



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

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

جامعة البليدة 1

UNIVERSITE DE BLIDA 1

كلية الهندسة - دائرة الهندسة المدنية

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER 2

EN GENIE CIVIL

Option : Matériaux de Génie Civil

Thème

**Elaboration d'un guide de calcul pour renforcement
des éléments structuraux – Cas des ponts**

Etudié par :
BAKALEM Ihssen

Encadré par :
Dr . M.ABDESSEMED

PROMOTION: 2020/2021

Remerciements

*Nous remercions en premier lieu **ALLAH** pour son aide et sa bénédiction et pour la force qu'il nous a donné pour réaliser ce mémoire.*

*Je voudrais saisir l'occasion qui m'est offerte pour exprimer ma profonde gratitude et tous mes remerciements à mon promoteur **Dr***

***ABDESSMED Mouloud**, Enseignant Chercheur à l'Université de*

Blida1,

pour sa disponibilité et son aide précieuse, ses conseils et ses encouragements pour l'accomplissement de ce travail.

Enfin un grand merci à tous mes enseignants du Département de Génie Civil, tout le long de mon cursus universitaire.

Mes vifs remerciements pour les membres de jury d'avoir accepté à examiner mon travail.

Je remercie également, tous ceux et toutes celles, qui ont contribué de près ou de loin à ma formation et à l'élaboration de ce projet de fin d'études.



ملخص:

يجب أن تلبي الجسور احتياجات المستخدمين ويجب أن تكون دائماً قادرة على أن يتم استغلالها بواسطة حركة المرور والنقل. لهذا السبب ، علينا تقويتها لأسباب مختلفة، على وجه الخصوص لاستئناف الرفع المنخفض ، حماية العناصر الهيكلية التي تتكون منها ، وتلبية احتياجات الحجم المتزايد لحركة المرور ، هناك عدة طرق لحساب درجة التعزيز وإضافة المواد المراد زيادتها، لكن طرق التعزيز التقليدية يمكن أن تلعب دوراً معيناً في الحفاظ على الهياكل وحماتها لكنهم أظهروا حدودهم على وجه الخصوص من خلال التأثير على مظهر الجسر، تلوث البيئة ، وإتلاف هيكل الجسر الأصلي بسهولة ، وزيادة الحمل على هيكل الجسر. في هذا العمل ، كنا مهتمين باختيار نموذج حسابي مرتبط بنمذجة جسر خرساني مقوى . بمركبات قائمة على ألياف الكربون لعناصرها الحاملة (عارضة). من أجل تحديد السلوك الديناميكي لهذا الهيكل، قبل وبعد

التعزيز الخارجي لهذه المركبات اللاصقة. سيتم إجراء تحليل رقمي بواسطة **MEF** مع برنامج .

تضهر النتائج

التي تم الحصول عليها توافقت مع عمل الأدبيات وتؤكد أن ترابط مركبات CFRP، يعطي زيادة في الصلابة وبالتالي يحسن الحمل النهائي ويعطي مقاومة أفضل للتدهور الهيكلي . **الكلمات المفتاحية:** الهيكل الهندسي ، الخرسانة ، المركب ، السلوك ، الديناميكيات ، التعزيز ، التحليل

Résumé:

Les ponts doivent répondre aux besoins des usagers et par conséquent doivent être toujours capables d'être exploités par le trafic et transports. C'est pourquoi, on doit les renforcer pour diverses raisons, notamment pour reprendre la portance réduite, sauvegarder les éléments structuraux dont ils composent, et répondre aux besoins de l'augmentation du volume de trafic. Il ya plusieurs méthodes qui calculent le degrés de renforcement et l'ajout de matière à augmenter, mais les méthodes de renforcement traditionnelles peuvent jouer un certain rôle dans l'entretien et la sauvegarde des structures, mais elles ont montré leurs limites, notamment en affectant l'apparence du pont, en polluant l'environnement, en endommageant facilement la structure d'origine du pont et en augmentant la charge sur la structure du pont. On s'est intéressé dans ce travail au choix d'un modèle de calcul liée à la modélisation d'un pont en béton armé renforcé par composites à base de fibres de carbone, pour ses éléments porteurs (poutres). Afin de déterminer le comportement dynamique de cet ouvrage, avant et après leur renforcement extérieur par ces composites collés, une analyse numérique se fera par un code de calcul commercial de type éléments finis, avec le logiciel ANSYS. Les résultats obtenus montrent leur conformité avec les travaux de la littérature et confirment que le collage des composites CFRP, donne une augmentation de la rigidité et par conséquent améliore la charge ultime et donne une meilleure résistance à la dégradation de la structure.

Mots clés: ouvrage d'art, béton, composite, comportement, dynamique, renforcement, analyse.

Abstract:

Bridges must meet the needs of users and therefore must always be able to be operated by traffic and transport. Therefore, they must be strengthened for various reasons, including regaining the reduced lift, safeguarding the structural elements of which they compose, and meet the needs of the increased volume of traffic. There are several methods which calculate the degree of reinforcement and the addition of material to be increased, but the traditional methods of reinforcement can play a certain role in the maintenance and the safeguard of the structures, but they have shown their limits, in particular by affecting the appearance of the bridge, polluting the environment, easily damaging the original bridge structure and increasing the load on the bridge structure. In this work, we are interested in the choice of a calculation model linked to the modeling of a reinforced concrete bridge reinforced by carbon fiber-based composites, for its load-bearing elements (beams). In order to determine the dynamic behavior of this structure, before and after their external reinforcement by these bonded composites, a numerical analysis will be done by a commercial finite element type computer code, with the ANSYS software. The results obtained show their conformity with the work of the literature and confirm that the bonding of CFRP composites gives an increase in rigidity and consequently improves the ultimate load and gives better resistance to degradation of the structure.

Keywords: engineering structure, concrete, composite, behavior, dynamics, reinforcement, analysis.

Tables des matières

Remerciements.....	I
Résumé.....	II
Table des matières.....	III
Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux.....	V
Liste des symboles et abréviations.....	IV

Introduction Générale :	2
--------------------------------------	---

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

I.1. Introduction :	4
1.2 Généralités sur les ponts.....	5
I.2.1- les parties composant d'un pont :	5
I.3. Pathologie des structures en béton armé :	6
I.3.1- Position et stratégie des ouvrages d'art :	7
I.3.2- Principales causes de dégradation des ouvrages:	7
I.3.2.1- Causes physiques de dégradation :	7
I.3.2.2- Causes chimiques de dégradation.....	9
I.3.2.3 Autres causes de dégradation des bétons.....	10
I.4 Méthodes de réparation ou de renforcement des ponts en béton.....	11
I.4.1- Introduction :	11
I.4.2- Béton projeté:	12
I.4.3- Techniques des tôles collées :	13
I.4.4- Adjonction d'armatures complémentaires :	15
I.4.5- Précontrainte additionnelle.....	15
I.5 Renforcement des structures par matériaux composites.....	16
I.5.1- Idée du renforcement:	16
I.5.2- Techniques de renforcement :	17
I.5.3 Application du composite TFC :	19
I.5.3.1- Définition de procédé TFC :	19
I.5.3.2- Domaine d'application.....	20
I.5.3.3- Résine de la matrice du composite TFC:	21
I.5.3.4 Préparation des supports en béton :	22
I.5.3.5 Application du TFC:	22
I.6. Conclusion:	25

CHAPITRE II : Matériaux composites

II.1- Généralités :	27
II.1.1- Introduction :	27
II.1.2- Définitions :	27

II.2-	Les caractéristiques générales des matériaux composites :	28
II.2.1-	Classification des matériaux composites :	28
II.2.2-	Composants	29
II.2.2.1	La matrice	30
II.2.2.1.1	Les matrices organiques.....	30
II.2.2.1.2	Les matrices thermodurcissables :.....	30
II.2.2.1.3	Les matrices thermoplastiques.....	31
II.2.2.1.4	Les matrices métalliques.....	31
II.2.2.1.5	Matrices Céramiques.....	31
II.2.3	Les renforts.....	31
II.2.3.1	Renfort en fibres discontinues.....	32
II.2.3.2	Renfort continu.....	32
II.3-	Avantages et inconvénients des composites :	33
II.4 -	Techniques de renforcement par matériaux composites.....	34
II.4.1	Concept	34
II.4.2	Méthode de renforcement par bar NSM « Near-Surface Mounted ».....	35
II.4.3	Renforcement des éléments structuraux.....	36
II.4.3.1	Renforcement des poteaux.....	36
II.4.3.2	Renforcement des poutres.....	37
II.4.3.3	Renforcement des dalles.....	37
II.4.3.4	Renforcement des murs.....	38
II.5	Maintenance des structures de génie civil :	38
II.5.1-	Principe :	38
II.5.2	Définitions.....	39
II.5.2.1	Renforcement	39
II.5.2.2	Réparation.....	39
II.6	Guides de calcul de renforcement.....	39
II.6.1	American AASHTO guide.....	39
II.6.2	Guide Européennes EUROCODES.....	40

CHAPITRE III : Choix du logiciel et MEF

III.	1.- Introduction :.....	44
III.2	Méthode des éléments finis	44
III.2.1	Préambule	44
III.2.2	Principe de la méthode des éléments finis.....	45
III.2.3	Etapas du calcul de la MEF :.....	46
III.2.3.1	Étapas logiques du calcul par éléments finis :.....	46
III.2.3.2	Etapas d'un programme d'éléments finis :.....	48
III.3	Choix du logiciel Ansys.....	48
III.3.1	ANSYS Structural :.....	49
III.3.2	ANSYS Mechanical :	49
III.3.3-	ANSYS CFX et Fluent :	49
III.3.4-	Gambit :	50
III.3.5-	ANSYS AUTODYN et ANSYS LS-DYNA :	50
III.3.6-	ANSYS Electromagnetics et Ansoft :	50

III.3.7- ANSYS Multiphysics :	50
III.4 Environnements logiciels.....	51
III.4.1 ANSYS classique:.....	51
III.4.2 ANSYS Workbench:	51
III.5 Logiciel ANSYS	51
III.5.1- Analyse structurelle.....	51
III.5.2- Ansys 2020 R1.....	53
III.6 Conclusion:	54

CHAPITRE IV: Analyse numérique et cas d'étude

IV.1- Introduction:	57
IV.2- Présentation de l'ouvrage :	57
IV.3- Géométrie des éléments de l'ouvrage :	57
IV.4- Modélisation de la structure :	58
IV.5- Diagnostic des dégradations :	59
IV.6- Causes probables des désordres :	61
IV.7- Techniques à adopter :	62
IV.8- Propriétés des matériaux :	62
IV.8.1- Béton armé :	62
IV.8.2- Les composites :	63
IV.8.2.1- Renforcement par lamelle :	63
IV.8.2.2- Renforcement par tissu :	64
IV.9- Maillage :	65
IV.10- Condition aux limites :	66
IV.11- Analyse de la structure confortée par chemisage :	67
IV.11.1- Introduction :	67
IV.11.2- Confortement de la structure :	67
IV.12- Modélisation du cas de chemisage :	68
IV.13- Modélisation du cas des composites :	70
IV.13.1- Pose de la lamelle Sika CarboDur :	70
IV.13.2- Application du tissu SikaWrap-600 C :	71
IV.14- Géométrie des composites :	72
IV.15- Connectivité des éléments :	72

CHAPITRE V : Résultats et discussions

V.1- Introduction :	74
V.2- Différences entre analyse modale et analyse statique :	74
V.3- Résultats obtenus grâce à une analyse modale par ANSYS :	75
V.4- Résultats numériques du cas choisi :	75
V.4.1- Modélisation du bâtiment sans renforcement :	75
V.4.1.1- Analyse modale :	75
V.4.1.2- Analyse statique :	80
V.4.2- Modélisation du bâtiment dans le cas du chemisage :	80
V.4.2.1- Analyse modale :	81
V.4.2.2- Analyse statique :	85

V.4.3- Modélisation du bâtiment dans le cas des matériaux composites :	86
V.4.3.1- Analyse modale :	86
V.4.3.2- Analyse statique :	90
V.5- Comparaison et commentaires :	91

Conclusion Générale et Recommandations

Liste bibliographique

Liste des Figures

Figure I.1 : Parties composantes d'un pont.....	5
Figure I.2 Affouillement du pont (oued Djeddi à Biskra).....	8
Figures I.3 Vue de la corrosion des armatures d'un tablier de pont.....	10
Figure I.4 Dégradation du chevêtre d'un pont en béton.....	11
Figure I.5 Technique de projection du béton.....	12
Figure I.6 Réparation des poutres par béton projeté.....	13
Figure I.7. Application de la technique des tôles colées.....	14
Figure I.8 Différents types de réparation par précontrainte additionnelle.....	15
Figure I.9 Pile de pont renforcée par composites CFRP.....	16
Figure I.10 Tissu de fibre de carbone (TFC).....	20
Figure I.11 Renforcement des poteaux par TFC.....	21
Figure I.12 Différentes étapes d'application de TFC.....	25
Figure II.1 Schéma des composants du matériau composite.....	28
Figure II.2 : Différents constituants d'un matériau composite.....	29
Figure II. 3 : Classification des matrices.....	30
Figure II.4 : Différents types de renfort de base.....	32
Figure II.5 : Différentes formes de renforts continus.....	33
Figure II.6 Poteau circulaire en BA confiné par composites.....	36
Figure II.7 Poutre renforcées par matériaux composites.....	37
Figure II.8 Dalle de tablier de pont renforcée.....	37
Figure II. 9 Mur en béton renforcé par CFRP.....	38
Figure III.1 Phase de calcul par le MEF.....	47
Figure IV.1 Vue du pont étudié.....	56
Figure IV.2 Vue de coupe transversale du pont.....	57
Figure IV.3 Vue en plan de l'ouvrage.....	57
Figure IV.4 Renforcement en flexion des poutres.....	58

Figure IV.5 Double renforcement en U.....	58
Figure IV.6 : Elément Solid 65 à 3D pour béton	59
Figure IV.7: Solid 185 à 3D pour composites	60
Figure IV.8 Modèle d'analyse du pont en béton armé	63
Figure IV.9. Maillage de l'ouvrage avec ANSYS	70
Figure V.1 Modèle du pont analysé par 'Ansys'	72
Figure V.2 Mode1 de Vibration sans renforcement	73
Figure V.3 Mode2 de Vibration sans renforcement.....	73
Figure V.4 Mode3 de Vibration sans renforcement.....	74
Figure V.5 Mode 4 de Vibration sans renforcement.....	74
Figure V.6 Mode5 de Vibration sans renforcement.....	74
Figure V.7 Mode6 de Vibration sans renforcement.....	75
Figure V.8 Mode1 de Vibration avec 1 ^{er} renforcement.....	76
Figure V.9 Mode2 de Vibration avec 1 ^{er} renforcement.....	76
Figure V.10 Mode3 de Vibration avec 1 ^{er} renforcement.....	77
Figure V.11 Mode4 de Vibration avec 1 ^{er} renforcement.....	77
Figure V.12 Mode5 de Vibration avec 1 ^{er} renforcement.....	77
Figure V.13 Mode6 de Vibration avec 1 ^{er} renforcement	78
Figure V.15 Renforcement en U des poutres du pont.....	79
Figure V.16 Mode 1 de vibration (renforcement en U)	80
Figure V.17 Mode 2 de vibration (renforcement en U)	80
Figure V.18 Mode 3 de vibration (renforcement en U)	80
Figure V.19 Mode 4 de vibration (renforcement en U)	80
Figure V.20 Mode 5 de vibration (renforcement en U)	80
Figure V.21 Mode 6 de vibration (renforcement en U).....	80

Liste des Tableaux

Tableau III.1: Organigramme d'étapes caractéristiques d'un programme d'éléments finis.....	48
Tableau IV.1: Propriétés de Béton armé.....	60
Tableau IV.2: Propriétés de CarboDur S1512	61
Tableau IV.3: Propriétés de la résine Sikadur-30.....	61
Tableau IV.4: Propriétés de SikaWrap -600 C	62
Tableau IV.6: Propriétés de la résine Sikadur-300	62
Tableau V.1. Tableau des fréquences et modes de vibration du pont non renforcé	75
Tableau V.2. Tableau des fréquences et modes de vibration du pont (1er renforcement).....	7
8Tableau V.3. Tableau des fréquences et modes de vibration du pont (double renforcement).....	81
Tableau V.4. Tableau comparatif des fréquences et modes de vibration des cas étudiés.....	82

Liste des abréviations et notations

BTPH : bâtiments, travaux publics, hydrauliques
TFC : tissu de fibres de carbone
MC : matériaux composites
PRF : polymère renforcé des fibres
PRFC : polymère renforcé des fibres de carbone
PRFV : polymère renforcé des fibres de verre
PRFA : polymère renforcé des fibres d'Aramide
HR : haute résistance HM : haut module.
TP : thermoplastiques
TD : thermodurcissables
MEF : méthode des éléments finis
FEA: Finite Element Analysis
APDL: Ansys Parametric Design Language
SMART: splitting morphing adaptive remeshing technique
NLAD : La capacité adaptative non linéaire
HPC: High Performance Computing (Calcul haute performance)
Ec : Module d'élasticité ν : Coefficient de poisson δ : Densité
 $M_{eff,i}$: masses effectives f_i : fréquences propres
de vibration de la structure ϕ_i : modes propres de
vibrations [M] : matrices de masse de la structure
[K] : matrices de rigidité de la structure ω_i :
fréquences naturelles circulaires γ_i : la quantité de
masse se déplaçant

Chapitre I

Synthèse Bibliographique

Introduction Générale

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

L'entretien et la maintenance des ponts en béton armé, consiste à les protéger en assurant une meilleure étanchéité ou en limitant la corrosion, à les réparer en cherchant à compenser les pertes de rigidité ou de résistance dues à la fissuration, à les renforcer en améliorant les performances et la durabilité des ouvrage. Parmi les techniques disponibles, l'une des plus efficaces pour les désordres structurels est la réparation de structures en béton armé dégradées par placage extérieur en acier. Cependant la problématique liée à la méthode de calcul la plus fiable, en insérant les codes et la réglementation en vigueur pour les composites collés, reste inconvenient majeur qui est lié à la difficulté du choix du modèle et de l'analyse à appliquer.

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

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

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

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

Dans le deuxième chapitre on présentera les matériaux composites, avec plus de détails, tandis que dans le troisième chapitre, on présentera notre contribution pour le principe de la modélisation numérique par la méthode des éléments finis où on définit le choix du logiciel du travail Ansys Workbench. .

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

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

Synthèse Bibliographique

I.1 Introduction

En Algérie, le patrimoine d'ouvrages d'art est composé d'un nombre significatif de structures en béton armé présentant des dégradations, qui avoisinent les 45% des ouvrages d'art présentent des désordres et plus de 35% des ouvrages d'art ont plus de 40 ans, ce qui nécessite des travaux de confortement et des réparations à court et moyen terme. La durée d'exploitation des ouvrages en béton armé est à priori comprise entre 50 et 120 ans selon sa composition et sa fonction, des principales causes contribuées à leur détérioration sont la présence d'un milieu agressif et l'augmentation des charges de trafic. Les ingénieurs en structure font face à ces problèmes fréquents : la dégradation et l'âge avancé des ponts existant. Pour faire face à ces problèmes et augmenter la capacité portante, tandis que le remplacement d'une structure est généralement une solution coûteuse, des techniques de réhabilitation sont mises en œuvre pour renforcer les structures existantes, chacune d'entre elles vise à corriger un problème particulier. Les techniques classiques de réparation comme l'augmentation de la section du béton sont souvent difficiles à réaliser, très onéreuses et nécessitent une intervention lourde sur la structure.

L'évolution dans le domaine de renforcement a permis de mettre en place des nouvelles méthodes telles que l'application des produits de réparation, le béton projeté, la précontrainte extérieure, la précontrainte additionnelle ou encore le collage de tôles d'acier. Lors de ces dernières années, le renforcement par tôles d'acier a été remplacé par le renforcement par matériaux composites. Les techniques de réparation et renforcement par collage des plaques en matériaux composites appelés communément Polymères renforcés des fibres ou Fiber Reinforced Polymer (FRP), se caractérisent par leurs simplicités de mise en œuvre, leurs efficacités, leurs résistances à la traction élevée et leurs bonnes résistances à la corrosion. Depuis, cette technique a fait l'objet de nombreuses recherches est désormais préférée dans la réparation des constructions en béton où plusieurs applications ont été recensées à travers le monde concernant divers éléments structuraux. Pour le développement de ces matériaux il est important d'avoir les meilleures connaissances possibles de manière à pouvoir suivre tout changement dans ses propriétés et par suite leurs influences sur le comportement de la structure..

1.2 Généralités sur les ponts

Un pont est un ouvrage d'art par excellence qui permet de franchir tout obstacle naturel (oued, ravin) ou voie de circulation (route, autoroute, chemin de fer, canal), on distingue : pont-route, pont-rail, pont-canal. Il Ya trois grandes catégories :

- * Pont à poutres (éléments porteurs parallèle à l'axe du pont)
- * Pont en arc (éléments porteurs en arc, encastrés ou articulés, générant des poussées horizontales aux appuis)
- * Pont suspendu (tablier suspendu à deux câbles porteurs principaux ancrés dans des massifs d'ancrage au niveau des culées, passant aux sommets de pylônes et supportant le tablier par l'intermédiaire de suspentes

1.2.1 Les parties composantes d'un pont

- Le **câble porteur** ou câble de retenue, sur un pont suspendu, est étendu sur tout le long du pont, et passe par les sommets de deux piliers. Il maintient le pont et en particulier les multiples suspentes.
- La **chaussée** est la partie du pont affectée à la circulation des véhicules.
- La **culée** d'un pont est la partie située sur la rive destinée à supporter le poids du tablier. La distance entre culées est appelée ouverture totale du pont.
- Un **garde-corps** (ou garde-fou ou rambarde) est un ensemble d'éléments formant une barrière de protection placée sur les côtés d'un pont.

