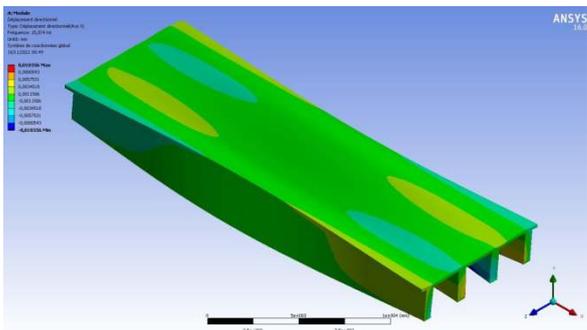
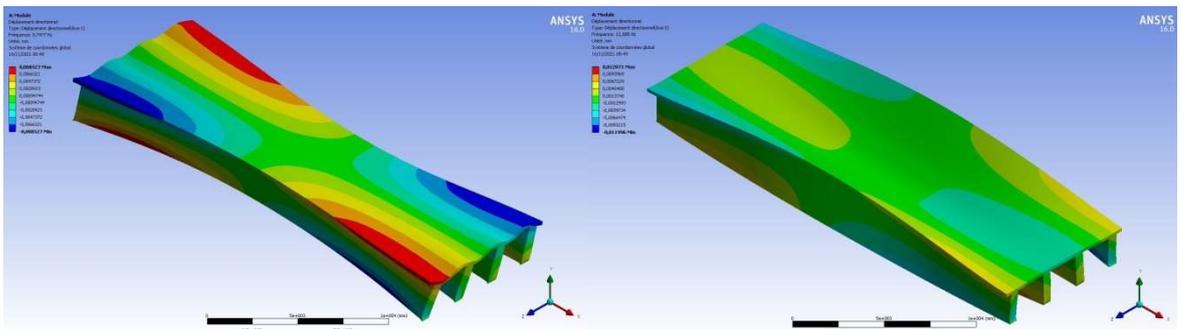
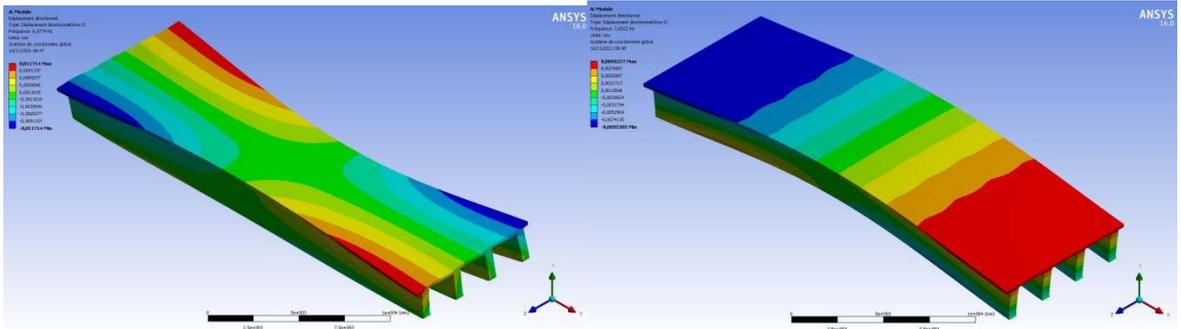


Tableau V.3. Tableau des fréquences et modes de vibration du pont (double renforcement)

N°	Fréquence double renforcement (Hz)	Mode de vibration
01	6.87	Flexion simple
02	7.65	Déplacement latéral
03	9.79	Déplacement latéral
04	12.88	Torsion
05	15.87	Déplacement longitudinal
06	16.84	Double torsion

#### **V.4 Comparaison et interprétation**

La modélisation du tablier du pont en béton armé a conduit à un travail de comparaison et sur la base de l'analyse modale effectuée, il s'est avéré que le type le plus performant de renforcement est le 2<sup>ème</sup> mode (renforcement par "Carbodur et Wrap", avec des gain variant de 5.32 % pour le 1<sup>er</sup> mode et 13.68 % pour le dernier 4ème mode. Le tableau ci après illustre la comparaison déterminée et les écarts trouvés (Tableau V.4).