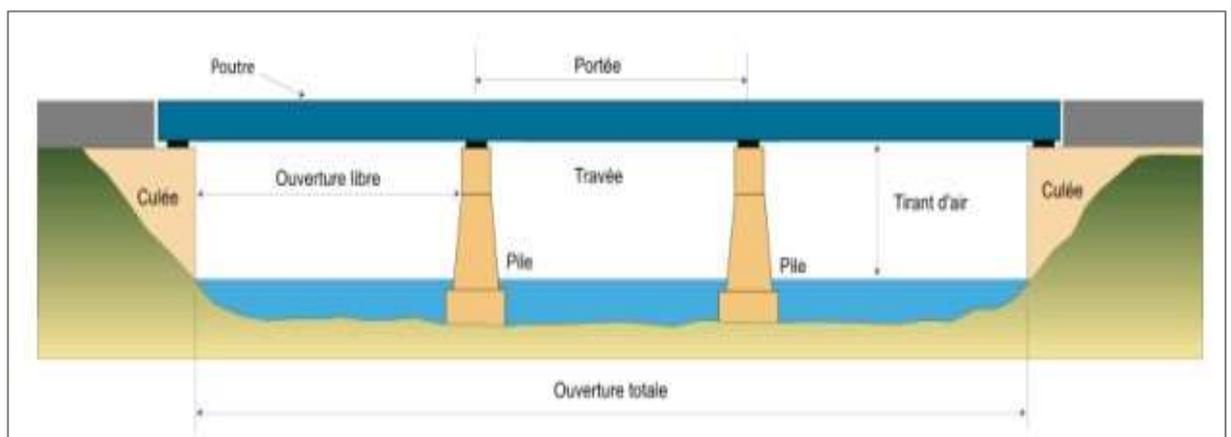


Figure 1.1 : Parties composantes d'un pont

- Un **massif de fondation** est un ouvrage compact de stabilité faisant partie de la structure d'un pont. C'est sur eux que les piles reposent. Ils sont principalement composés de béton. □ Un **joint de chaussée**, ou joint de dilatation, est un dispositif permettant d'assurer la continuité de la circulation au droit d'une coupure du tablier d'un pont. Il permet, notamment, à la structure de se dilater en fonction de la température (ou de l'hygrométrie pour les structures en bois).
- La **maçonnerie** est l'art de bâtir une construction par l'assemblage de matériaux élémentaires (briques ou pierres), liés par un mortier. □ Un **parapet** est un petit mur construit au bord d'un pont.
- La **portée** est la distance séparant deux points d'appui (piles) consécutifs d'une construction.
- Les **poutres principales** sont les éléments porteurs horizontaux qui font partie de l'ossature du tablier du pont. □ Le **pylône** soutient le câble porteur.
- Le **revêtement** de chaussée est la plupart du temps bitumé. Pour les ponts en maçonnerie il peut être pavé.
- Le **tablier** d'un pont est une structure porteuse qui supporte les charges de circulation et les transmet aux appuis ou aux éléments de suspension (suspendes ou arcs).
- La **travée** d'un pont est la partie comprise entre deux piles ou entre une pile et une culée. Cette notion ne concerne que les ponts à poutres, suspendus ou à haubans. Pour les ponts en arc ou ponts voûtés en maçonnerie, on parlera plutôt d'arches.
- La **travée centrale**, pour la partie de pont centrale quand il y a un nombre pair de piles ;
- La **travée de rive**, pour la partie de pont comprise entre une pile et une culée ; □ La **travée intermédiaire**, pour une travée située entre les travées de rives.
- La **travée principale**, pour la travée de plus grande longueur (ou portée), qui n'est pas obligatoirement la travée centrale.
- Le **tympan** ou mur de tête d'un pont en maçonnerie désigne le mur servant à maintenir les terres de remblai des voûtes. Il peut rester à l'état de surface nue, comme être architecturé avec un traitement de surface ou l'ajout d'éléments décoratifs.

I.3 Pathologie des constructions en génie civil

I.3.1 Position et stratégie des ouvrages d'art

Les ouvrages d'art constituent un lien critique dans le réseau routier et un investissement considérable en infrastructure qui devrait être gardé en bonne condition pour faciliter le trafic routier, supporter le commerce, la croissance économique et la mobilité personnelle. Un ouvrage d'art est conçu pour une durée de vie bien définie (100 ans en général), mais il est livré à lui-même pendant sa mise en service. Il est sujet de plusieurs dégradations et agressions (vieillesse, fissuration, corrosion, etc...), pouvant écourter sa durée de vie en le rendant inapte à accomplir ses fonctions normales [1].

Les tabliers de ponts en béton armé sont parmi les structures les plus exposées aux conditions favorisant leurs dégradations et certaines de ces conditions favorisent l'éclatement du béton de surface et la corrosion des armatures d'acier. Par conséquent, la durée de vie des tabliers de ponts se trouve considérablement réduite.

I.3.2 Principales causes de dégradation des ouvrages

Avant de procéder à toute réparation, il est indispensable de procéder à un diagnostic et de rechercher les causes des dégradations lorsque celles-ci n'apparaissent pas de façon évidente. En effet, cette étape est nécessaire pour le choix de la réparation optimale qui peut être définie comme la réparation la plus durable. Les principales causes de dégradation des bétons proviennent des attaques physiques et chimiques supportées dans le temps par les structures placées dans un environnement plus ou moins agressif. Les dégradations peuvent aussi provenir de défauts initiaux dus soit à une conception mal adaptée, soit à une mauvaise mise en œuvre des bétons.

I.3.2.1 Causes physiques de dégradation

Il y a plusieurs causes qui peuvent donner lieu à des anomalies et dégradations du béton.

Parmi ces causes, on peut citer :

➤ **Abrasion :**

Usure accompagnée d'une perte de matière consécutive au frottement d'un élément par un abrasif ou par le passage répétitif des piétons, véhicules et chariots industriels, etc.

➤ **Cavitation :**

Usure d'une structure hydraulique caractérisée par une perte de masse en présence de bulbes de vapeur qui se forment lors d'un changement brusque de direction d'un écoulement rapide de l'eau.

➤ **Chocs :**

Les désordres induits par l'exploitation d'un ouvrage constituent une cause non négligeable de dégradation du béton. Les chocs les plus fréquents sont ceux des poids lourds hors gabarit contre l'intrados des ponts, les chocs de bateaux ou d'objets flottants contre les piles en rivière. Ces chocs peuvent créer des épaufrures, des éclats importants de béton, voire même des ruptures d'acier.

➤ **Erosion :**

Perte de matière résultant du frottement d'un corps solide et d'un fluide contenant des particules solides en suspension et en mouvement. Les ouvrages sujets à l'érosion se situent essentiellement en milieu fluvial et maritime. Ils sont soumis au charriage d'éléments solides induits par les courants, à l'action des vagues à chaque marée.



Figure I.2 Affouillement du pont (oued Djeddi à Biskra)

➤ **Surcharges :**

Il s'agit d'ouvrages ayant supporté des charges trop importantes qui ont entraîné des fissurations et des éclatements du béton.

➤ **Le feu :**

Les très fortes élévations de température lors d'un incendie par exemple, entraînent un éclatement du béton.

➤ **Cycles gel/ dégel :**

Selon le taux de porosité et de perméabilité des bétons, l'eau peut s'infiltrer et, sous l'action du gel, gonfler, générer des contraintes internes et créer des fissures. Après un nombre important de cycles gel/dégel, certains bétons peuvent se déliter en surface et se désagréger. C'est le cas des ouvrages de montagne, des chambres froides.

1.3.2.2 Causes chimiques de dégradation

➤ **Alcali-réaction ou cancer du béton :**

C'est la réaction qui se produit entre la solution interstitielle du béton, riche en alcalin, et certains granulats lorsqu'ils sont placés dans un environnement humide. Des gels gonflants apparaissent en développant des micro-faiencages et un éclatement du béton.

➤ **Réactions sulfatiques :**

Les sulfates proviennent essentiellement du milieu extérieur. Ces ions ne sont pas passifs vis-à-vis de la matrice cimentaire et conduisent à la formation de certains composés chimiques expansifs tels que : L'étringite, le gypse et la thaumasite. Ces composés provoquent le gonflement du béton créant en son sein des tensions qui engendrent des fissurations.

➤ **Carbonatation et Corrosion des aciers :**

Il est important de retenir que le béton est un matériau basique et que, pour cette raison, il est vulnérable aux attaques acides et, plus particulièrement, à celles faisant intervenir des acides forts (Figures I.3).



Figures I.3 Vue de la corrosion des armatures d'un tablier de pont

La carbonatation est une réaction chimique entre la chaux du béton et le dioxyde de carbone de l'air qui a pour effet d'abaisser le pH de la phase interstitielle du béton. Les conséquences de cette réaction chimique sont très dommageables pour les armatures qui se trouvent à un pH où elles ne sont plus passives et peuvent alors se corroder.

1.3.2.3 Autres causes de dégradation des bétons

➤ **Mauvais positionnement des armatures**

Les armatures (généralement en acier) placées trop près du parement béton lors du coulage provoquent à terme des fissurations de surface.

➤ **Mauvaise qualité des bétons employés**

Un béton trop faiblement dosé en ciment, mal vibré, présentera un aspect défectueux : nids d'abeilles, faïençage, fissures superficielles, trous laissant les armatures apparentes.

➤ **Vibration trop importante**

Une vibration trop longue peut entraîner une ségrégation du béton et par conséquent une mauvaise répartition des constituants. Les efforts mal répartis entraînent alors des fissurations et des élancements du béton.

➤ **Absence de cure du béton**

La cure du béton est indispensable par temps chaud venté. Sans protection de surface, le béton se fâïence en surface.

➤ **Cycle humidité/sécheresse**

Les cycles répétés d'humidité/sécheresse entraînent des variations dimensionnelles du béton pouvant créer des fissures et par conséquent la corrosion des aciers.



Figure I.4 Dégradation du chevêtre d'un pont en béton

I.4 Méthodes de réparation ou de renforcement des ponts en béton

I.4.1 Introduction

Bien qu'il n'existait pas dans le passé de réglementation spécifique pour la conservation des constructions, la nécessité d'entreprendre des réparations et restaurations a permis de développer de nombreuses techniques de réparation et de renforcement. La réparation fait référence à la récupération de la capacité portante originale de la structure, tandis que le renforcement consiste à augmenter le niveau de service (augmentation de la résistance, de la déformabilité, de la ductilité) d'une construction pour en permettre l'utilisation dans des conditions non prévues à l'origine ou de lui procurer une protection suffisante contre les sollicitations dont il n'a pas été tenu compte dans les calculs. Le choix des méthodes de confortement doit satisfaire les objectifs suivants:

- ✓ L'utilisation optimale des structures principales avec un minimum de travaux de confortement.

- ✓ Le minimum de travaux isolés (ponctuels) pour éviter un coût élevé du confortement.
- ✓ Une interruption minimale du processus d'exploitation pendant le confortement.
- ✓ Une mécanisation optimale et une technologie d'exécution élevée.

I.4.2 Béton projeté

Cette technique, très au point, utilisée tant pour le renforcement de structures insuffisantes ou défailtantes que pour la réparation d'ouvrage endommagé, exige pour sa mise en œuvre un personnel spécialisé. Le béton projeté peut être, ou non, combiné avec l'adjonction d'armatures complémentaires. La projection est réalisée soit par voie sèche, soit par voie mouillée (Figure I.5).



Figure I.5 Technique de projection du béton

Dans le premier cas, la grande vitesse de projection (80 à 100 m/s) fait que le procédé par voie sèche est particulièrement recommandé pour la réparation des ouvrages car il permet d'obtenir un béton très compact. Dans le second cas, la faible vitesse de projection (10 à 40 m/s) rend indispensable l'exécution préalable d'une couche d'accrochage. Après durcissement, le béton projeté possède les propriétés d'un béton coulé, puis vibré. La difficulté de l'emploi de cette méthode provient essentiellement du mode d'application et de mise en œuvre (matériels, main d'œuvre et problèmes d'hygiène et de sécurité)

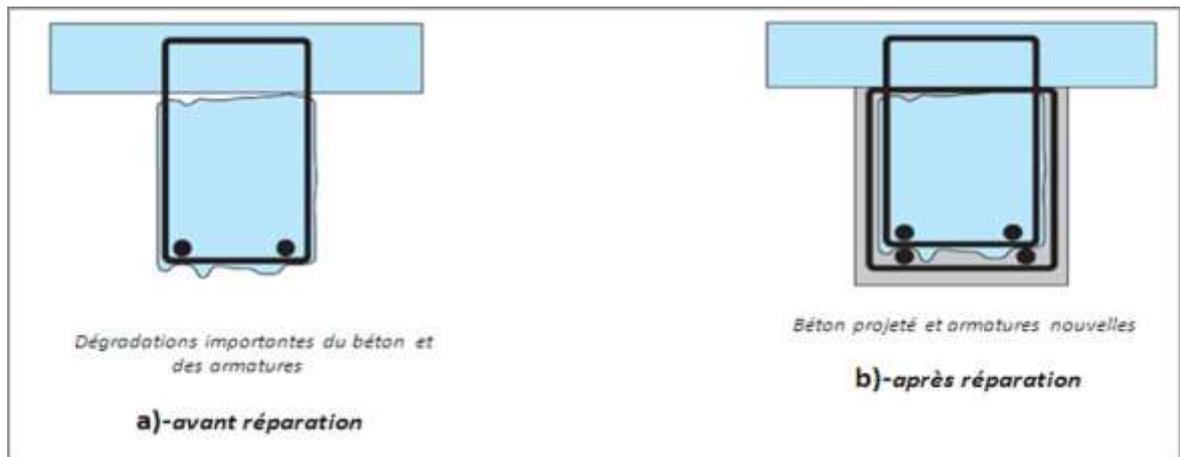


Figure I.6 Réparation des poutres par béton projeté

I.3.3 Techniques des tôles collées

Le renforcement de structure par plats métalliques, mieux connue sous le nom de procédé L'Hermite, consiste à coller des plats en acier sur les faces tendues de structures en béton armé. Ainsi, L'Hermite s'est intéressé, dès le début des années soixante, à l'utilisation de ces composés adhésifs de type époxy polymérisant à froid pour associer béton et acier. La technique des tôles collées a permis soit d'accroître la capacité portante d'un ouvrage, soit de renforcer localement une structure présentant des insuffisances de résistance [2].

Elle est applicable aux structures en béton armé et aux zones fonctionnant en béton armé des structures précontraintes. Diverses conditions doivent être réunies pour la bonne réussite d'une opération de renforcement ou de réparation.

La surface du béton doit subir, avant tout, une préparation soignée (burinage, bouchardage) ayant pour but d'éliminer toutes les parties peu adhérentes et de supprimer les imperfections locales afin de la rendre la plus plane possible.

Le mortier de ragréage est destiné à pallier, dans certains endroits, le manque d'enrobage des armatures internes ou bien à reprofiler la surface qui n'aurait pu efficacement être traitée 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 a aucune zone ragrée en extrémité de tôles.

L'acier de renfort est constitué, dans la plupart des cas, de tôles en acier E24-2. Dans le cas où il est nécessaire de souder les tôles, on utilise de l'acier E 24-3. 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 protection des aciers contre la corrosion sur leur face visible doit être assurée.

Le primaire d'accrochage est destiné à assurer une bonne adhérence entre la colle et le béton.

La colle est en général une résine époxydique choisie pour ses propriétés d'adhérence à l'acier et au béton. L'épaisseur minimale de colle est de l'ordre du millimètre.

Le dispositif de serrage peut, suivant les cas, être constitué de serre-joints, de barres filetées traversant l'élément ou scellées, d'étais ou de coins. Il doit permettre d'appliquer sur toute la tôle une pression voisine de 4 kPa durant toute la durée de polymérisation de la colle. Il convient de s'assurer préalablement que la structure peut reprendre les efforts de serrage sans dommage.



Figure I.7. Application de la technique des tôles collées

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

- Sensibilité de l'acier à l'oxydation (il demande donc une protection et un entretien quotidien)
- Impossibilité de mobilisation de toute la résistance en traction des tôles, même sous faible épaisseur ;
- Nécessité d'un collage sous pression (vérins), pour assurer une adhésion suffisante et éviter les bulles d'air dans la couche de résine ;

- Impossibilité de généraliser cette technique à des surfaces importantes (masse manipulées trop importantes), ce qui limite d'autant les possibilités de réparation.

I.3.4 Adjonction d'armatures complémentaires

Des armatures complémentaires sont à prévoir lorsqu'il s'agit de remplacer des aciers corrodés ou coupés accidentellement ou lorsqu'il s'agit de renforcer une structure. Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration, et participer à la résistance des sections renforcées. La protection de ces armatures est assurée par un béton coulé ou projeté et leurs jonctions avec les armatures existantes peuvent se faire par des procédés classiques (recouvrement, soudure, manchonnage).

I.3.5 Précontrainte additionnelle

Contrairement aux techniques présentées ci-dessus et qui consiste en l'ajout de matière (béton ou acier), la précontrainte additionnelle consiste en un ajout de force dans des ouvrages existants en vue soit de leur redonner, leur état de service initial, soit de leur donner un nouvel état de service. Elle permet, en effet, d'appliquer des efforts d'une intensité connue, en des points et suivant des directions bien définies, capables de s'opposer aux efforts générateurs des désordres. Elle est réalisée le plus souvent par la mise en œuvre d'armatures de précontrainte (câble ou barres) [3] La précontrainte additionnelle peut être employée pour traiter une grande variété d'ouvrage (ponts, barrages, réservoirs, bâtiment). Cette méthode est particulièrement adaptée au renforcement en flexion et vis-à-vis de l'effort tranchant par l'emploi d'étriers actifs. En revanche, la mise en œuvre de tout ce qui concerne la protection définitive des armatures nécessite un niveau particulier de qualité. De plus, le recours à des unités de plus en plus puissantes pour en limiter le nombre implique une étude particulièrement soignée des zones d'ancrage, très fortement sollicitées.

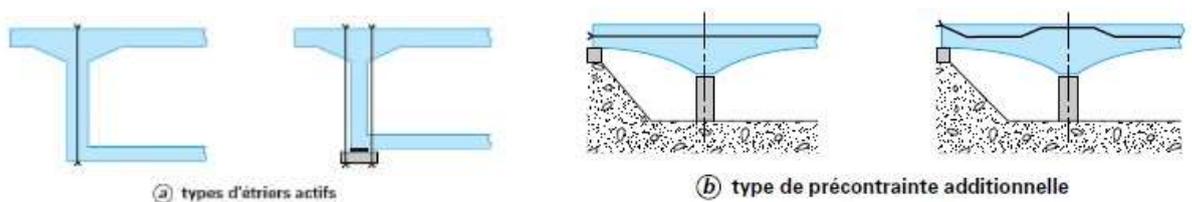


Figure I.8 Différents types de réparation par précontrainte additionnelle

I.4 Renforcement des structures par matériaux composites

I.4.1 Idée du renforcement

Le renforcement des ouvrages par des matériaux composites constitue une solution moderne surtout dans les zones soumises aux actions sismiques importantes. Les avantages des matériaux composites se caractérisent par une grande résistance, une aptitude au façonnage, un faible poids propre et une réalisation facile [4].



Figure I.9 Pile de pont renforcée par composites CFRP

La fibre de carbone est obtenue par pyrolyse d'une fibre organique appelée précurseur. Elle offre deux possibilités d'utilisation : la première en tant que carbone pour les propriétés de cet élément, la deuxième en tant que fibre flexible et qui convient à toutes les formes de produits finis [4]. En effet, les composites à fibre de carbone possèdent certaines propriétés physiques et mécaniques qui en font un matériau de renforcement de toute première qualité dans certaines applications liées au bâtiment et aux ouvrages de génie civil. On remarquera en particulier :

- ◆ Le niveau très élevé des résistances et des modules en traction des fibres de carbone comparés aux fibres de verre, d'aramide et de bore
- ◆ le niveau plus élevé de la résistance au cisaillement inter laminaire des fibres de carbone.
- ◆ La faiblesse des fibres d'aramide en compression

- ◆ les fibres de verre ont un faible module et manquent de résistance aux solutions salines et/ou basiques.
- ◆ Les fibres d'aramides qui présentent un faible module, une tenue thermique et une résistance à la fatigue en milieu aqueux très limitée.
- ◆ les fibres de polyéthylène à faible module et à tenue thermique très limitée;

I.4.2 Techniques de renforcement

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

a) Fibres sèches

La fibre de carbone est introduite sous forme de fibres continues de très grande longueur. Elle est déposée et enroulée régulièrement autour d'un mandrin, le poids des bobines varie de 500g à 4 kg, ce qui correspond à des longueurs de fibres continues de 600 m à 5 km (soit 0,8g au mètre linéaire). Pour renforcer directement une structure à partir d'une bobine de fibre de carbone, il est nécessaire de pouvoir tourner autour. Ce procédé de renforcement est donc naturellement limité aux colonnes ou aux pylônes. Les bobines sont placées sur un dévidoir qui peut se mettre en rotation autour de la structure à différentes hauteurs. Lorsque l'ensemble se met en mouvement, les mèches de carbone sont extraites des bobines et elles sont déposées automatiquement par enroulement autour du support à renforcer préalablement enduit d'une résine. Après le dépôt des fibres de carbone, une couche de fermeture de résine assure la cohésion de l'ensemble. Ce procédé automatisé est surtout utilisé dans le cas des renforcements par frettage des piles ou colonnes (retrofitting) de ponts ou de bâtiments. Son principal avantage est l'automatisation complète du système de pose. Son principal inconvénient est le fait qu'une pose manuelle est nécessaire pour renforcer les extrémités hautes et basses des piles et des colonnes et que cette méthode demande du temps et des manipulations importantes pour installer le matériel.

b) Tissus secs

Les fibres de carbone permettent, comme beaucoup de fibres longues de fabriquer des tissus de toutes formes et de toutes tailles, de même que des matrices. Le renforcement de structures à partir d'un tissu sec tissé uni ou multidirectionnel se fait directement par la pose de ce dernier sur une couche de résine qui recouvre l'élément à renforcer et qui sert de liant. Après marouflage, une couche de résine de fermeture permet de parfaire l'imprégnation. Les pressions nécessaires appliquées pour cette méthode de renforcement sont faibles. Par rapport à d'autres méthodes de renforcement, son principal avantage est une manipulation très facile sur chantier avec une absence totale de matériel lourd à déplacer. En plus, cette technique permet le suivi parfait de la forme du support et la maîtrise de l'épaisseur du film de résine.

c) Tissus pré-imprégnés

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

Les tissus doivent être ramenés à la température ambiante pour être utilisables. A température ambiante, la souplesse du tissu préimprégné permet la pose de renforcement sur pratiquement n'importe quel type de surface. Ces renforcements sont posés et leur matrice immédiatement polymérisée sur les surfaces à renforcer. Le principal problème d'un tel renfort réside dans la phase de remontée à la température ambiante et dans les difficultés matérielles pour assurer de bonnes conditions de polymérisation sur chantier. Les premières résines utilisées nécessitaient un matériel important, car la polymérisation était obtenue sous vide ou sous pression à des températures supérieures à 100°C . Par contre le principal avantage de cette méthode était la quasi-absence de bulles dans le renfort en composite après polymérisation. Cette technique de renforcement a surtout été développée au Japon, dès la fin des années 1980. Depuis, les fabricants de tissus préimprégnés et les formulateurs de résines ont accompli des progrès considérables. La température de polymérisation des résines est voisine de la température ambiante, ce qui a permis un gain d'exploitation très important. Cependant, l'utilisation d'un tissu préimprégné nécessite toujours une phase de conservation à très basse température et une phase de remontée en température avant la pose, qui sont difficiles à gérer sur des chantiers de travaux publics.

d) Produits pultrudés

Ces produits sont obtenus à partir de mèches de fibres continues qui sont enduites par passage en continu dans un bain de résine. Ces résines peuvent être de type époxyde, polyester, vinylester ou phénolique. L'ensemble des mèches préimprégnées passe ensuite dans une filière où l'excès de résine est éliminé, puis dans un four de polymérisation. Les produits finis se présentent sous forme de bandes ou de joncs, plus ou moins rigides suivant les épaisseurs et les diamètres. La section des bandes les plus courantes est $100 \times 1 \text{ mm}^2$. Leur longueur, suivant la demande, varie de quelques centimètres à plusieurs centaines de mètres. D'autres types de profilés, y compris des tubes, peuvent être aussi fabriqués par le même procédé ; ces produits sont utilisés depuis très longtemps dans les articles de sport : flèches d'arcs, bâtons de ski. Ce procédé a l'avantage d'être continu, automatisé, rapide et donc de réduire le coût du composite. Il permet aussi de maîtriser les taux de fibres et de résine, et d'obtenir des formes profilées recherchées pratiquement de toutes les longueurs désirées. A partir de ces bandes pultrudées, la technique de renforcement est similaire à celle du plat collé métallique, selon le procédé l'Hermitte, mis au point en France vers 1965. Elle a démarré conjointement au Japon et en Europe, plus exactement en Suisse, à l'EMPA de Dübendorf à la fin des années 1980 sous la direction du Professeur U. Meier. L'avantage de cette méthode est la facile extrapolation des résultats obtenus par le collage de tôles d'acier.

I.4.3 Application du composite TFC :

I.4.3.1 Définition de procédé TFC :

Le procédé TFC est un procédé breveté de renforcement structural par collage d'armatures additionnelles à base de fibre de carbone, mis au point en partenariat avec le LCPC, ATOFINDLEY, SOFICAR et FRESSINET, commercialisé et posé par FRESSINET.

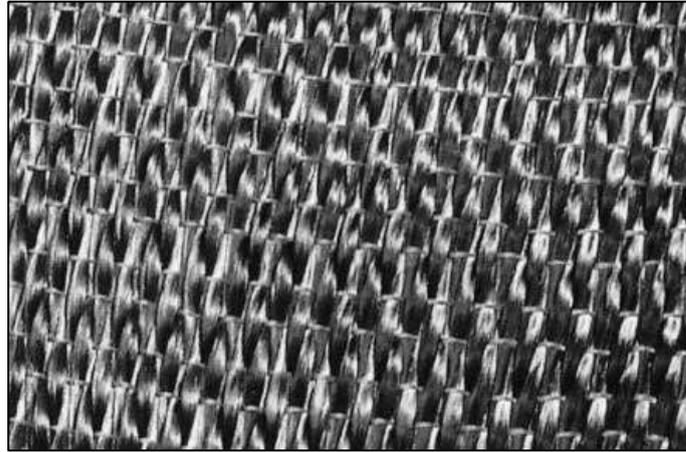


Figure I.10 Tissu de fibre de carbone (TFC)

Le procédé est basé sur le principe d'un placage de matériau résistant aux efforts de traction et judicieusement collé sur les zones tendues de la pièce à renforcer pour en augmenter les performances de fonctionnement.

Le procédé TFC a essentiellement un rôle de renforcement structural aux efforts engendrés par les effets de flexion comme d'efforts tranchants. Le TFC est un composite à base de fibres de carbone matricées dans un liant synthétique appliqué à froid dans le but d'être intégré par adhérence au support pour équilibrer les tractions induites dans la section.

La mise en œuvre de composite directement sur le support permet de mouler la forme exacte de la pièce à renforcer, de ne pas manier de plaques lourdes ou encombrantes, de ne pas avoir d'autre interface de collage avec le support que la matrice même du composite, et donc de ne pas générer de concentration de cisaillement pouvant provoquer des amorces de décollement dans les zones de faible épaisseur de résine.

I.4.3.2 Domaine d'application

Les techniques de renforcement du TFC s'étendent à tous les domaines de la construction civile ou militaire:

- Bâtiments d'habitation, commerciaux et industriels.
- Passerelles, ponts routiers et ferroviaires.
- Réservoirs, silos, aéroréfrigérants, cheminées, etc.

Le TFC est le plus souvent utilisé pour les structures en béton, mais peut être également appliqué sur d'autres supports comme l'acier, les maçonneries, le bois (massif, aggloméré ou lamellé), les stratifiés.

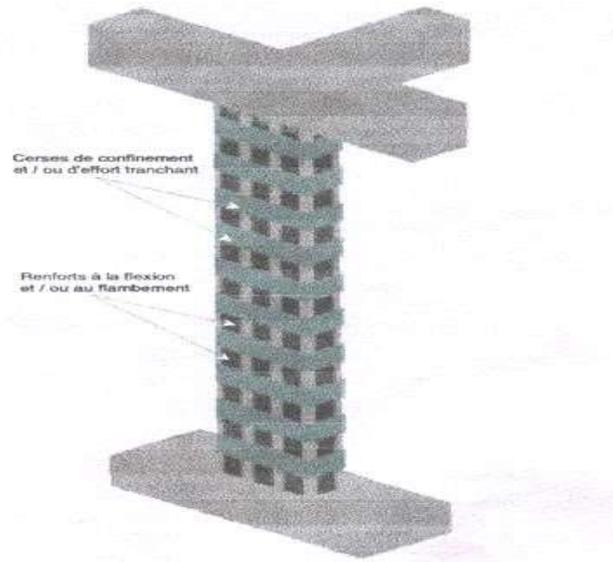


Figure I.11 Renforcement des poteaux par TFC [5]

I.4.3.3 Résine de la matrice du composite TFC

Le procédé de renforcement de structures par TFC nécessite l'utilisation d'une résine synthétique destinée à imprégner le tissu TFC et à assurer la liaison avec le support à renforcer. Le procédé utilise un système époxydique bicomposant spécifique dont les caractéristiques rhéologiques permettent l'application sur des surfaces verticales ou en plafond tout en permettant une imprégnation optimale de TFC. Il peut être utilisé sur des supports tels que le bois, l'acier, le béton sec ou humide à des températures comprises entre 5 et 45°C.] La colle bicomposante du TFC porte les références EPONAL RESINE et EPONAL DURCISSEUR.

❖ Les caractéristiques de la résine TFC

La colle TFC est constituée de 2 composants (résine + durcisseur) prédosés conditionnés en sacs de 1,8 kg. La consommation moyenne d'adhésif Eponal TFC, par exemple pour un tissu de grammage 500g/m² est de 1,2 à 1,5 kg/m² par couche de tissu, elle varie suivant la nature et l'état de surface du support à renforcer. La durée pratique d'utilisation des mélanges dépend de la quantité mise en œuvre (effet de masse) et de la température ambiante (exothermie), la vitesse de durcissement après application, liée à la température ambiante conditionne le délai avant mise en service. La colle TFC doit être utilisée par du personnel ayant reçu une formation préalable concernant le respect des règles élémentaires

d'hygiène (protection individuelle, nettoyage et élimination...) et les risques spécifiques liés à l'utilisation de ce produit (contact accidentel avec la peau, précautions d'emploi...).

I.4.3.4 Préparation des supports en béton

a) Cas généraux pour toute nature de support

Les supports doivent être débarrassés de tous produits pouvant contrarier la bonne adhérence du TFC. Les matériaux supports sont systématiquement préparés en surface par des moyens mécaniques de décapage de surface adaptés. Un essai de traction directe est réalisé in situ par pastillage pour caractériser le support avant la pose pour vérifier que les caractéristiques mécaniques du support soient au moins égales à celles prise en compte dans le calcul. Bien que le TFC ait de grandes capacités à épouser les formes les plus diverses et même non développables, il ne dispose pas de la capacité à suivre les défauts ponctuels de bétonnage tel que les bullages, les petites épaufrures, les nids de cailloux, désaffleurement, ou autres. Il y a donc nécessité dans certains cas d'effectuer des ragréages de structure avant d'effectuer l'application du TFC. [16]

b) Préparation des supports en béton

La surface de collage du béton doit être préparée de façon à créer un état de rugosité suffisant et à éliminer la couche de surface offrant généralement peu de cohésion. Les moyens de préparation peuvent être choisis en fonction des surfaces à traiter et des nuisances occasionnées lors du traitement.

La préparation peut être réalisée par:

- sablage à sec.
- sablage humide.
- Hydrodécapage (machine travaillant à 2000 bars).
- Pistolets à aiguilles.
- Bouchardage (tête de boucharde minimum 25 dents, un brossage général est indispensable après ce traitement)

I.4.3.5 Application du TFC

Le TFC est un tissu sec appliqué sur couche de résine humide. L'application est faite directement sur le support.

a) Mélange de la résine

La colle époxy bicomposant est livrée en kits prédosés, elle doit être mélangée dans son intégralité. Le mélange doit être effectué de façon mécanique en utilisant un fouet hélicoïdal monté sur une perceuse. Les deux composants sont de teintes distinctes, Le mélange est prêt quand la teinte du produit mélangé est uniforme.

b) Application de la première couche de résine

On applique la première couche de colle époxy (dite couche de collage) avec des moyens permettant de masser le support pour faire pénétrer la résine au mieux dans les anfractuosités du support, et assurer ainsi une bonne imprégnation de surface.

La couche de collage est appliquée à raison de $700\text{gr}/\text{m}^2 \pm 50\text{g}$ au moyen d'un rouleau à poils ras. Pour des surfaces importantes, on peut utiliser des rouleaux autoalimentés type Airless par exemple.

c) Application des bandes de tissu de carbone

Les tissus sont préalablement découpés en lés aux dimensions indiquées par le plan de pose. Les tissus sont livrés en largeurs standard, les découpes sont donc toujours dans le sens de la largeur. Les coupes dans les tissus ne sont pas admises car sans fil de bordure le tissu se défait et rend le collage difficile. Le tissu doit toujours être appliqué sur une couche de résine humide, la pose du tissu sur la couche humide se fait en partant d'une extrémité vers l'autre par placage du revers de la main sur la résine de collage à l'avancement. Pendant cette opération de pose, on vérifie de collage à l'avancement le parallélisme d'un des bords extérieurs du lé par rapport à une trajectoire tracée sur le support, ou par rapport au lé précédant dans le cas de bandes juxtaposées. Après la pose le tissu doit être fermement plaqué sur le support par un marouflage permettant l'imprégnation de la colle dans le fibre et l'élimination des bulles d'air éventuelles. Le marouflage est réalisé au moyen d'un rouleau en élastomère souple ou d'un rouleau de peintre à poils ras muni de son tube de protection en polyéthylène. Après l'opération de marouflage le tissu doit avoir un léger poisseux au toucher bien que la présence de résine ne soit pas perceptible en tous points.

d) Application de la couche de résine de fermeture :

La deuxième couche de résine (dite couche de fermeture) est destinée à donner l'apport de matière époxydique permettant d'achever l'imprégnation du tissu. Cette deuxième couche est appliquée immédiatement après le pose du tissu : en aucun cas cette couche ne peut être

appliquée après polymérisation de la première couche. L'application de la couche de fermeture est faite au moyen d'un couteau à enduire passé dans le sens des fibres sans excès de pression. La quantité de mise en œuvre sur cette couche est de $700\text{g}/\text{m}^2 \pm 50\text{g}$. La pose de cette couche n'est jamais strictement uniforme, on peut après durcissement constater en surface de TFC des zones plus ou moins brillantes dues à des surépaisseurs de colle, ces défauts d'aspect n'altèrent pas la résistance du renforcement.

e) Recouvrements

On appelle recouvrement la longueur nécessaire de tissu superposé pour assurer la continuité d'une bande interrompue, et prolongée par une autre. Les recouvrements ne s'appliquent généralement qu'au sens longitudinal du tissu de renforcement. C'est souvent le cas rencontré quand il est nécessaire de déplacer des échafaudages ou de travailler par zones pour des raisons d'exploitation dans des locaux en service. Les recouvrements peuvent alors être réalisés soit sur couche de résine encore humide ou sur couche de résine durcie.

- Sur couche de résine humide : le tissu en recouvrement peut être appliqué directement sur la couche de finition du les déjà posé.
- Sur TFC durci : la zone de recouvrement peut être dépolie au moyen d'un papier abrasif et nettoyée au moyen d'un chiffon imbibé de MEC, avant d'appliquer une couche de collage sur laquelle sera posé le tissu.

Le recouvrement doit avoir une longueur minimum de 10 cm quelle que soit la largeur du tissu.

f) Couches de TFC superposées

Il est possible de superposer des couches de TFC pour réduire la contrainte de travail dans le matériau de renfort. La superposition de couches peut se faire sur couche de résine humide pendant la pose sont alors identiques dans les deux cas aux procédures de recouvrement. Le nombre maximum de couches superposées n'est limité que par la capacité d'adhérence au support calculée.



1

2

3

Figure I.12 Différentes étapes d'application de TFC

Conclusion

On admet généralement que la durée d'exploitation d'un ouvrage en béton armé est de cinquante à cent ans, suivant son importance ou sa fonction. Durant une telle période, il est possible que des modifications importantes surviennent (changement d'exploitation de l'ouvrage ou dégradation des matériaux). Dans ce chapitre on a fait une synthèse sur les pathologies affectant les ouvrages d'art et les différentes techniques de réparation. Parmi ces techniques on trouve celle appelé méthode de renforcement par collage de fibre de carbone qui est devenu de plus en plus utilisable grâce aux caractéristiques de ce matériau.

Chapitre II

Matériaux Composites

Matériaux Composites

II.1 Généralités

II.1.1 Historique

A l'image des technologies qui ont caractérisé l'évolution rapide de la science durant la dernière moitié du XX siècle, les matériaux, voire même leur concept, ont été marqués par des évolutions fondamentales. Pendant longtemps, le tout métallique, caractérisé par le développement de l'industrie sidérurgique, a rempli le cahier des charges de toutes les applications industrielles. L'introduction de nouvelles familles de matériaux à partir des années 70 a non seulement occasionné d'autres matériaux dans un espace initialement réservé aux matériaux métalliques, mais surtout amené à penser différemment les concepts associés aux choix des matériaux. Par conséquent, les nouveaux matériaux nécessitent de la part des constructeurs une meilleure maîtrise des différentes étapes qui vont de la conception du matériau à son utilisation en passant par sa réalisation.

La caractérisation d'un matériau composite doit tenir compte de toutes les conditions et considérations afin de mieux définir désormais, son rôle et ses performances à pouvoir même remplacer certains matériaux métalliques d'égale résistance mais plus léger et encore mieux résistant dans des milieux les plus agressifs. L'utilisation des matériaux composites implique des choix restreints conditionnés par les caractéristiques des différents éléments du matériau choisi (résines, fibres, additifs, ...) et par le procédé de mise en œuvre. La connaissance de toutes les caractéristiques de la matière première permettent, par la sommation de leurs performances (physiques, chimiques, mécaniques, ...etc.), de définir celles du produit final. Pour l'étude du comportement d'un matériau composite et pouvoir ainsi établir ces propriétés, il est impératif de connaître son rôle et sa destination selon un cahier des charges pré établi, comment et par quoi le caractériser.

II.1.2 Définitions

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes. Leur association est complémentaire et permet d'aboutir à un matériau dont les performances recherchées seront supérieures à celles des composants pris

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

II.2 Caractéristiques générales des matériaux composites

Dans le cas de plusieurs phases discontinues de natures différentes, le composite est dit hybride. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue.

La phase continue est appelée la matrice. La phase discontinue est appelée le renfort ou matériau renforçant.

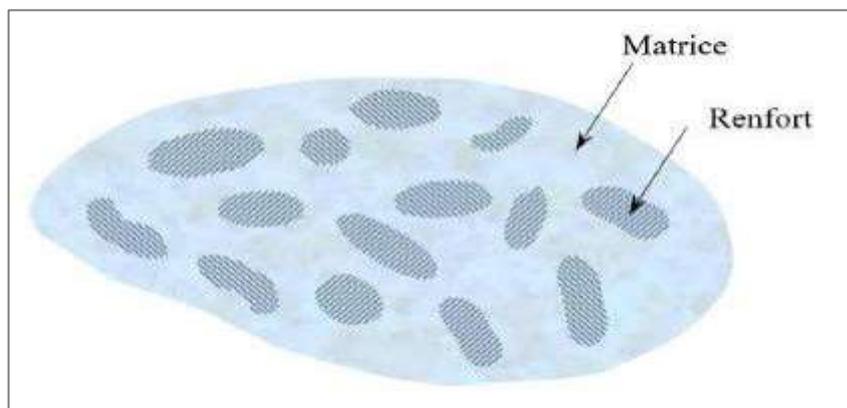


Figure II.1 Schéma des composants du matériau composite

Ces propriétés dépendent de beaucoup de facteurs qui résultent :

- Des propriétés, de la nature, et de la quantité des constituants,
 - De leur distribution géométrique, □ De leurs interactions,
- etc....

II.2.1 Classification des matériaux composites

Selon la nature de la matrice, on distingue trois grandes classes de composites, considérées ici par ordre croissant de tenue en température :

- ✓ Les composites à matrice polymère (CMP)
- ✓ Les composites à matrice métallique(CMM)
- ✓ Les composites à matrice céramique(CMC)

Les matériaux utilisés comme renforts présentent de bonnes propriétés mécaniques intrinsèques (carbone, alumine, silice, bore, kevlar, acier, nitrure et carbure de silicium...). Les renforts continus ou fibres longues possèdent un diamètre qui varie selon leur nature, entre quelques micromètres et une centaine de micromètres. Selon l'application envisagée, l'assemblage de ces fibres longues peut être unidimensionnel (plis unidirectionnels), bidimensionnel (plissés, mats à fibres coupées de quelques centimètres ou à fibres continues) ou tridimensionnel (tissus multidimensionnels).

Les matrices polymères renforcées par des fibres de verre, sont employées dans les produits de grande diffusion, et possède une grande importance. Les fibres de carbone et de kevlar sont utilisées dans pour des applications plus spécifiques de hautes performances telles que l'aéronautique et l'aérospatiale. D'autres types de renforts sont employés tels que des billes (verre, élastomère ...) et des charges (fibres broyées, écailles, poudres...). L'utilisation des (CMP) reste limitée au domaine de températures inférieures à 200°C.

II.2.2 Composants

Les principaux constituants sont le renfort et la matrice. Le renfort a pour rôle d'apporter au matériau composite ses performances mécaniques élevées. La matrice qu'on appelle aussi liant, son rôle est de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de Protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures.