Tableau V.4. Tableau comparatif des fréquences des cas étudiés

N°	Fréquence avant renforcement	Fréquence 1 <sup>er</sup> renforcement	Fréquence double renforcement	Ecart plus défavorable
01	6.52	6.62	6.87	5.37 %
02	7.50	7.60	7.65	2.00%
03	9.25	9.42	9.79	5.83%
04	11.55	12.01	12.88	11.51%
05	13.96	14.55	15.87	13.68%
06	16.17	16.37	16.84	4.14%

### Conclusion Générale

Les ponts sont des ouvrages par excellence et nécessitent un entretien permanent de la part des pouvoirs publics. Le renforcement par composites de fibres de carbone (CFRP) est l'une des moyens adéquats pour sauvegarder les ouvrages anciens et qui présentent des signes de dégradation ou de vétusté. Ces techniques sont de plus en plus répandus dans les applications pour la réhabilitation des structures élevées (bâtiments, ponts, tunnels, ect...). Depuis plus de trente cinq ans d'utilisation, ces techniques ont montré des performances et leur efficacités.

Par le biais de ce travail, on a essayer de comprendre la technique des matériaux composites CFRP et montrer leur efficacité dans la réduction des périodes de vibration en faisant une analyse modale avec le logiciel AnsysWerbench/ 2021, par application de la MEF. En effectuant une comparaison des résultats de cette modélisation, avant et après renforcement des poutres d'un tablier pont en béton armé (avec deux types de renforcement), on peut tirer les conclusions suivantes :

- Avant de procéder à un renforcement, il faut bien choisir la méthode qu'il faut et faire une approche numérique.
- Il est nécessaire de prendre en charge la mise à niveau (réhabilitation) des structures anciennes et endommagées, qui peuvent donner lieux à des conséquences néfastes (dégâts humains et matériels).
- La modélisation numérique par application d'un logiciel professionnel (AnsysWorbench/2021), qui est largement utilisé et qui a montré par le choix, d'un modèle numérique proche de la réalité, son bonne approche dans la lecture approfondie des résultats.
- Il est possible d'appliquer la technique de renforcement des composites collés, sur les éléments porteurs pour suivre le comportement dans le temps d'un pont en béton armé pour prédire son comportement dynamique dans le temps.
- Le renforcement en "U" en traction (flexion) et au cisaillement donne un effet de gain avoisinant les 14 %, 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 numérique plus approfondi (analyses statique et dynamique) d'un pont tout entier, avec la prise en charge le vari comportement mécanique des matériaux porteurs (béton, aciers et composites). Un travail expérimental est souhaitable pour caler les résultats numériques trouvés, en prenant des cas de grandeur réelle (in situ) ou réduites (au laboratoire).



## Références Bibliographiques

- [1] Ministère des Travaux Publics, Directions des Routes et Ouvrages d'Art (2020), Recensement Statistiques des ouvrages d'Art en Algérie, Rapport final, Alger, Algérie.
- [2] 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.
- [3] Kenai S. (2011), Pathologie de béton, Cours de Master1-Option Matériaux et génie civil, Université de Blida1, 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.
- [5] Calgaro J.A et Lacroix A. (1997), (Livre), Maintenance et réparation des ponts, Presse de l'Ecole National des Ponts et Chaussée, Paris, France.
- [6] Abdessemed M. (2003), Comportement des poutres isostatiques en béton armé renforcées par tissus et lamelles de fibres de carbone, Mémoire de Magistère, Département de Génie Civil, Université Saad Dahlab de Blida, Algérie.
- [7] Boularouk Ch. (2015), Analyse numérique du comportement des structures renforcées par matériaux composites, mémoire de fin d'études, Ecole Nationale Polytechniques, El Harrach, Alger.
- [8] Mielczareki M. and Nowogonska B. (2021), Technical problems in the renovation of historic bridges, case study- Road bridge in Cigacide, Civil and Environmental Engineering Reports E-Issn 2450-8594, Ceer 2021, Vol 31, Issue 01. Pp: 0070-0078, DOI: 10.2478/ceer-2021-0005.
- [9] Ministère des Travaux Publics, Direction des Routes (2008), Guide Parasismique Algérien des Ouvrages d'Art (RPOA 2008), Alger, Algérie.
- [10] 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.