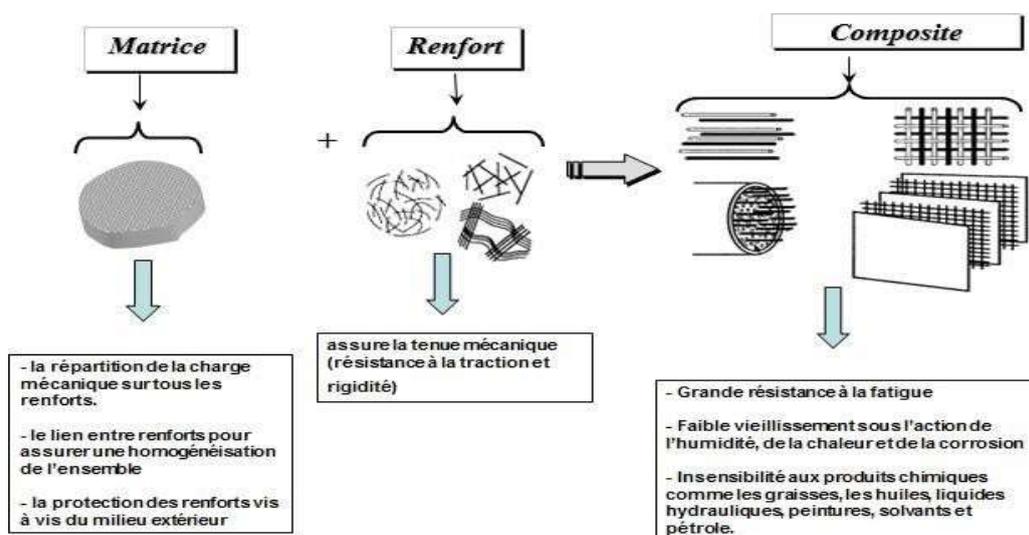


Figure II.2 : Différents constituants d'un matériau composite

II.2.2.1 La matrice

Le rôle de la matrice est principalement de lier les fibres, mais aussi, d'assurer une répartition spatiale est homogène du renfort. D'un point de vue mécanique, la matrice transmet et répartie les efforts extérieurs vers le renfort. D'un autre côté, elle apporte à la structure une tenue chimique et donner la forme désirée au produit (figure II.3).

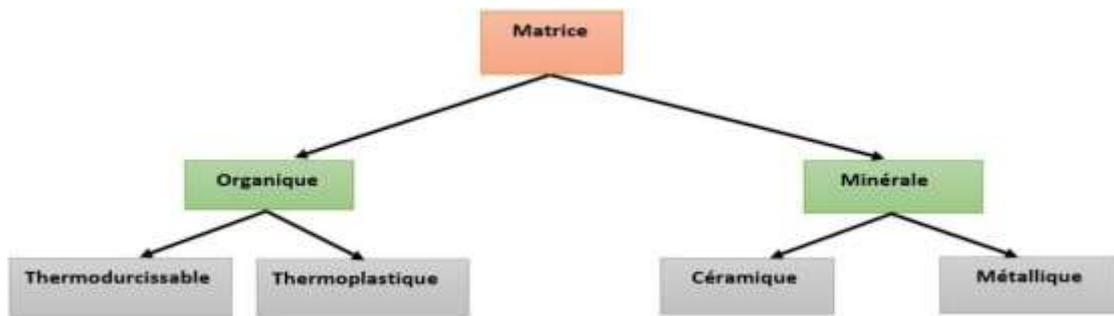


Figure II. 3 : Classification des matrices

II.2.2.1.1 Les matrices organiques

Les matrices en polymère de synthèse sont les plus couramment rencontrées dans les composites de grande diffusion. Associées des fibres de verre, d'aramide ou de carbone, elles ont un faible module et une faible résistance à la traction, mais se prêtent facilement à l'imprégnation des renforts pour leur fabrication. La structure des thermoplastiques (TP) se présente sous forme de chaînes linéaires, ils ont besoin d'être chauffés pour les mettre en forme. Le refroidissement par contre permet de les fixer (les chaînes se bloquent). La structure des thermodurcissables (TD) possède la forme d'un réseau tridimensionnel, le durcir dans ce cas est définitive, la transformation est donc irréversible matrice.

II.2.2.1.2 Les matrices thermodurcissables :

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, aminoplastes, furaniques) et les résines époxy sont des résines Thermodurcissables.

II.2.2.1.3 Les matrices thermoplastiques

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont dures et solides qui nécessitent une transformation à très haute température. Les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. De même que pour les résines thermodurcissables, les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible.

II.2.2.1.4 Les matrices métalliques

L'imprégnation de renforts par un alliage liquide étant une opération techniquement délicate, en pratique seuls les alliages d'aluminium sont utilisés dans ce type de technique, associés à des fibres ou particules de graphite ou de céramiques. Ils sont faciles à mettre en œuvre car leur température de fusion est relativement basse. Le compromis obtenu entre la ténacité de la matrice métallique et la rigidité des renforts donne au composite des caractéristiques mécaniques intéressantes par rapport à l'alliage seul, surtout au-dessus de 200 °C. Leur coût de mise en œuvre élevé réserve les composites à matrice métallique aux applications aéronautiques et spatiales.

II.2.2.1.5 Matrices Céramiques

Des composites à matrices céramiques peuvent être obtenus par imprégnation de préformés de fibres (métaux, verres, aramides, carbone, céramique) soit par des suspensions liquides, ensuite frittées en température sous haute pression, soit par des gaz réactifs permettant un dépôt entre les fibres (notamment pour les composites carbone-carbone).

II.2.3 Les renforts

Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de moduler à la carte les propriétés mécaniques des matériaux composites pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes dans un plan. La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure ()

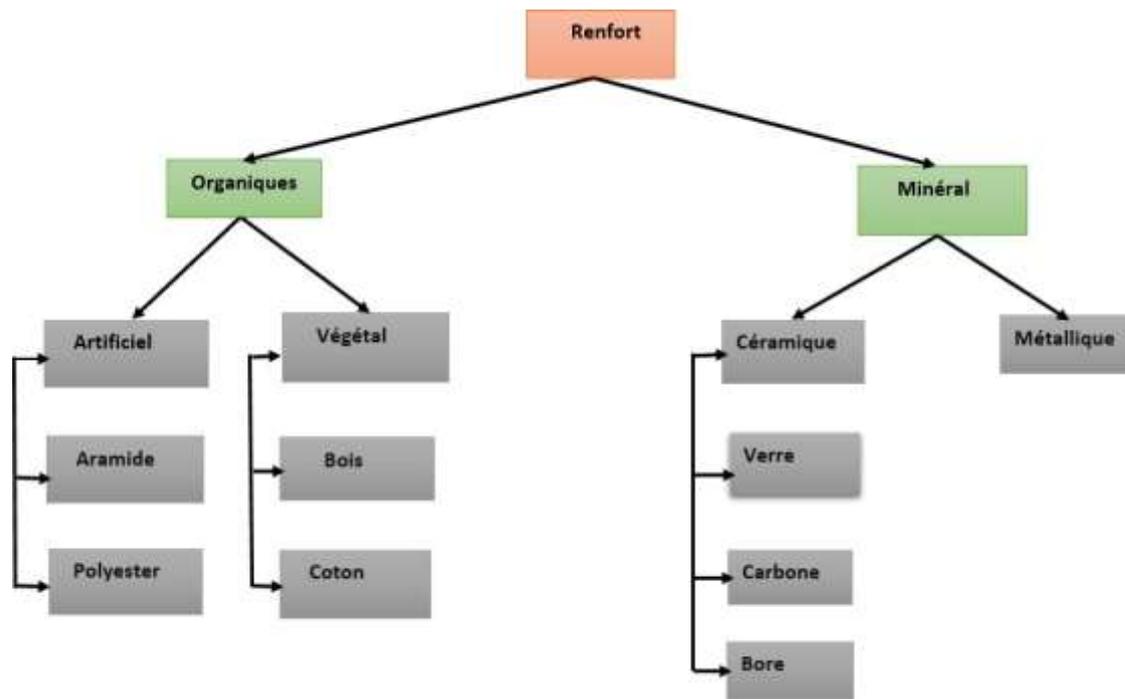


Figure II.4 : Différents types de renfort de base.

II.2.3.1 Renfort en fibres discontinues

Des fibres courtes, ou particules (charges sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écailles ou de poudre), permettent d'améliorer certaines propriétés de la matrice (résistance à l'usure, propriétés thermiques, poids). Celle-ci reste l'élément de base et on obtient alors un « polymère renforcé ».

II.2.3.2 Renfort continu

Sous forme de fibres longues qui sont généralement utilisées pour des composites HP. Cette forme fibreuse offre une résistance à la rupture et souvent un module d'élasticité beaucoup plus élevée que ceux du même matériau massif, avec une augmentation de la longueur de 10000 fois, ou bien pour le même volume, la surface est multiplié par 100 dans le cas des fibres de verre. Ces renforts ont le rôle d'assurer la bonne tenue mécanique des composites et sont disposés au sein du matériau en fonction des propriétés recherchées. Pour créer une structure résistante adaptée aux contraintes mécaniques, il existe plusieurs architectures de renforts :

-Unidirectionnelle (nappes ou roving), bidirectionnelle (tissus ou complexes 2D),

-Tridimensionnelle (fibres orientées suivant trois directions).

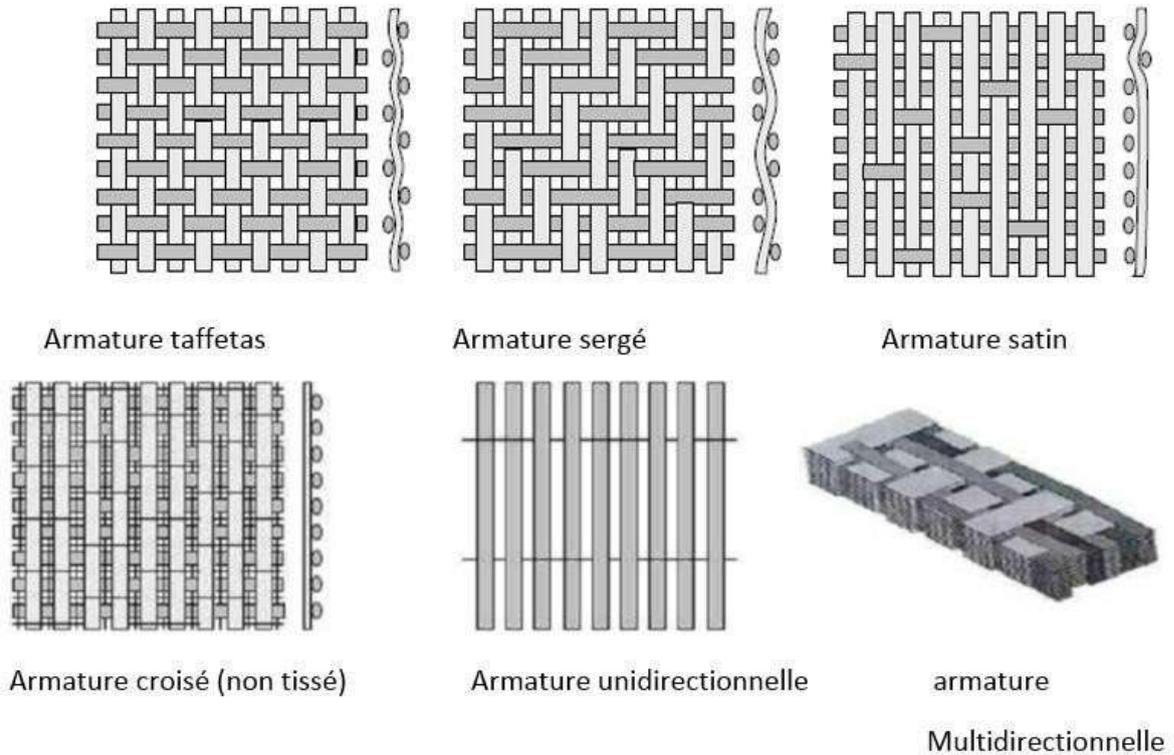


Figure II.5 : Différentes formes de renforts continus.

II.3 Avantages et inconvénients des composites

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à :

- Leur légèreté
 - Grande résistance à la fatigue
 - Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion
 - Insensibilité aux produits chimiques
 - Possibilité de prendre plusieurs formes (pièces complexes)
 - Bonne tenue au feu (attention aux dégagements toxiques)
- Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion

- Les coûts des matières premières et des procédés de fabrication
- La sensibilité à la chaleur.

II.4 Techniques de renforcement par matériaux composites

II.4.1 Concept

Les matériaux composites utilisés pour le renforcement se présentent sous la forme de tissus ou de plaques stratifiées. Les comportements observés avec ce type de renforcement, sont plus performants, que le renforcement en tôles d'acier. Les expériences menées jusqu'à présent, montrent l'utilisation des matériaux composites en fibres de verre, de carbone ou d'aramide. Ainsi, l'amélioration de la durée de vie de l'ouvrage est due aux propriétés des composites : la rigidité, la résistance mécanique, la résistance à la corrosion. De plus, ces matériaux permettent une conception du renfort plus adaptée au besoin de la structure grâce à des procédés qui se prêtent bien à la notion de réparation. La plupart des activités de recherche utilise le FRP pour le renforcement de poutres en béton armé pour augmenter leur capacité de flexion. Vis-à-vis des renforcements au cisaillement, les recherches récentes sont très largement conduites sur des poutres de section en T par la méthode de collage externe. On peut effectuer avec les PRF un renforcement en flexion en collant les bandes sur la surface inférieure de la poutre. Un renforcement en cisaillement peut être apporté par le collage des bandes sur les joues de ces mêmes poutres.

❖ Définition de PRF:

Un polymère renforcé de fibres PRF (en anglais Fibre Reinforced Polymer) est un matériau composite qui se compose d'un arrangement de matrice et de fibres continues ou discontinues. De façon générale, les fibres de carbone ou de verre sont noyées dans une matrice polymère. La résistance mécanique de la matrice est beaucoup plus faible que celle des fibres. De par l'orientation privilégiée des fibres le matériau composite est en général anisotrope. Ses caractéristiques mécaniques et chimiques, et sa densité très favorable en font un matériau très efficace comparé au métal. Les matrices utilisées sont généralement d'origine pétrolière, on peut citer notamment les résines polyester thermodurcissable, les résines époxydes, les résines

vinylester ou encore les résines thermoplastiques (polyamides...). Les fibres utilisées dans le renforcement de structure sont en général des fibres de carbone, de verre, d'aramide ou de basalte. Ces fibres ont un comportement élastique jusqu'à la rupture, avec une très grande résistance en traction et module d'élasticité.

❖ **Avantages:**

- Rapport résistance - poids très élevé.
- Très grande rigidité.
- Résistance à la fatigue et à la corrosion.
- Facilité de mise en place.
- Possibilité d'optimisation (choix de renforcement, direction).
- Multifonctionnalité (résistance mécanique, résistance à l'eau et à la corrosion, etc.).
- Le non nécessité d'une fixation mécanique : comparativement aux platines d'acier.

❖ **Inconvénients:**

- Coût élevé du produit de base jusqu'à 10 fois le coût de l'acier, pour une masse identique.
- Connaissances limitées sur leurs propriétés à long terme, notamment en ce qui concerne l'adhérence à l'interface béton-composite.
- Manque de ductilité.
- Absence de normes de design.

II.4.2 Méthode de renforcement par bar NSM « Near-Surface Mounted »

Dans le cas de la méthode de collage externe, la ruine des poutres apparaît par le décollement du composite dans la plupart des tests. Le problème est que la surface de connexion entre béton et composite est insuffisante. Pour éviter le problème du décollement du FRP dans la méthode EB, la méthode NSM a été développée. Des rainures sont créées sur la surface de renforcement de la poutre, des bandes ou barres FRP sont mises dans les rainures et sont collées au béton par une résine époxy. Avec cette méthode, le FRP est lié avec le béton sur deux faces, donc la liaison entre le FRP et le béton est grand et le décollement du FRP est limité. Le décollement du composite est limité dans la méthode NSM, mais les expérimentations ont montré une séparation de la couche du béton de protection sur la zone renforcée, dans le mode de rupture des

poutres renforcées. Le processus de renforcement au cisaillement de poutres en béton armé par la méthode NSM est réalisé par les étapes suivantes :

- La position des entailles est définie sur la surface de renforcement, les entailles sont coupées à l'aide d'une tronçonneuse avec la profondeur qui correspond à la conception. Cette étape est réalisée soigneusement pour ne pas couper les armatures longitudinales.
- Les entailles sont nettoyées à l'air comprimé, pour enlever toutes les poussières et assurer la bonne adhérence entre béton et résine époxy.
- Les entailles sont remplies à 2/3 de la profondeur par de la résine époxy.
- Les bandes de renforcement FRP sont insérées dans les entailles remplies, et enfoncées avec une pression suffisante pour assurer qu'elles soient bien en place, et qu'il n'y ait pas de vides autour des plaques.
- La résine époxy est ajoutée pour remplir complètement les entailles.

II.4.3 Renforcement des éléments structuraux

Les matériaux composites, sont utilisés pour renforcer tous types d'éléments de structures, comme les poutres les appuis, les dalles, les consoles, les poteaux et autres.

II.4.3.1 Renforcement des poteaux

Les poteaux (comme tout appui de pont), qui sont des éléments verticaux, sont renforcés d'une manière confinés (Figure II.6). Le confinement se fait par application des tissus monodirectionnelles, comme "Sika Wrap" [5].



Figure II.6 Poteau circulaire en BA confiné par composites

II.4.3.2 Renforcement des poutres

De même pour les poutres, qui sont des éléments qui travaillent en flexion, ou la fibre inférieure est la fibre ou les composites sont collés. Le renforcement se fait par application des tissus bidi-directionnelles [6], comme ‘‘Sika Carbodure, ou même en combinant les deux types de composites (Figure II.7).



Figure II.7 Poutre renforcées par matériaux composites

II.4.3.3 Renforcement des dalles

Pour les dalles, qui sont généralement, aux niveaux des planchers (pour les bâtiments), ou des dalles d’entretoisement (cas des ouvrages d’art), ce sont des éléments surfaciques. Pour cela, le renforcement se fait d’une manière croisé et ce, pour reprendre les effets des deux moment longitudinal et transversal (Figure II.8).



Figure II.8 Dalle de tablier de pont renforcée

II.4.3.4 Renforcement des murs

Le renforcement des murs, que ce soit leur rôle, se fait selon la face tendue. En effet les murs de soutènement, les parois moulées, les voiles des bâtisses, peuvent avoir des renforcements par composites CFRP, avec une ou plusieurs couches, selon la gravité de la pathologie [7].



Figure II. 9 Mur en béton renforcé par CFRP

II.5 Maintenance des structures de génie civil

II.5.1 Principe

La maintenance des ouvrages est un problème de plus en plus préoccupant, dans la mesure où le coût des ouvrages neufs est élevé les conditions de réparation sont de plus en plus difficiles. Elle consiste à protéger en assurant une meilleure étanchéité et en limitant la corrosion, à réparer en cherchant à compenser les pertes en rigidité et en résistance, à renforcer en améliorant les performances et la durabilité de l'ouvrage.

L'Algérie dispose d'un patrimoine d'ouvrages d'art comportant plus de 2100 ponts routiers, dont 55% routiers, avec un âge dépassant les 50 ans pour 35% de ces ouvrages. Une politique de surveillance permanente, avec un suivi dans les courts et moyen termes, s'impose. Les pouvoirs publics ont lancé des programmes très ambitieux avec des budgets consistants dans le but du suivi et de la sauvegarde de ce patrimoine par des interventions (renforcement et réparations adéquates). Plusieurs techniques de renforcement ont montré

leur efficacité, comme celle appelée technique de collage par matériaux composites. L'évaluation structurelle des ponts renforcés par ces techniques à composites à base de fibres de carbone, dans le temps, dépend de plusieurs paramètres, tels que le mode de renforcement, le type de l'ouvrage, les conditions de renforcement de la structure, le climat environnant, le degré d'endommagement et les méthodes appliquées pour le test in situ sur l'ouvrage en question.

II.5.2 Définitions

II.5.2.1 Renforcement

Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service et en particulier l'augmentation de la ductilité et de la résistance d'un élément de structure pour en permettre l'utilisation dans des conditions non prévues à l'avance pendant la phase de conception et de calcul. Un renforcement peut être associé à une réparation.

II.5.2.2 Réparation

Pour la réparation d'une structure, c'est une opération qui consiste à lui restituer, par des travaux appropriés, un niveau de service perdu, la baisse du niveau de service peut résulter de toutes sortes de causes ; les plus fréquentes sont la dégradation progressive des matériaux (agressions atmosphériques, modification des propriétés des matériaux), l'utilisation intensive (effet de répétition des charges) voire abusive (utilisation au-delà des charges prévues), les accidents et sinistres (incendies, choc ,séisme, ...).

II.6 Guides de calcul de renforcement

Il existe plusieurs guides de calcul de renforcement et la méthodologie appliquée. Parmi ces guides, on peut citer le guide Américain Aashto, les Eurocodes, sans oublier les avis et notices techniques élaborés par des compagnies, comme le Sika et Freyssinet.

II.6.1 American AASHTO guide

Il s'agit d'un guide de conception des transports fait plus que synthétiser des données et des faits scientifiques : il reflète les valeurs d'une culture fondées sur les opinions et le climat politique de l'époque, ainsi que sur les connaissances et les préjugés des personnes

impliquées dans l'élaboration du guide. Des années 1950 aux années 1970, la profession du transport s'est presque entièrement concentrée sur l'expansion de la mobilité des véhicules à moteur, comme en témoigne l'achèvement d'un réseau d'autoroutes de 26 000 milles en 1971 après seulement 15 ans d'efforts. C'est dans ce contexte d'expansion suburbaine, de dépendance croissante à l'automobile et de dégradation de la qualité de l'air qu'a émergé l'intérêt pour le vélo comme moyen de transport.

American Association of State Highway and Transportation Officials(AASHTO), est un organisme de normalisation qui publie des spécifications, des protocoles d'essai et des directives qui sont utilisés dans la conception et la construction des routes aux États-Unis. Malgré son nom, l'association ne s'intéresse pas seulement aux autoroutes mais traite également des transports aériens, par rail, par eau ainsi que des transports en commun. Le conseil d'administration de l'AASHTO est composé du Ministère des Transports de chaque État des États-Unis, ainsi que de celui de Porto Rico et de celui du District de Columbia. Le département américain des Transports, certaines villes américaines, les comtés et les opérateurs de péage routier, la plupart des provinces canadiennes ainsi que les routes du Département de Hong Kong, le ministère des Travaux publics turc et l'Association des routes nigérianes et des organismes des transports ont des droits de vote en tant que membres associés.

De point de vue historique, l'American Association of State Highway Officials (AASHO) a été fondée le 12 décembre 1914. Son nom a été changé en American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) le 13 novembre 1973. Ce changement de nom reflète un élargissement du champ d'action de l'organisme pour couvrir tous les modes de transport, même si la plupart de ses activités sont toujours principalement consacrées aux autoroutes. Alors que l'AASHTO n'est pas un organisme gouvernemental, il possède des pouvoirs quasi-gouvernementaux dans le sens que les organismes qui soutiennent ses membres appliquent la plupart des décisions prises par l'AASHTO.

II.6.2 Guide Européennes EUROCODES

Les Eurocodes sont les normes européennes de dimensionnement et de justification des structures de bâtiment et de génie civil. Ils visent à harmoniser les techniques de construction en Europe, et à faciliter le libre accès des entreprises (travaux publics, bureaux d'études techniques..) aux marchés des autres États membres. L'élaboration de

méthodes uniformisées pour le calcul des structures est en cours au niveau européen depuis des dizaines d'années. Ce travail s'est d'abord fait à petite échelle au sein de quelques organisations comme l'UIC (Union internationale des chemins de fer), le CEB (Comité Euro-international du Béton), la FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte), la RILEM (Réunion internationale des laboratoires d'essais de matériaux), le CIB (Conseil international du bâtiment) ou l'AIPC (Association internationale des ponts et charpentes). Dans les années 1970, la Commission européenne s'est intéressée à la démarche. La création du marché unique pour les produits de construction nécessitait des normes européennes pour les produits, mais aussi pour la conception des ouvrages. Dans les années 1980, la Commission a fait produire de premiers documents n'ayant pas encore un véritable statut de normes, dits "Eurocodes".

En 1989, la Directive Produits de Construction (DPC ou CPD pour "Construction Products Directive") est approuvée par la Communauté Européenne. La normalisation européenne s'intègre dans un cadre général logique, et les activités s'enchaînent à un rythme plus soutenu. La CPD introduit des exigences essentielles pour les ouvrages, et pour le marquage CE des produits de construction, jetant ainsi les bases du futur marché unique de la construction. La directive précise que les produits de construction ne peuvent être mis sur le marché dans l'Union européenne, qu'assortis d'un marquage CE qui certifie qu'ils « ont des caractéristiques telles que les ouvrages dans lesquels ils doivent être incorporés, assemblés, utilisés ou installés, puissent satisfaire aux exigences essentielles, à condition d'avoir été convenablement conçus et construits ». Les règles de respect des exigences essentielles pour les ouvrages restent de compétence nationale, mais la directive impose les Eurocodes comme référence à utiliser dans les normes de produits harmonisés pour le marquage des produits relativement à l'exigence essentielle de stabilité et de résistance mécanique. La rédaction des Eurocodes est confiée au Comité européen de normalisation (CEN) pour donner à ces documents le statut de norme européenne à part entière.

Ceci rend l'usage des Eurocodes obligatoire comme normes pour certains marchés. Ceci impose aussi que la procédure très stricte d'approbation des normes par le CEN prenne en compte des nuances techniques de tous les instituts membres dans le texte final.

Les Eurocodes ont d'abord été publiés comme « normes expérimentales » (ENV), le CEN les a désormais publiées comme normes au stade définitif (EN).

Historique du programme des Eurocodes :

- 1971 : directive Marchés publics de travaux
- 1976 : lancement des premiers Eurocodes
- 1980 : mise à l'enquête des Eurocodes
- 1989 : directive Produits de Construction^[2]
- 1989 : transfert des Eurocodes au CEN début ENV (normes provisoires)
- 1991-1998 : publication des ENV
- 1998 : début de la transformation des ENV en EN
- 2005 : achèvement du programme des Eurocodes
- 2004-2007 : publication des Eurocodes en France et de leurs annexes nationales □
mars 2010 : fin des normes nationales en contradiction avec les Eurocodes
(marchés publics seulement; période de transition pour les marchés privé.

Chapitre III

Calcul Numérique pour le Renforcement

Calcul Numérique pour le Renforcement

III.1 Introduction

Le renforcement des éléments structuraux ou d'ouvrages, doivent être calculé conformément aux règles et normes de calculs, comme le BAEL, BPEL, Eurocodes ou avis et notices techniques (comme le FOREVA, notices techniques SIKA) [8]. Dans le domaine du calcul des structures "Engineering", les principales méthodes numériques pour le calcul et le renforcement des structures sont : les méthodes analytiques, basées sur programmation par compilateurs (fortran, C++, Turbo Pascal, autres), la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis,...

Dans la pratique, on travaille à fait l'analyse numérique, qui consiste à traiter un calcul automatique avec une méthode appropriée, soit analytique, numérique ou paramétrée. On trouve dans la pratique, plusieurs méthodes d'application, comme la programmation par un compilateur désigné à cet effet.

La méthode des éléments fins (MEF) est un outil de résolution numérique approchée des problèmes de structures, plus généralement, des problèmes physiques régis par des équations différentielles. En général, un logiciel d'analyse se compose de trois modules essentiels: préprocesseur, calcul et post-processeur. Le recours aux modèles numériques pour la résolution des systèmes mécaniques devient nécessaire surtout s'il s'agit des systèmes complexes constitués de matériaux de forte hétérogénéité ou d'autres systèmes qui sont soumis à des chargements statiques ou dynamiques complexes [9].

III.2 Méthode des éléments finis

III.2.1 Préambule

L'analyse aux éléments finis (MEF) est une méthode de calcul utilisée dans les domaines scientifique et technique. Avec les éléments finis, il est possible de calculer des problèmes complexes qui ne peuvent pas être résolus par d'autres méthodes. En effet, la méthode des éléments finis étant une analyse numérique consistant à résoudre des équations

différentielles, il est possible de l'utiliser dans divers domaines physiques. Le composant à analyser est subdivisé en un grand nombre de petits éléments finis avec une géométrie simple, qui peuvent être calculés avec les équations initiales connues. Cette subdivision a donné le nom de la méthode numérique: méthode des éléments finis. En ingénierie, la méthode des éléments finis est aujourd'hui une méthode standard dans le calcul assisté par ordinateur des charpentes et structures planes..

III.2.2 Principe de la méthode des éléments finis

La MEF est basée sur une idée simple : subdiviser (discrétiser) une forme complexe en un grand nombre de sous domaines élémentaires de forme géométrique simple (éléments finis) interconnectés en des points appelés nœuds. Nous considérons le comportement mécanique de chaque élément séparément, puis nous assemblons ces éléments de telle façon que l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements soient satisfaits en chaque nœud. La MEF utilise des approximations simples des variables inconnues dans chaque élément pour transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques. Les nœuds et les éléments n'ont pas forcément de signification physique particulière, mais sont basés sur des considérations de précision de l'approximation.

Elle permet donc de résoudre de manière discrète une EDP dont on cherche une solution approchée « suffisamment » fiable. De manière générale, cette EDP porte sur une fonction u , définie sur un domaine. Elle comporte des conditions aux bords permettant d'assurer existence et unicité d'une solution. Sauf cas particuliers, la discrétisation passe par une redéfinition et une approximation de la géométrie, on considère donc le problème posé sur la géométrie approchée par un domaine polygonal ou polyédrique par morceaux. Une fois la géométrie approchée, il faut choisir un espace d'approximation de la solution du problème, dans la MEF, cet espace est défini à l'aide du maillage du domaine (ce qui explique aussi pourquoi il est nécessaire d'approcher la géométrie). Le maillage du domaine permet d'en définir un pavage dont les pavés sont les éléments finis. Un élément fini est la donnée d'une cellule élémentaire et de fonctions de base de l'espace d'approximation dont le support est l'élément, et définies de manière à être interpolantes. Bien qu'il existe de nombreux logiciels exploitant cette méthode et permettant de « résoudre » des problèmes dans divers domaines, il est important que l'utilisateur ait une bonne idée de ce qu'il fait, notamment quant au choix du maillage et du type d'éléments qui

doivent être adaptés au problème posé : aucun logiciel ne fait tout pour l'utilisateur, et il faut toujours garder un œil critique vis-à-vis de solutions approchées. Pour cela il existe des indicateurs d'erreur et des estimateurs d'erreur qui permettent d'ajuster les différents paramètres.

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

III.2.3 Etapes du calcul de la MEF :

III.2.3.1 Étapes logiques du calcul par éléments finis :

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

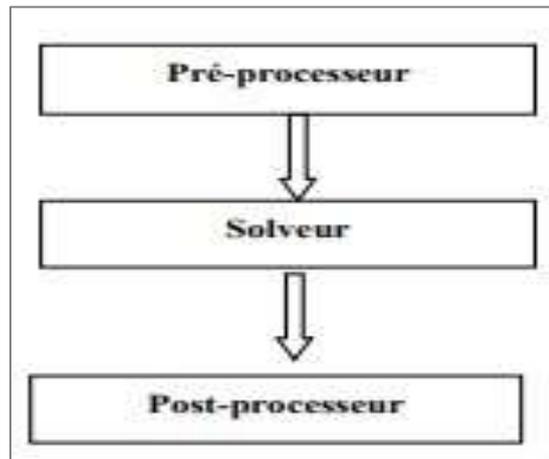


Figure III.1 Phase de calcul par le MEF

- **Préprocesseur**

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

- **Solveur :**

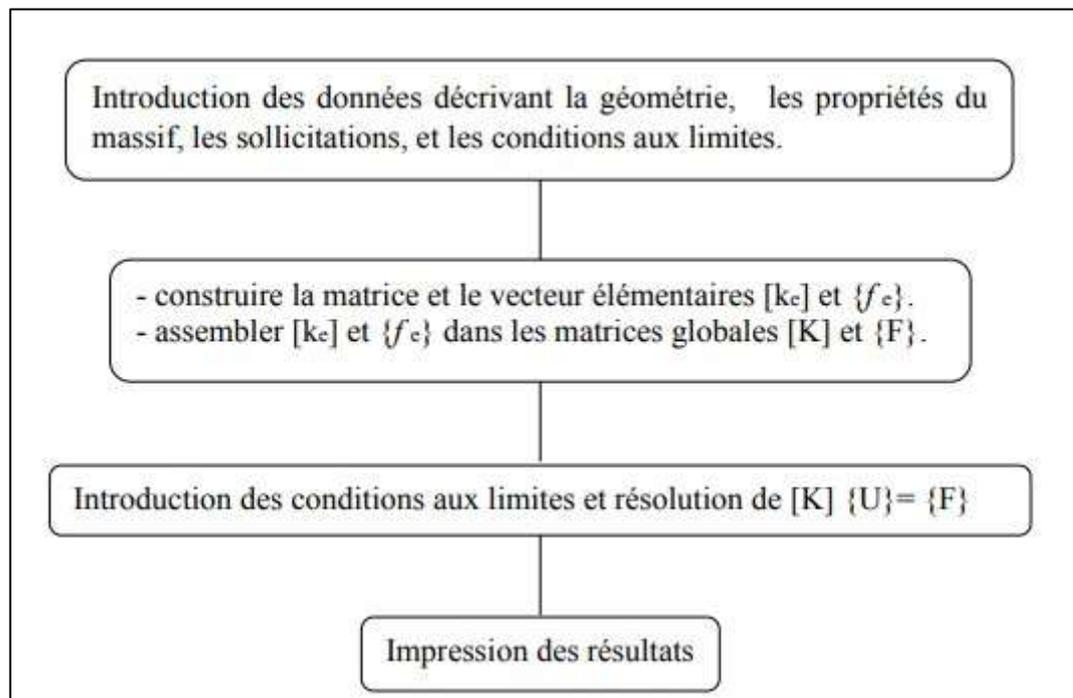
- Choisir le type d'analyse (statique, dynamique,...)
- Construire la matrice et le vecteur élémentaire $[k_e]$, $\{f_e\}$
- Assembler $[k_e]$ et $\{f_e\}$ dans $[K]$ et $\{F\}$
- Prendre en compte les conditions aux limites
- Résoudre le système d'équations $[K] \{U\} = \{F\}$
- Calculer les variations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

- **Post-processeur**
 - Présenter les résultats de façon intelligible et synthétique
 - Sous forme numérique
 - Sous forme graphique
 - Effectuer des fonctions complémentaires : combinaisons, interprétation, interpolations, animation.

III.2.3.2 Etapes d'un programme d'éléments finis :

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

Tableau III-1: Organigramme d'étapes caractéristiques d'un programme d'éléments finis



III.4 Choix du logiciel Ansys

Vu diversité dans la résolution des problèmes liés aux structures ; le logiciel commercial "Ansys" a été choisi dans notre étude. Il s'agit d'un logiciel riche en bibliothèque et qui permet de prendre le vrai comportement des matériaux introduits dans notre calcul, à savoir le béton, ses armatures, les matériaux composites et la colle adhésive.

III.4.1-ANSYS Structural :

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

- ❖ l'analyse statique
- ❖ l'analyse modale
- ❖ l'analyse harmonique (réponse forcée)
- ❖ l'analyse temporelle
- ❖ la gestion de différentes situations non-linéaires (contacts, plasticité matériaux, grands déplacements ou grandes déformations).

III.4.2-ANSYS Mechanical :

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

III.4.3-ANSYS CFX et Fluent :

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

convergence. Fluent est parallélisé et permet de tirer parti de systèmes multiprocesseurs aussi bien au sein d'une seule machine qu'en réseau (cluster, dualcore, plateforme multiCPU).

III.4.4-Gambit :

Un logiciel de maillage édité par la société ANSYS depuis 2006 (l'éditeur historique du logiciel était la société Fluent). Ce mailleur permet de créer géométries et maillages avec un grand degré de liberté et une grande précision. Le domaine géométrique peut aussi être importé depuis un fichier CAO. Il assure également le maillage automatique de surfaces et de volumes en parallèle de l'introduction de conditions aux limites. Gambit est souvent considéré comme un mailleur de référence par les modélisateurs utilisant Fluent.

III.4.5-ANSYS AUTODYN et ANSYS LS-DYNA :

Ces logiciels possèdent des solveurs utilisant les formulations explicites des équations à résoudre, contrairement aux produits précédemment cités. Leur domaine d'application est réservé aux modélisations mettant en jeu des situations mécaniques aux très larges déformations.

III.4.6-ANSYS Electromagnetics et Ansoft :

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

III.4.7-ANSYS Multiphysics :

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

III.5-Environnements logiciels

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

III.5.1-ANSYS classique:

Première solution logicielle développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques. À partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en utilisant le langage de script APDL (ANSYS Parametric Design Language). ANSYS classic est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.

III.5.2-ANSYS Workbench :

Cette plate-forme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en réutilisant le code ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièces) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul. Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. La plate forme est donc chargée de convertir les requêtes entrées par l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer la résolution. Le modèle éléments finis généré reste néanmoins manipulable en insérant des commandes propres au code ANSYS.

III.6- Logiciel ANSYS

III.6.1- Analyse structurelle

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

a- Capacités avancées

La simulation des matériaux complexes et du comportement des matériaux peut être réalisée à l'aide des modèles intégrés, des modèles de matériaux définis par l'utilisateur ou du Material Designer (Concepteur de matériaux) dans Mechanical pour créer des éléments de volumes élémentaires représentatifs (RVE). Les modèles soumis à une grande déformation ne doivent pas être simplifiés en passant inutilement à des solveurs explicites. La capacité adaptative non linéaire (NLAD) gère automatiquement les simulations difficiles grâce au remaillage de la solution au cours du processus.

La technologie de fracture SMART « splitting morphing adaptive remeshing technique », technologie de séparation, morphing, adaptation et remaillage) a été ajoutée à Mechanical pour la modélisation de la propagation des fissures dans les structures où la fracture est une préoccupation, de façon à éliminer les processus de maillage complexe et les suppositions. Ansys Motion est une solution de conception de nouvelle génération basée sur une dynamique multicorps flexible présent dans l'interface de Mechanical.

Elle permet une analyse rapide et précise de corps flexibles et rigides au sein d'un solveur unique.

b- Solution d'analyse structurelle complète

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

c-Applications Analyse structurelle

- ❖ Analyse de la résistance
- ❖ Vibrations
- ❖ Analyse thermique

- ❖ Durabilité
- ❖ Dynamique des corps rigides
- ❖ Hydrodynamique
- ❖ Matériaux composites
- ❖ Impact
- ❖ Optimisation
- ❖ Hpc pour l'analyse par éléments finis (fea, finite element analysis)
- ❖ Optimization topologique
- ❖ Fabrication additive

d- Analyse de Matériaux Composites par Ansys

Les matériaux composites apportent de nouvelles solutions - et de nouveaux défis à surmonter - aux fabricants en quête d'innovation, et de matériaux plus solides et plus légers. ANSYS Composite PrepPost fait partie d'ANSYS Mechanical Enterprise. Il fournit tous les outils nécessaires pour l'analyse par éléments finis des structures composites stratifiées.

III.6.2- Ansys 2020 R1

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

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

➤ **Problème taille limites**

La version étudiant est la version gratuit de ansys c'est pour ça elle est limité comme suit :

- ❖ Physique structurale: 32K nœuds / éléments
- ❖ Physique des fluides: 512 000 cellules / nœuds ❖
- Électromagnétisme: N / A

Conclusion

Notre objectif, est de modéliser un élément structural et nous avons choisi la méthode des éléments finis MEF qui est un outil de résolution numérique approchée des problèmes de structures, des problèmes physiques et mécanique régis par des équations différentielles. En général, un logiciel d'analyse se compose de trois modules fondamentaux : préprocesseur, calcul et post-processeur ; qui se résume à l'ANSYS 2020 R1, version Académique pris en considération lors de notre étude.

Chapitre IV

Cas d'étude et Analyse modale

Cas d'étude et Analyse modale

IV.1 - Introduction

Nous proposons dans cette étude trois différents modèles de calcul, dans le but est d'étudier le comportement de la structure en béton armé, dont les poutres ont été renforcés par composites collés. Il s'agit :

- Modélisation du pont sans renforcement ;
- Modélisation du pont avec renforcement en flexion par SikaCarbodur
- Modélisation par composites en flexion et au cisaillement (Sika Carbodure et Sika Wrap).

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

IV.2 Description du cas d'étude

Le pont en question est un passage supérieur sur route nationale, se trouvant à Mesaad dans la Wilaya de Djelfa, distante de 293 Km au sud d'Alger, se localisant dans la zone I caractérisée par des faibles activités sismiques. L'ouvrage est un pont à une travée, dont le tablier est constitué de quatre poutres maîtresses en béton armé, à inertie constante, surmontées d'une dalle en béton armé, tandis que l'infrastructure est composée de deux culées (Figure IV.1)

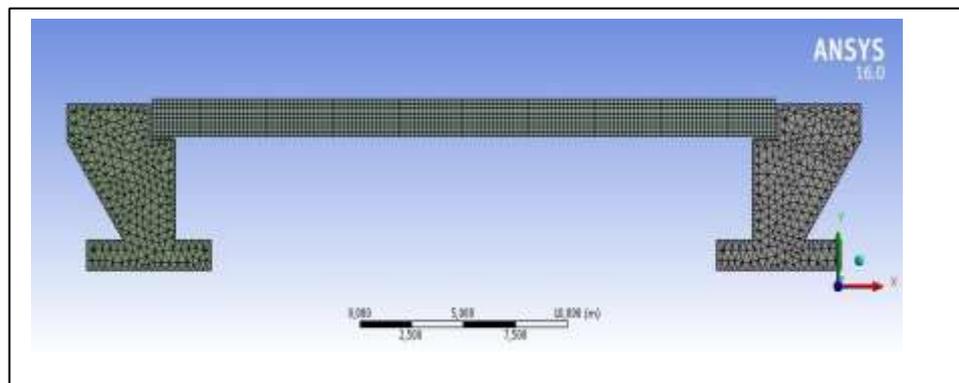


Figure IV.1 Vue du pont étudié

Dans le sens transversal, le pont est composé de quatre poutres en béton armé, d'inertie constante et rectangulaire, surmontées d'une dalle en béton armé (Figure IV.2 et Figure IV.3).