- [11] Richard Andrew Barnes , Geoffrey Charles Mays ,strengthening of reinforced concrete
- [12] Mohcene BOUKHEZAR Réhabilitation et renforcement des poutre au moyen desmatériaux composite
- [13] N.BOURAHLA surveillance d'ouvrage d'art .
- [14] Eric Joly rénovation d'un ouvrage d'art Travaux n° 752 • avril 1999
- [15] Paul Pous étude de réparation technique ouvrage d'art 2000
- [16] A.GALGAROS et P.LACROIX (2000) , projet de renforcement et de réparation d'unpont , traité de construction , technique de l'ingénieur .
- [17] Cahier des clauses technique -SIKA , SIKa CARBODUR -SIKA WRAP-CCT37.
- [18] A.JEAN GALAGAROS ,(2000) ,composition a fibre de carbone de le génie civil , traitéplastique et composites , technique de l'ingénieur .
- [19] Abdessamed Mouloud (2003) comportement des poutre isostatique en béton armerenforce par tissus et lamelles de fibre du carbone.
- [20] Benjamin LACLAU . Etude des spécialité des béton de la première moitié du 20ièmesiècle et leur adaptabilité aux nouvelle technologie de renforts composite .
- [21] Mohcene BOUKHEZAR. Réhabilitation et renforcement des poutres au moyen desmatériaux composites », thèse de Magister en Génie Civil, Université Mentouri Constantine,Juillet 2009.
- [22] MOHRA ABDELLAH; YAGOUBI AISSA. Renforcement des poutres flexionnelles enbéton armé par des matériaux composites en utilisant la technique EBR, thèse de Master enGénie Civil, Université Mentouri Constantine, 2013.
- [23] Khalifa A, Nanni A, Belarbi A, Tumialan G. Shear strengthening of continuousreinforced concrete beam susing externally bonded carbon fiber reinforced polymer sheets. In:Proceedings of the fourth international symposium on fibre-reinforced polymer (FRP)reinforcement for concrete structures (FRPRCS-4). Baltimore, MD, Novembre 1999. p. 995–1008
- . - [24] ISIS-M04-F. Février 2002. Renforcement externe de structures en béton armé à l&#39;aide de polymers renforcées de fibres. Canadian Standards Association, Rexdale, Canada
- [25] Mebarki Souad. (2016) “ Etude du l&#39;effet de matrice sur le comportement des stratifiescarbone-époxy&quot;, Mémoire de fin d&#39;études, Université A. M. Oulhadj -Bouira
- [26] N.BOURAHLA (2007), renforcement de la maçonnerie par les fibres en verre, USTSDBlida

- [27] « Étude Expérimentale et Numérique du Comportement Micromécanique des Liaisons Collées de type Sifflet et Double Sifflet », Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2007.
- [28] « Les solutions techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages de génie civil en béton », Année 2011.
- [29] Contribution à l'étude expérimentale et théorique de structures en béton armé renforcées à l'effort tranchant par collage de composites à matrice organique, Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2001.
- [30] MAAMOURI Ghania, LAKHDARI Loubna, « Optimisation numérique des paramètres de confinement des cylindres en béton par des bandes composites », 2018.
- [31] BENLAKHDER kheireddine, « Application des composites collés dans la Réparation d'une structure en béton armé approche numérique », Mémoire de Master, 2016.
- [32] FREY François, « Analyse des structures et milieux continus (Mécanique des solides) », volume 3 Presses polytechniques, édition (1999).
- [33] COURANT, R. L.: Variational Methods for the Solution of Problems of Equilibrium and Vibration. Bulletin of the American Mathematical Society, 49:1-23, 1943.
- [34] RITZ, W.: Ueber eine neue Methode zur Lösung gewisser Variationsprobleme der mathematischen Physik. J. Reine Angew. Math., 135:1-16, 1908.
- [35] Ansys Inc Southpoint, « Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications », 275 Technology Drive, P671, 2009.
- [36] Avis Technique 3/16-875 (2012), « Sika CarboDur Sika Wrap », Annule et remplace l'Avis Technique 3/10-669, (arrêté du 21 mars 2012).
- [37] Academic Ansys, 2020, "Free Student Software Downloads ", Home site web official.
- [38] Ansys Inc Southpoint, (2009) "Theory Reference for the Mechanical APDL and **Mechanical Applications**", 275 Technology Drive, P671, 2019.
- [39] Logiciel de calcul de structure, "analyse aux éléments finis (MEF)", Dlubal Software SARL, 93464 Tiefenbach, Allemagne, 2020.