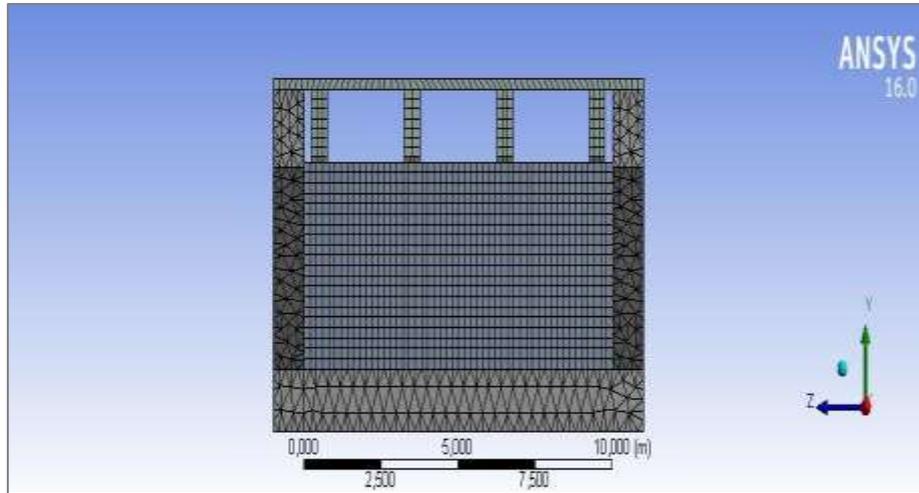


Figure IV.2 Vue de coupe transversale du pont

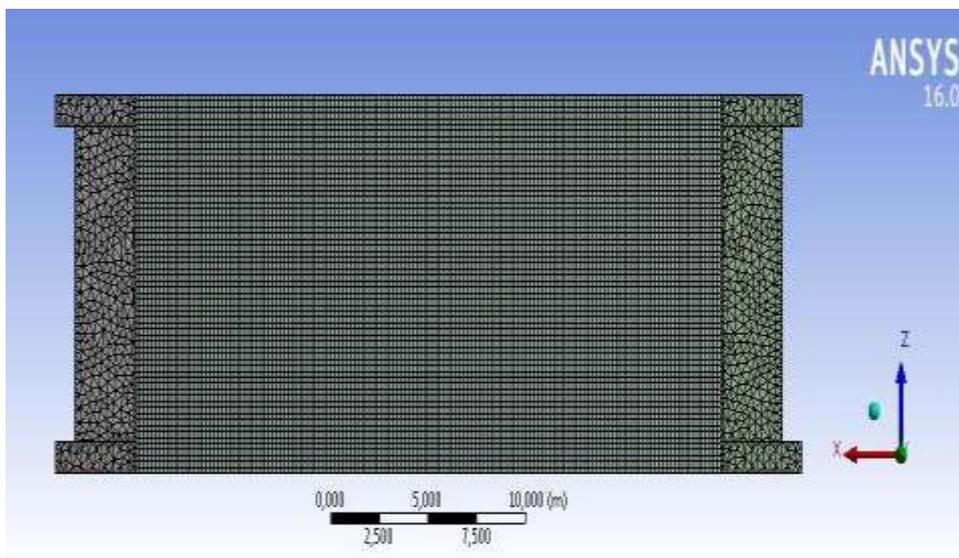


Figure IV.3 Vue en plan de l'ouvrage

IV.3 Cas des renforcements appliqués

IV.3.1 Identification des renforcements

Afin de prendre en charge le besoin de la portance pour les poutres, nous avons proposé des renforcements des éléments porteurs (poutres). Pour cela, on opte pour deux types de renforcement (Figures IV.4 et IV.5).

Les figures suivantes montrent les deux types de renforcement proposés dans les faces inférieures des poutres maitraisses.

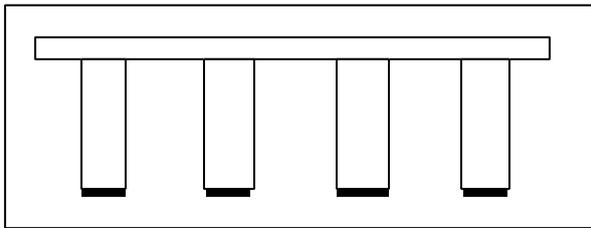


Figure IV.4 Renforcement en flexion des poutres

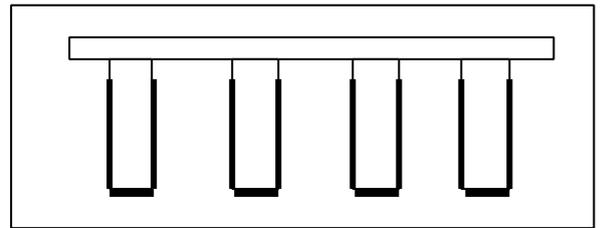


Figure IV.5 Double renforcement en U

Le renforcement en flexion, consiste à placer les lamelles SikaCarbodur sur la totalité de la face inférieure de chaque poutre du pont en béton armé et ce, vu que le moment fléchissant agissant par descente de charge est prépondérant surtout à mi-travée.

Pour le renforcement en "U", appelé aussi "double renforcement", on a placé des lamelles "Sika Carbodur" à la partie inférieure (comme pour le 1^{er} cas) et des tissus "Sika Wrap4" sur les faces latérales de chaque poutre, qui travaillent en cisaillement et, pour reprendre l'effet de l'effort tranchant.

IV.3.2 Mode d'analyse

Dans le but de suivre le comportement de la structure du pont en question, notre travail est portée sur une analyse modale, ce qui nous permettra de déterminer les fréquences (ou les périodes), ainsi que les modes propres de vibration et par conséquent savoir l'effet des composites collés sur le comportement dynamique de la structure. Cette analyse modale

porte sur le pont avant renforcement, le pont renforcé en flexion et le pont renforcé en double application des composites.

IV.3.3- Propriétés des matériaux

Pour le logiciel "Ansys", le choix des éléments est porté sur la base du comportement de l'élément structural à renforcement et son emplacement au niveau de la structure du pont.

IV.3.2.1- 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. L'élément est capable de subir une déformation plastique et de se fissurer dans les trois directions.

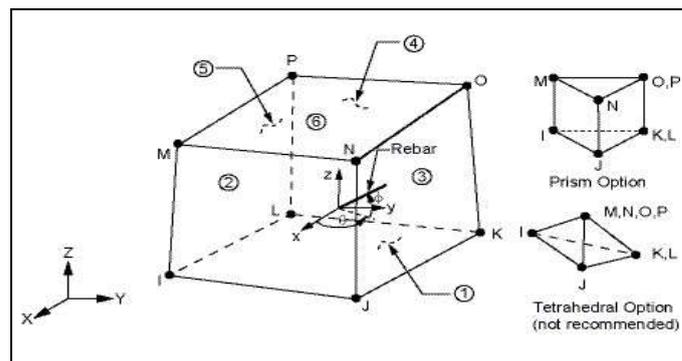


Figure IV.6 : Elément Solid 65 à 3D pour béton

Les analyses modales sous ANSYS demandent la connaissance des propriétés thermomécaniques suivantes des matériaux: Module d'élasticité (E_C), Coefficient de poisson(ν) et densité (ρ)

Pour les trois modèles (modélisation de pont sans renforcement, modélisation de pont par 1^{er} renforcement et modélisation de pont par double renforcement), les propriétés du béton sont identiques et sont les suivantes :

Tableau IV.1: Propriétés de Béton armé

Module d'élasticité (E_c)	25000Mpa
Coefficient de poisson (ν)	0.2
Densité (ρ)	2500 Kg/m ³

IV.3.2. 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.

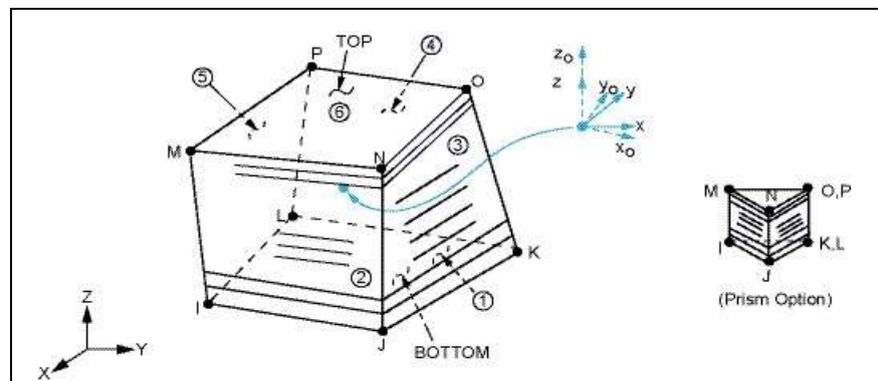


Figure IV.7: Solid 185 à 3D pour composites

Pour les deux modèles de modélisation de pont par matériaux composites, les propriétés des renforts sont identiques mais la différence est dans le résine époxydique comme suite :

IV.3.2.1 Renforcement par lamelles

Le renforcement en flexion d'éléments d'ouvrages par composites est réalisé en collant des lamelles Sika CarboDur en surface des zones tendues du béton armé, c'est pour ça dans notre cas nous utilisant lamelle Sika CarboDur aux dessous du les quatre poutres de pont.

a) Lamelles Sika CarboDur S1512

Les lamelles Sika CarboDur sont des PRFC (Polymères Renforcés de Fibres de Carbone) fabriqués selon le procédé de pultrusion en usine. 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 IV.2: Propriétés de CarboDur S1512

Module d'élasticité (E_c)	170000Mpa
Coefficient de poisson (ν)	0.3
Densité (ρ)	1600 Kg/m ³

b) Colle époxydique Sikadur 30

Le Sikadur-30 est une colle époxydique à deux composants A et B sans solvant, thixotrope, de couleur gris clair, utilisée pour le collage des lamelles Sika CarboDur. Les propriétés du colle époxydique Sikadur-30 pour le cas de la modélisation de pont par matériaux composites traditionnels sont les suivantes :

Tableau IV.3: Propriétés de la résine Sikadur-30.

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

IV.3.2.2 Renforcement par tissus

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), c'est pour ça dans notre cas nous utilisant les tissus SikaWrap aux cotés du les quatre poutres de pont.

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 préalable du support et du tissu-application dite « par voie humide».

Tableau IV.4: Propriétés de SikaWrap -600 C

Module d'élasticité (E_c)	235000Mpa
Coefficient de poisson (ν)	0.3
Densité (ρ)	1800 Kg/m ³

b) Colle époxydique Sikadur-300

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

Tableau IV.6: Propriétés de la résine Sikadur-300

Module d'élasticité (E_c)	2800Mpa
Coefficient de poisson (ν)	0.4
Densité (ρ)	1160 Kg/m ³

IV.4 Analyse numérique du cas d'étude

IV.4.1 Modèle de calcul

Le pont en question testé est composé d'une travée et de deux cules (appuis de rive). Le tout (éléments) en béton armé. Puisqu'il s'agit d'un pont qui date des années 70 ; plusieurs anomalies furent observées ; comme des fissurations aux niveaux des faces inférieures des poutres et des âmes (faces latérales). Le logiciel "Ansys" exige pour le choix des caractéristiques géométriques, un modèle capables de répondre aux exigences des critères de convergence de la méthode des éléments finis. Le modèle adopté est illustré dans la figure IV.5 comme suit :

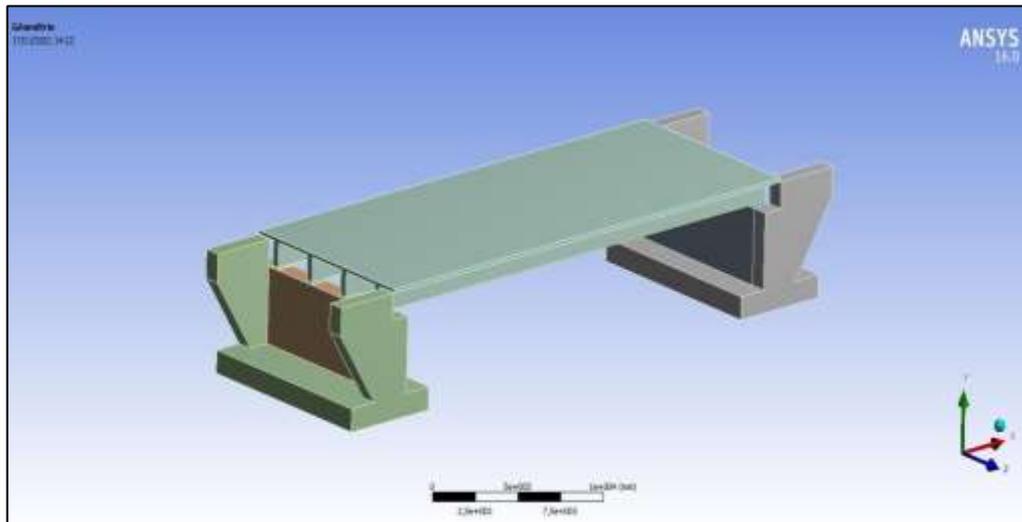


Figure IV.8 Modèle d'analyse du pont en béton armé

Après avoir fait entrer les caractéristiques physiques et mécaniques de tous les matériaux constituant l'ouvrage en question, les étapes de modélisation sont indiquées dans le paragraphe suivant.

IV.4.2 Etapes de la modélisation

Comme ce fut de l'explication donnée dans le chapitre précédent, la modélisation passe par plusieurs étapes et ce, dans le but d'avoir une convergence de la solution (modèle) adoptée et ainsi pour pouvoir obtenir les résultats de l'analyse demandée.

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

IV.4.2.1 Introduction des données et modèle

-File

-Change jobname: enter new jobname → Essai 01 → Validé

-Change title: enter new title → Poutre BA → validé

1. Preference: → structural → validé

2. Preprocessor:

A. Element type:

Dans Add/edit/delete

On choisit:

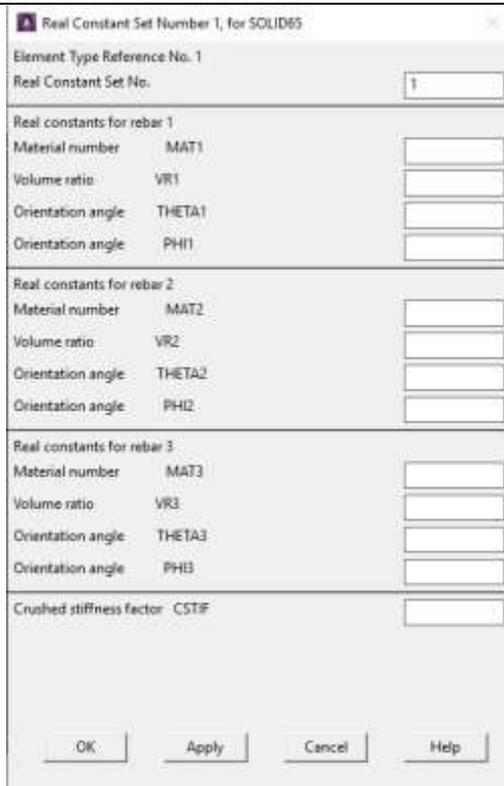
Solid65 pour le béton

LINK180 pour l'acier Shell181

pour le composite

3. Real constants: Dans Add/edit/delete

Pour le béton:

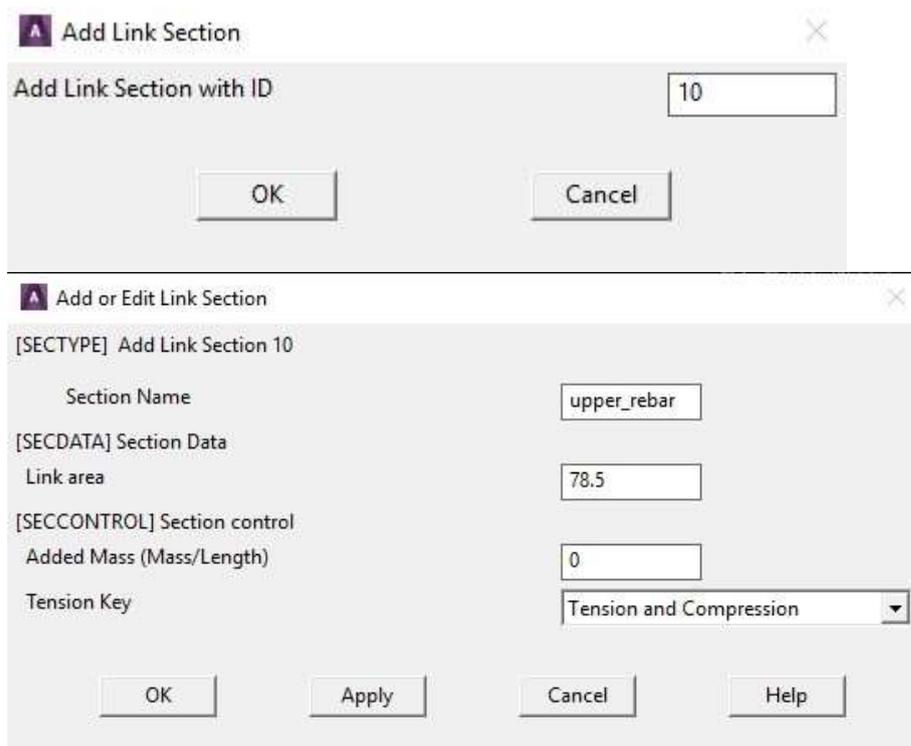


Pour l'acier:

4. Sections:

Link → Add

Pour les aciers HA:

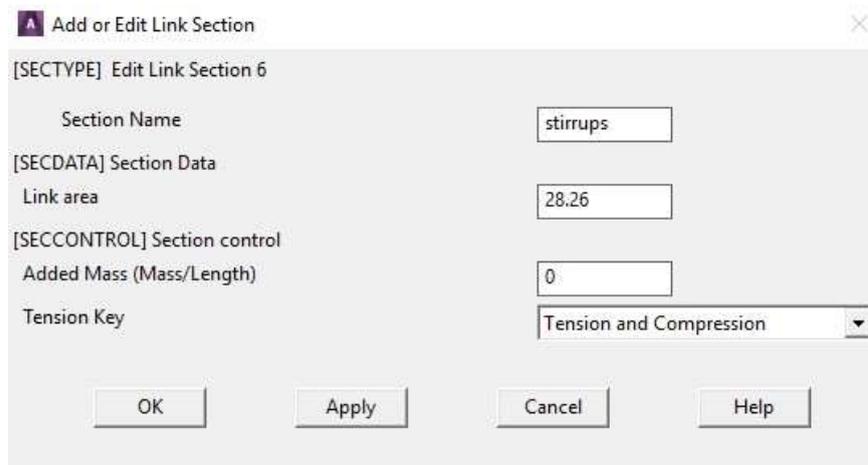


Pour les aciers (inferieurs) :



Name it lower_rebar → area of 113.04 Pour

les cadres de diamètre 6:



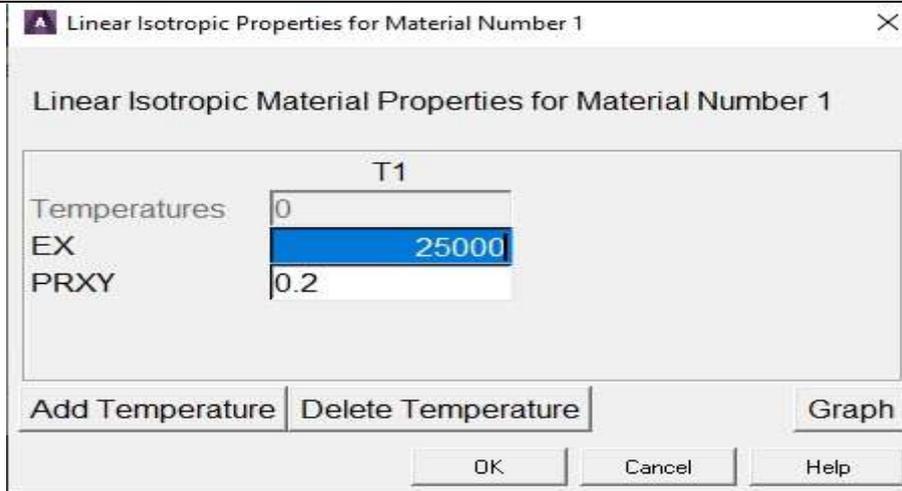
Nothing for the composites.