## *Remerciements*

Avant tout je remercie le tout puissant "ALLAH" pour m'avoir donnée du courage, de la sérénité et surtout la force et la volonté pour bien mener et achever ce travail.

Ensuite, je tiens à exprimer ma reconnaissance à notre encadreur

**Dr Mouloud ABDESSEMED** Enseignant Chercheur à l'Université de Blida pour son suivi durant l'évolution de notre travail, ainsi que pour ses précieux conseils, ses remarques pertinentes et pour son aide durant toute cette période de travail.

Je remercie également les membres du jury qui me font l'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail. Un grand merci pour la direction des travaux publics d'OuedSMAR (DTP) pour leur collaboration précieuse en particulier **Mr BELARBIA**

Nous remercieront également, a l'ensemble des enseignants de notre Département de Génie Civil / Université de Blida pour leur formation, ainsi que pour tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail et en acceptant de l'examiner.

Enfin, nous tenons à exprimer nos remerciements à tous nos proches, nos amis, ceux et celles qui nous ont encouragé et apporté leur soutien moral. Il nous serait de les citer tous, qu'ils trouvent ici, l'expression de notre reconnaissance

## *Dédicaces*

### *Grâce au Bon Dieu :*

Je dédie ce modeste travail à ceux qui sont les plus chers au monde :

Tout d'abord je remercie Dieu de m'avoir donné la force d'accomplir ce travail, que je dédie à Mes parents pour leurs amours, leurs soutiens et leurs confiances, rien n'aurait été possible sans eux.

A mon cher père qui n'a pas cessé de m'encourager et de se sacrifier pour que je puisse franchir tout obstacle durant toutes mes années d'études, que dieu me le garde en très bonne santé.

A ma plus belle étoile qui puisse exister dans l'univers ; ma chère mère, celle à qui je Souhaite une longue vie.

A ceux que j'aime et respecte :A meschères sœurs **Louisa , Imen** merci pour votre encouragement permanent et votre soutien moral et A mon frère **Zaki** ,A mes chers neveux **Anis , Wassim** .

A toute ma grande famille, qui m'a accompagnée durant ce long parcours, celle qui m'a offerte tout l'amour.

Une deuxième personne qui a partagé ce travail avec moi dans les bons et mauvais moments ; à mon binôme ma sœur serine et toutes sa familles.

Tous mes adorable amies sans exception :**Faten, Imen, Hiba, sabrine , Amina, Djazia, Hadjer**

A tous la promotion 2020.

Tous ceux que j'ai oublié qui m'a apporté d'aide et soutien durant ces années de formation

*F. Amel*

**Merci à tous**

## *Dédicaces*

Tout d'abord je remercie Dieu de m'avoir donné la force d'accomplir ce travail, que je dédie à

Mes parents pour leurs amours, leurs soutiens et leurs confiances, rien n'aurait été possible sans eux.

A mon cher père qui n'a pas cessé de m'encourager et de se sacrifier pour que je puisse franchir tout obstacle durant toutes mes années d'études, que dieu me le garde en très bonne santé.

A ma plus belle étoile qui puisse exister dans l'univers ; me chère mère, celle à qui je Souhaite une longue vie.

A ceux que j'aime et respecte :

A mes frères : **Oussama, Amine et Mohamed**

A ma sœur : **Nesrine** .

A mes cousines : **Zineb, Imen ,Syhem, Yassmine , Achwak , Fella, Rihem**

A toute ma grande famille, qui m'a accompagnée durant ce long parcours, celle qui m'a offerte tout l'amour.

Une deuxième personne qui a partagé ce travail avec moi dans les bons et mauvais moments ; à mon binôme ma sœur **Amel** et toutes sa familles.

Tous mes adorables amies sans exception : **Faten, Imen, Hiba, Binou, Amina, Djazia, Hadjer**

A tous la promotion 2020.

Tous ceux que j'ai oublié qui m'a apporté d'aide et soutien durant ces années de formation.

**B. SERINE**

Merci à tous