IV.4.2.2 Choix des propriétés mécaniques des matériaux

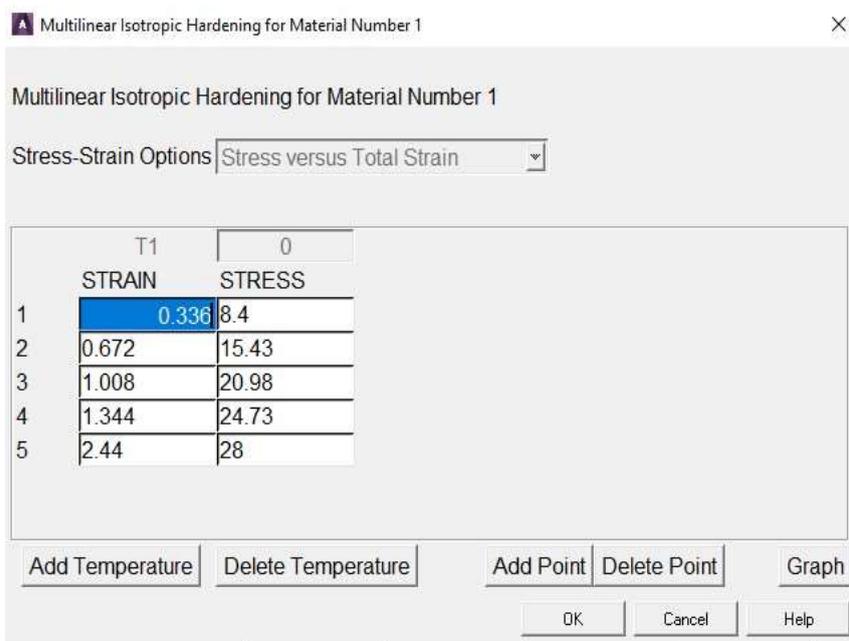
4. Material props:

→ Materialmodels:

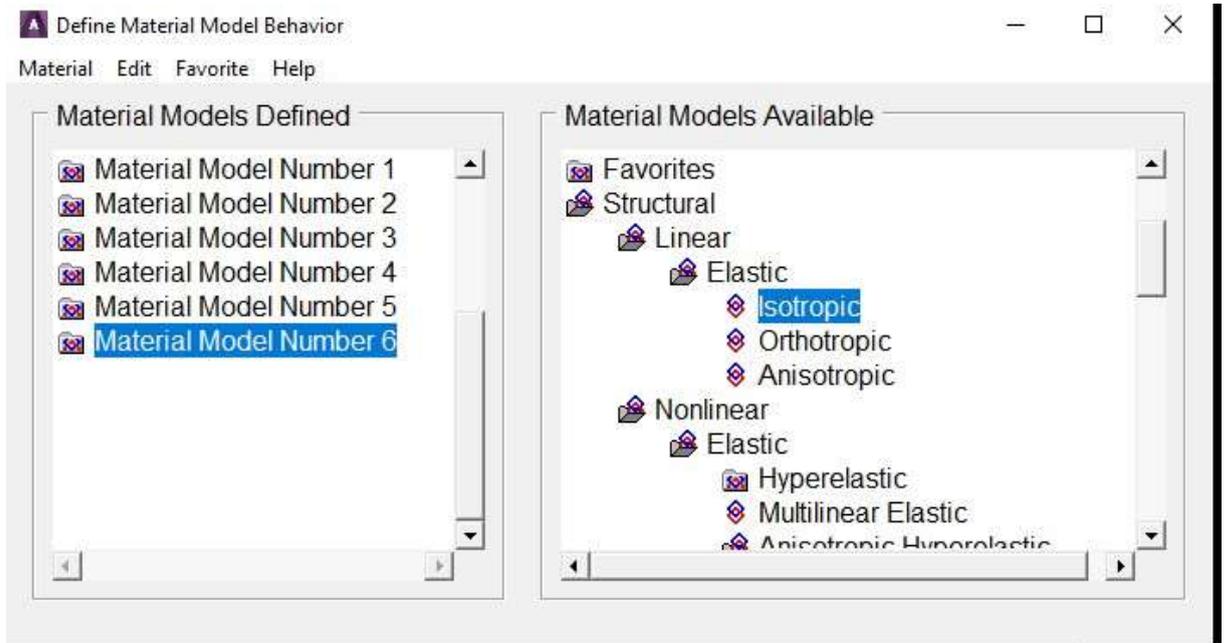
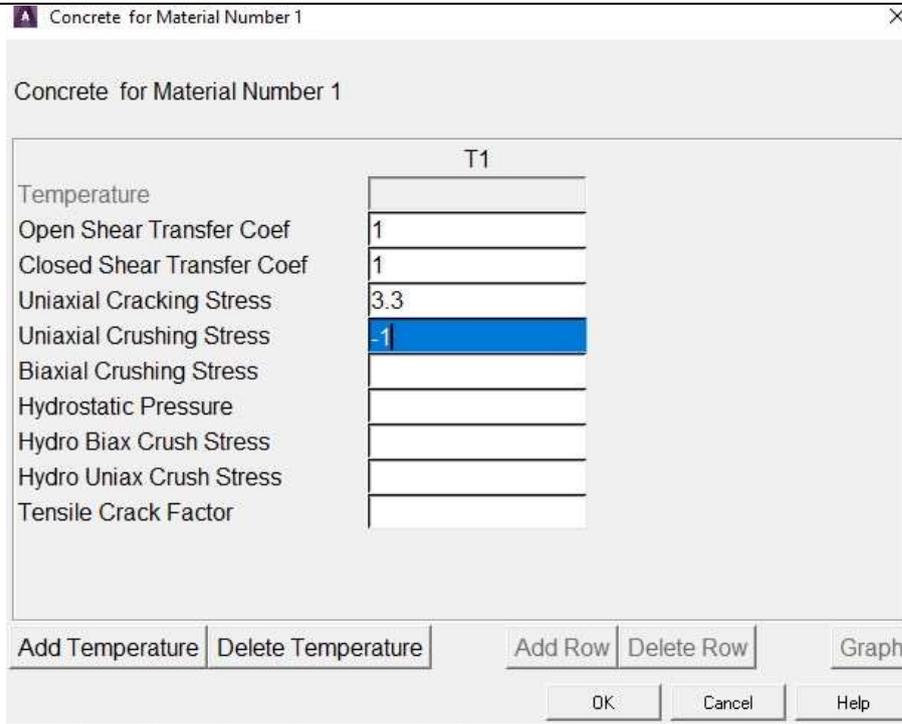
N01: pour le beton →structural→ linear→ elastic→ isotropic



Structural → Nonlinear → inelastic → Rate independent → Isotropic Hardening Plastic → Mises Plas... → Multilinear

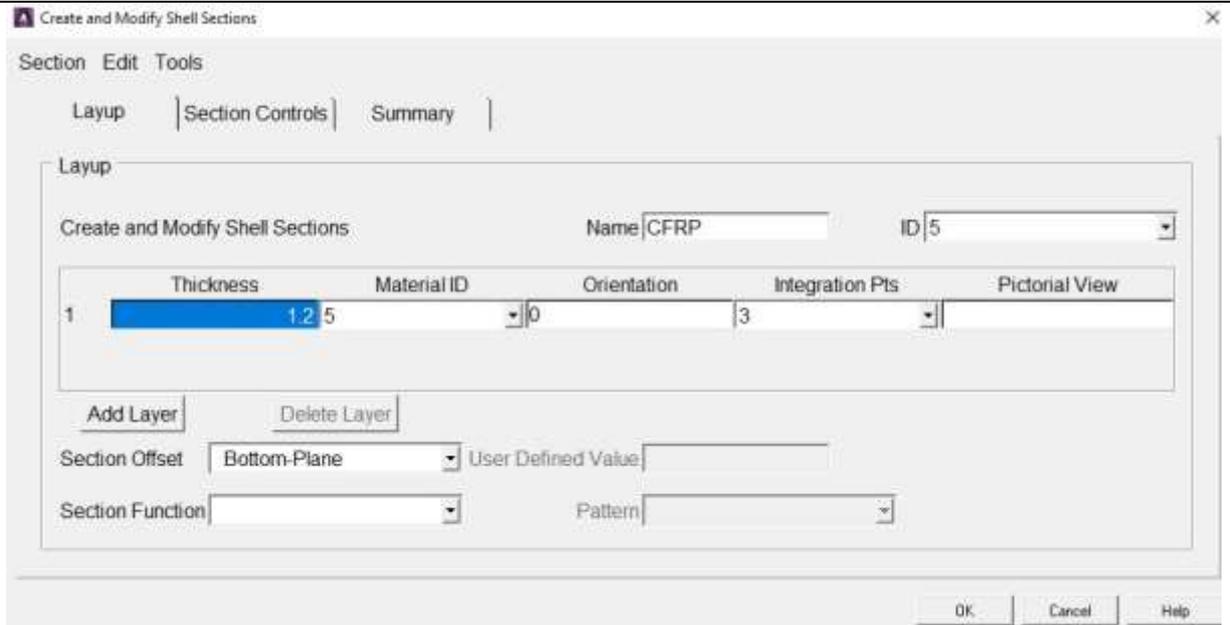


Nonlinear → Inelastic → Rate dependent → Non metalplas... → Concret



5. Sections:

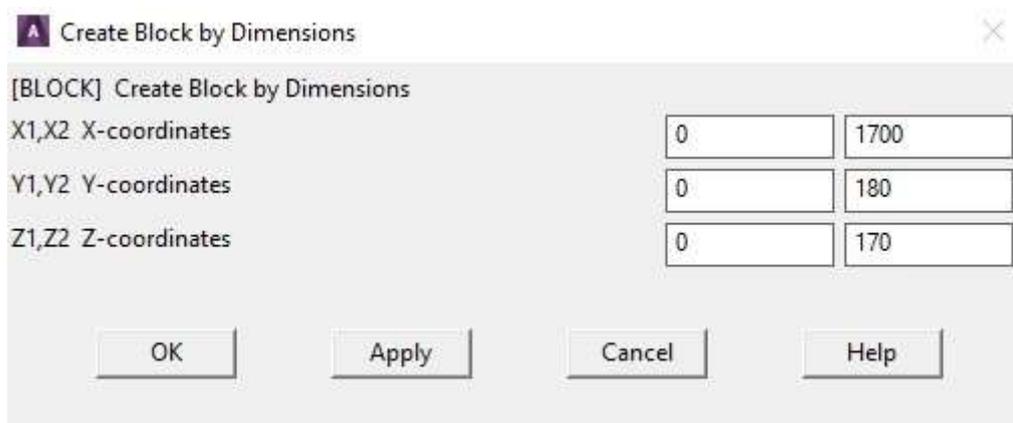
Shell → lay up → Add/edit



IV.4.2.3 Discrétisation et lancement du calcul

6. Modeling:

Create → Volumes → Block → By dimensions



7. Meshing:

Mesh Tool



8. Modeling:

Create → Elements → Element attributes

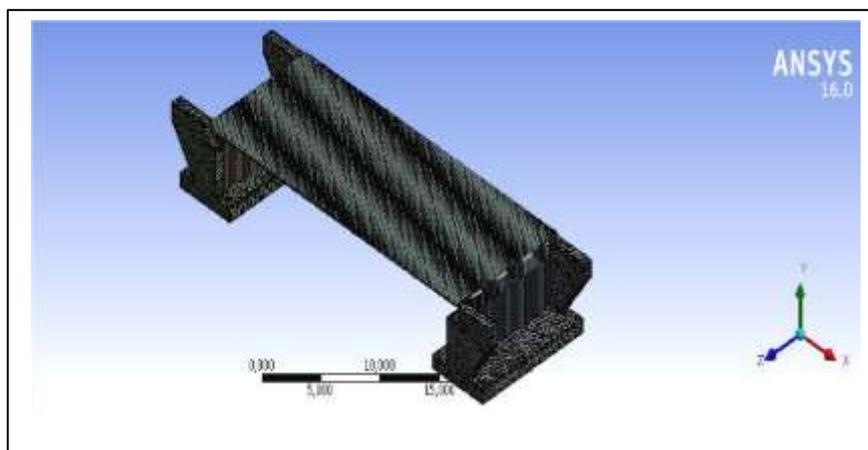
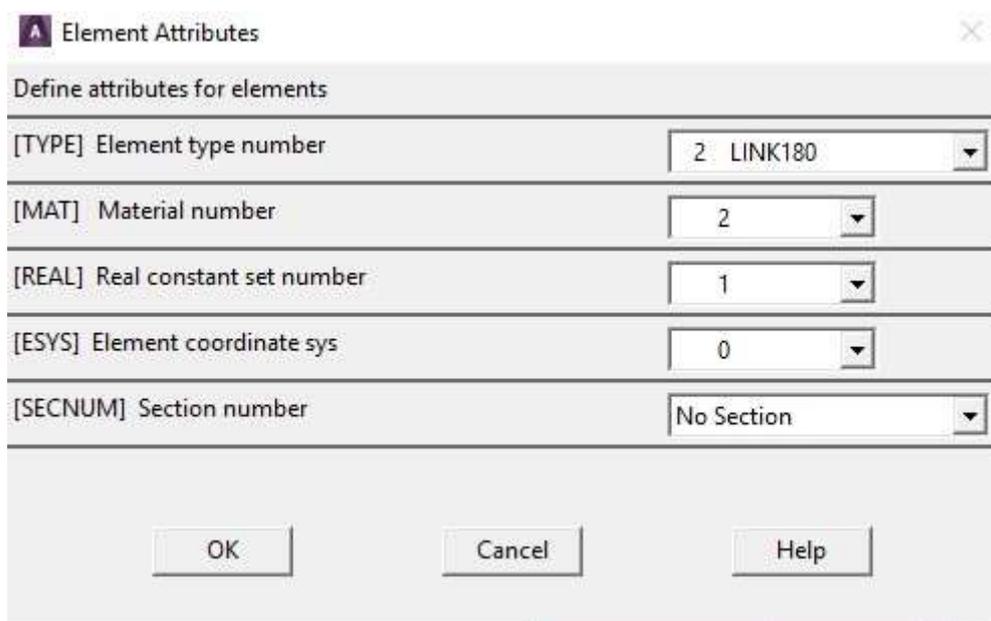


Figure V.9. Maillage de l'ouvrage avec ANSYS

Chapitre V

Résultats et Discussions

Résultats et Discussions

V.1 Introduction

Sur la base de l'étude et l'analyse modale du pont renforcé par composite, le modèle choisi 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 global de la structure. Dans ce chapitre, on présentera les principales valeurs trouvées, avec commentaires et discussions

V.2 Modélisation de pont sans renforcement

V.2.1 Modèle de calcul

Le modèle choisi introduit dans le logiciel "Ansys" est donné par le schéma suivant (Figure V.1). On a pris la structure du pont en question, avec renforcement des poutres du tablier, vu qu'il est l'élément le plus important et peut être touché par les dégradations.

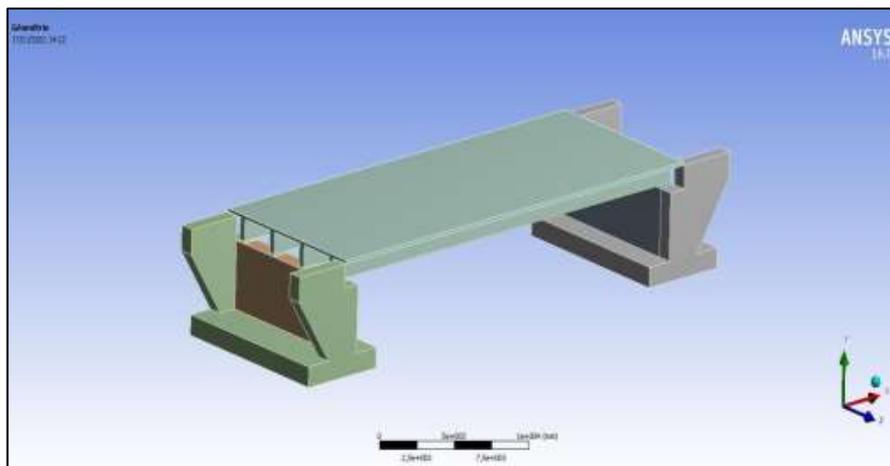


Figure V.1 Modèle du pont analysé par "Ansys"

V.2.1 Résultats trouvés

Les résultats trouvés de l'analyse modale du tablier du pont en béton armé, sans renforcement ont données des fréquences variant entre 5.317Hz (1^{er} mode) et 13.88 Hz (6^{ème} 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.2 à V.7).

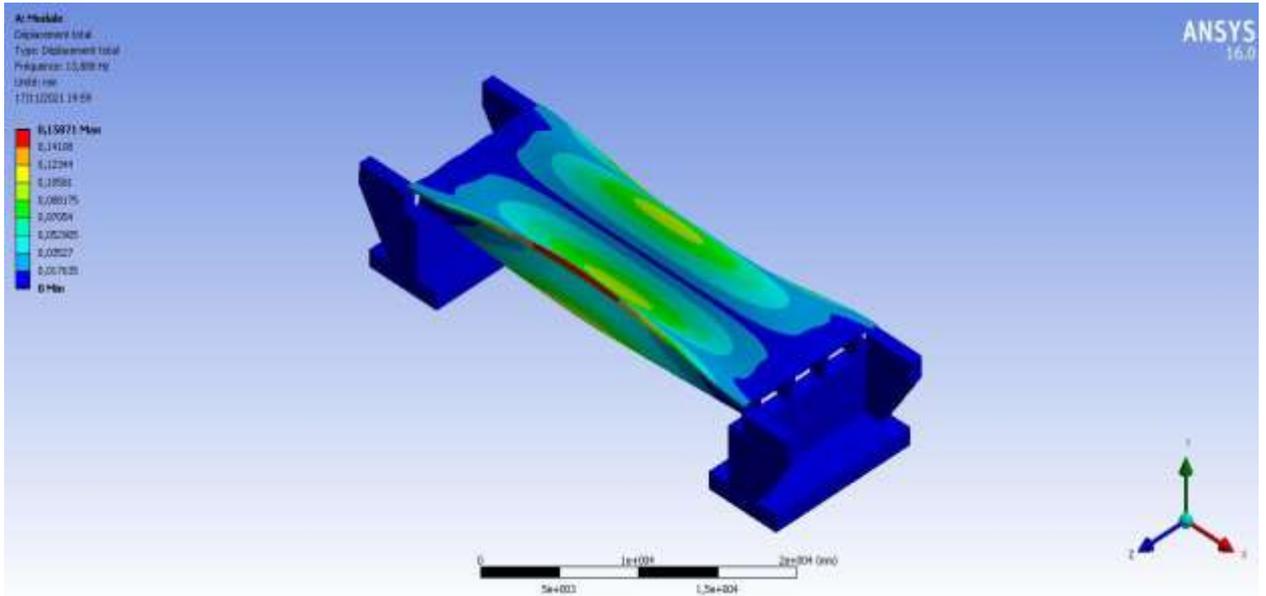


Figure V.2 Mode1 de Vibration sans renforcement

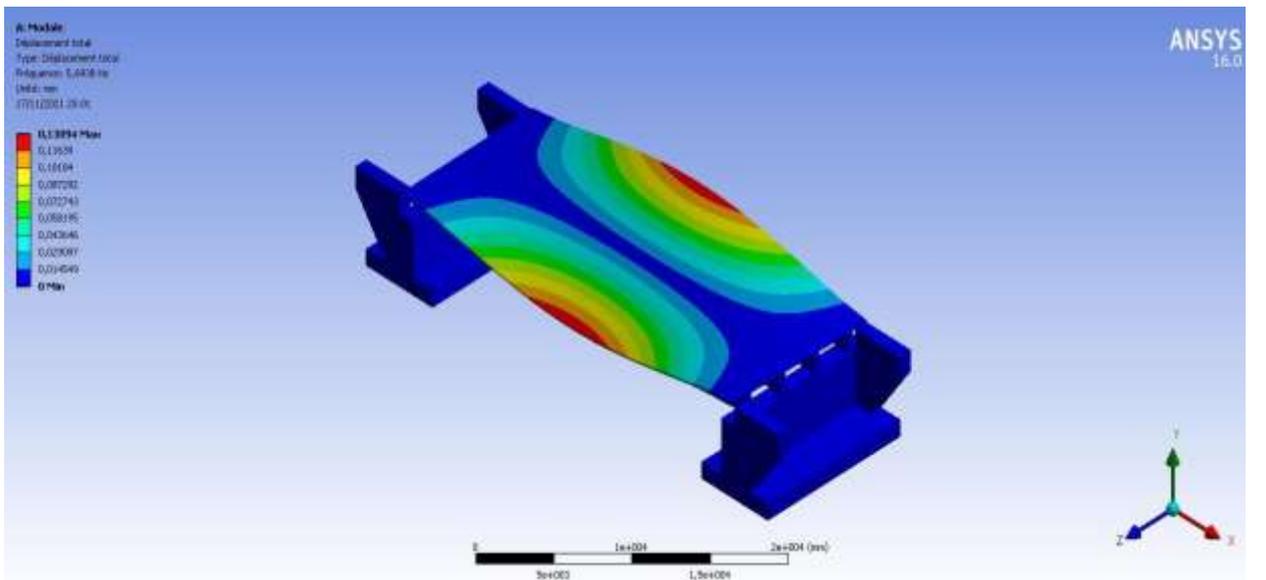


Figure V.3 Mode2 de Vibration sans renforcement

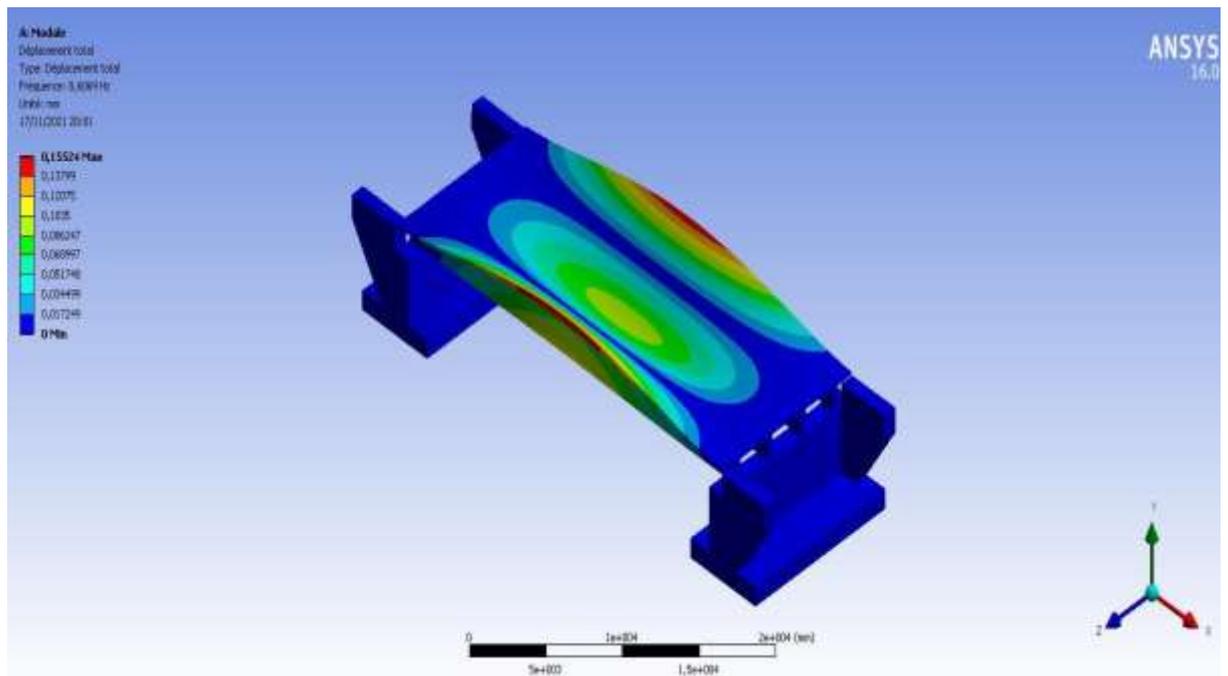


Figure V.4 Mode3 de Vibration sans renforcement

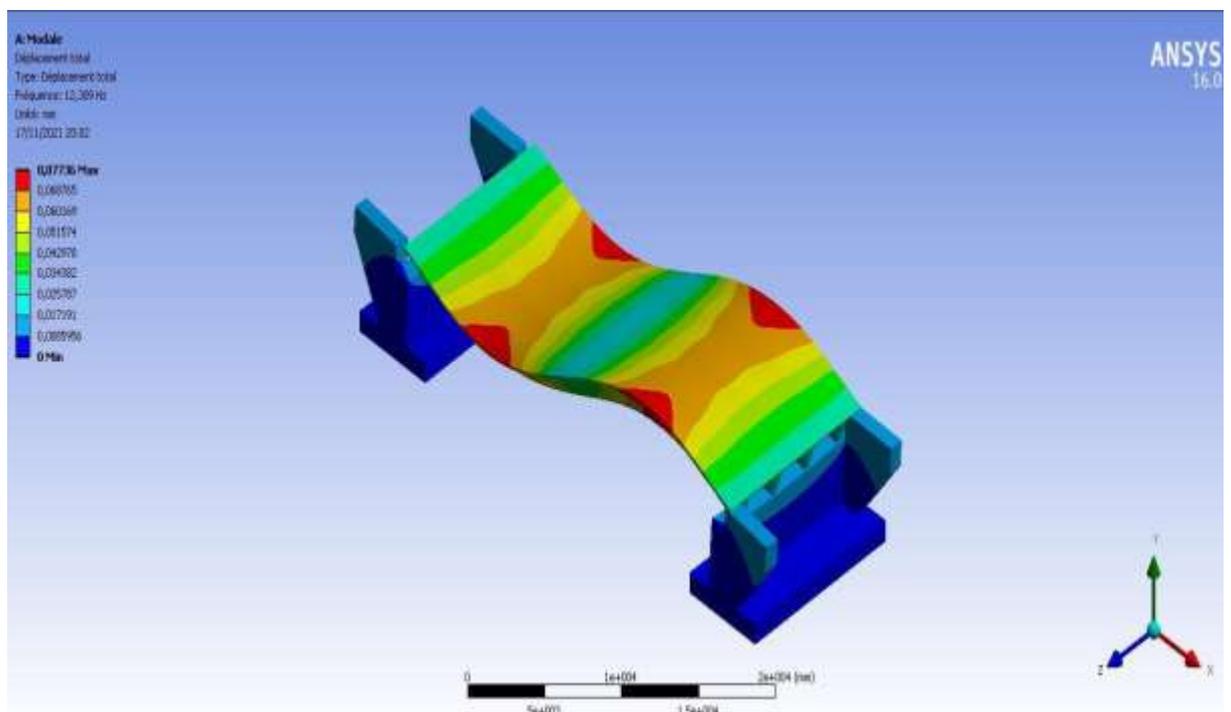


Figure V.5 Mode 4 de Vibration sans renforcement

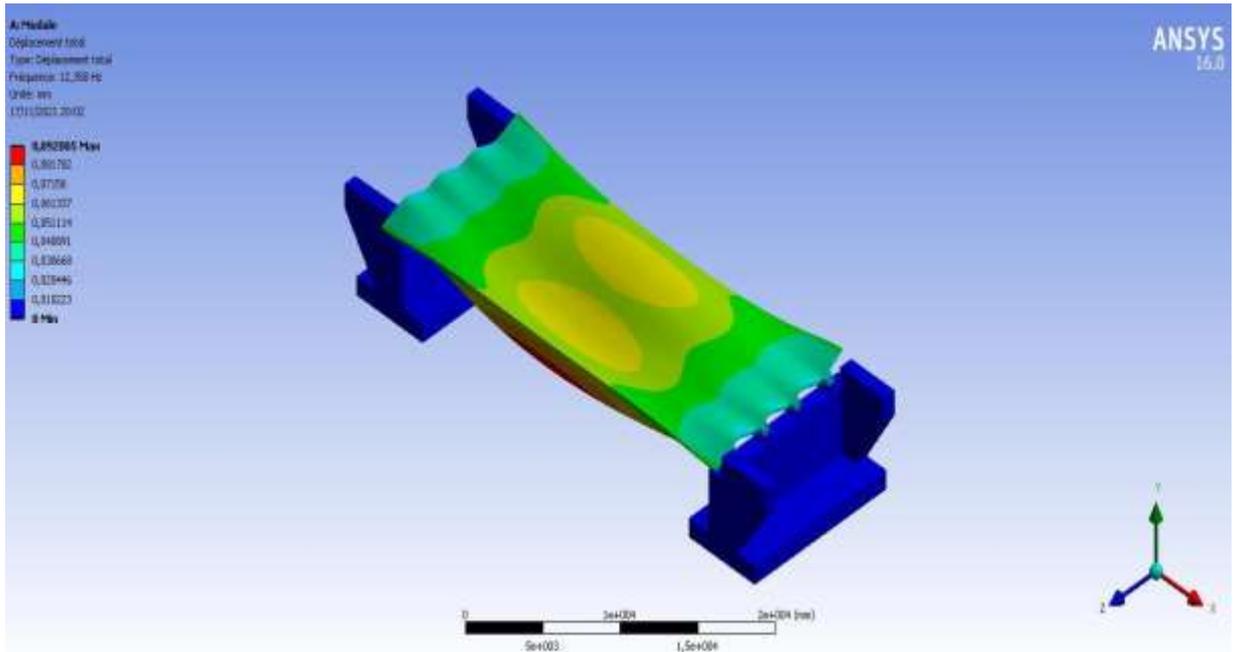


Figure V.6 Mode5 de Vibration sans renforcement

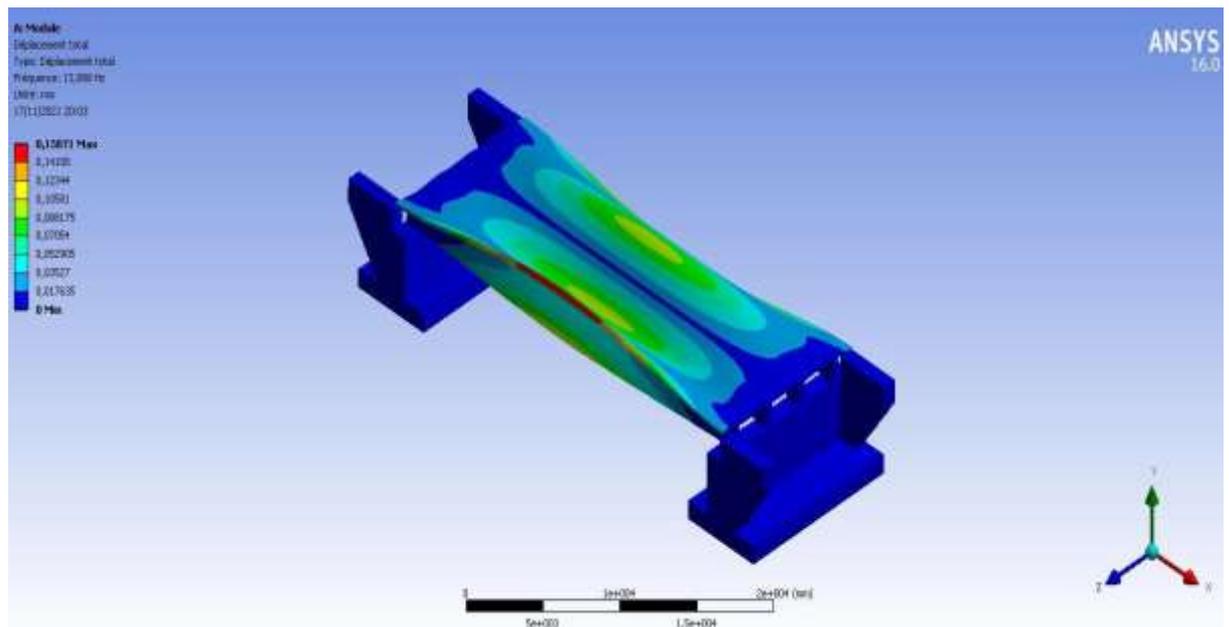


Figure V.7 Mode6 de Vibration sans renforcement

V.2.2 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	5.317	Flexion simple
02	5.694	Déplacement latéral
03	8.607	Déplacement latéral
04	12.309	Torsion
05	12.358	Déplacement longitudinal
06	13.888	Double torsion

V.3 Modélisation de pont avec renforcement

V.3.1 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 Sika Carbodur. Les résultats ont données des fréquences variant entre 5.437Hz (1^{er} mode) et 15.97 Hz (6^{ème} 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.8 à V.13).

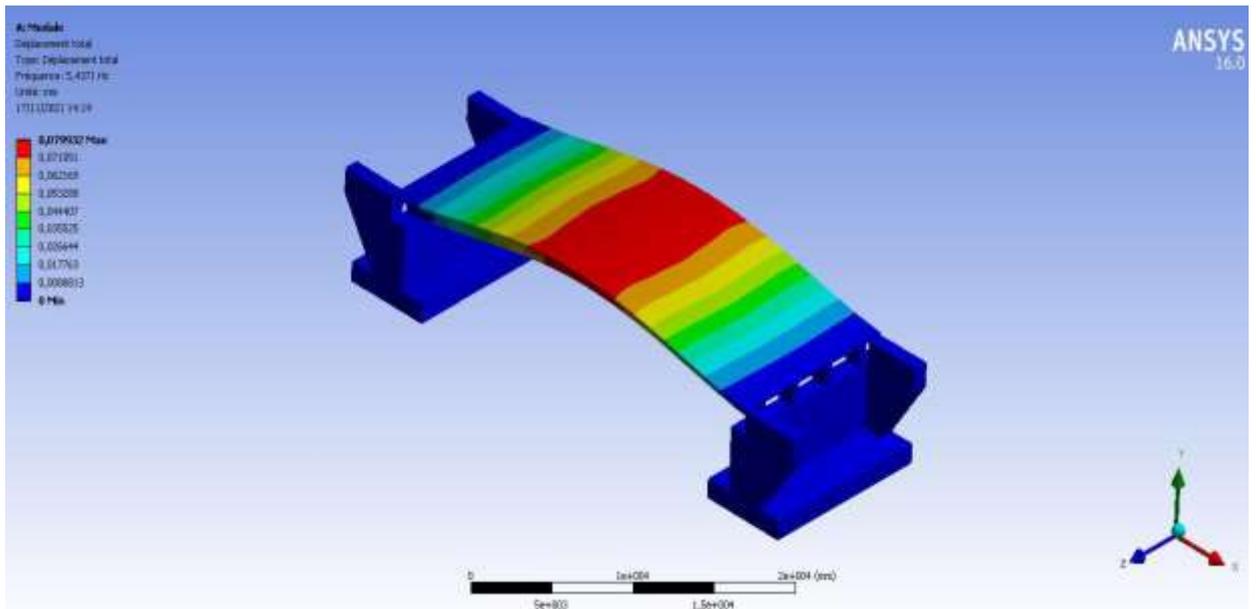


Figure V.8 Mode1 de Vibration avec 1^{er} renforcement

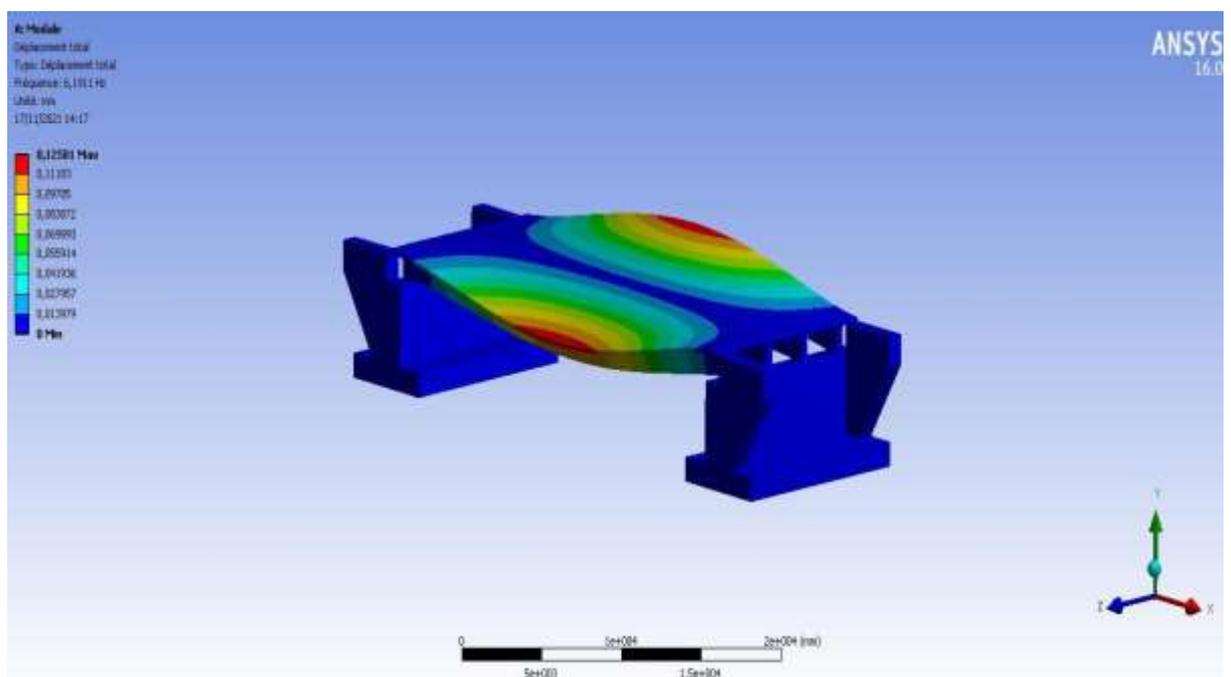


Figure V.9 Mode2 de Vibration avec 1^{er} renforcement

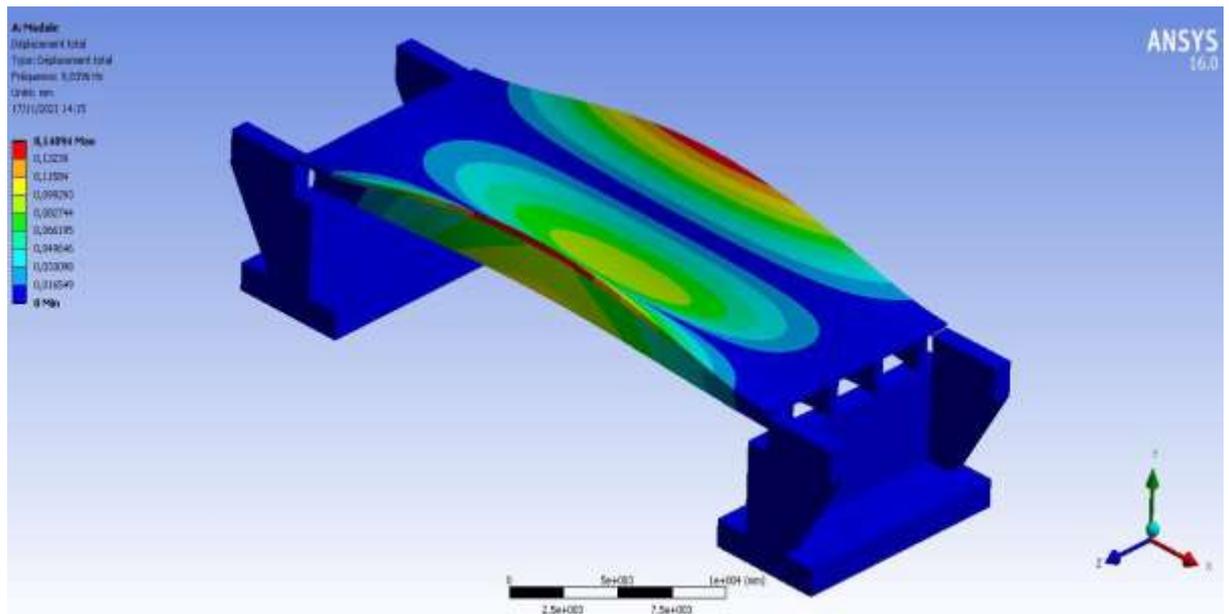


Figure V.10 Mode3 de Vibration avec 1^{er} renforcement

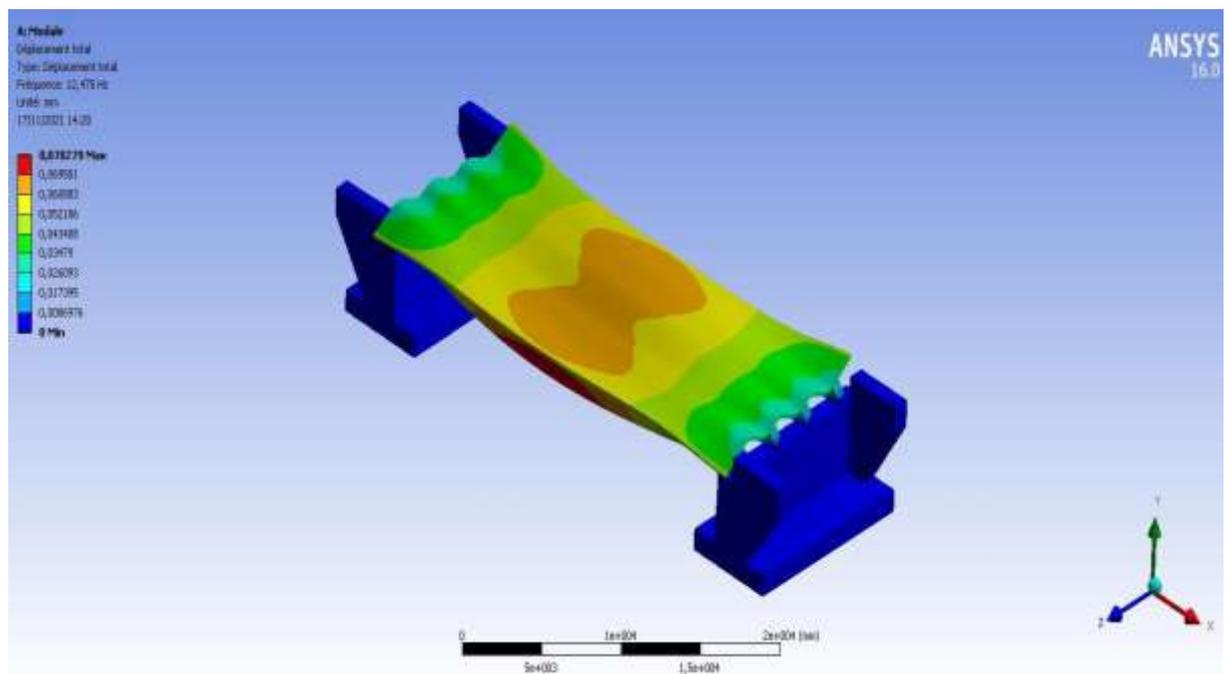


Figure V.11 Mode4 de Vibration avec 1^{er} renforcemen

t

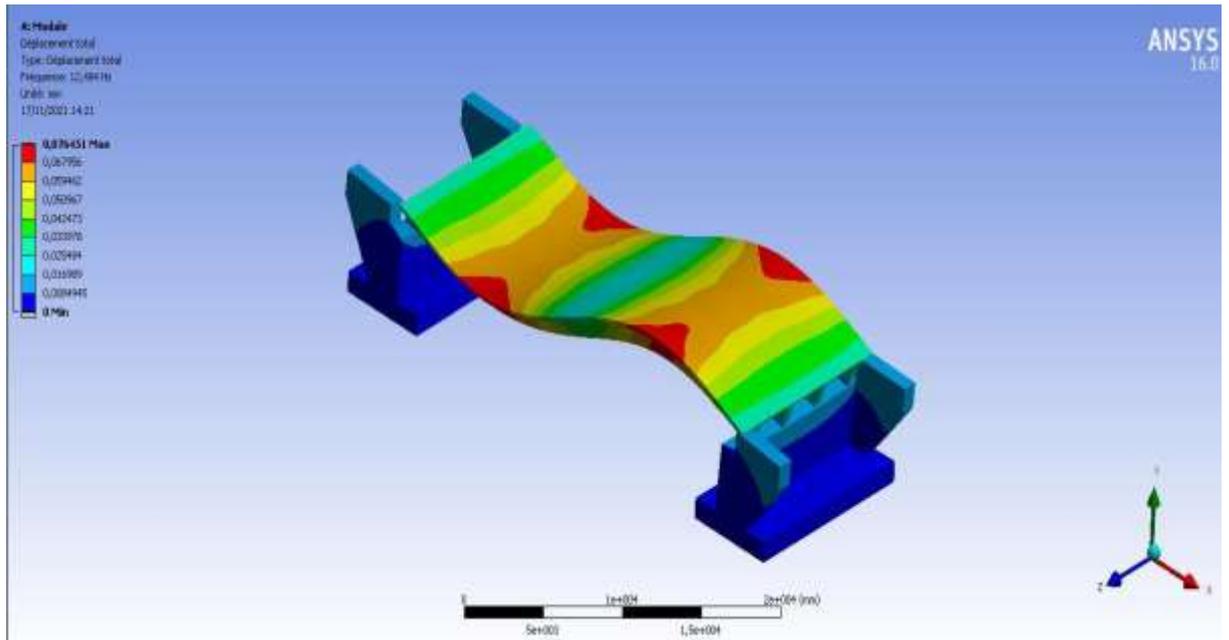


Figure V.12 Mode5 de Vibration avec 1^{er} renforcement

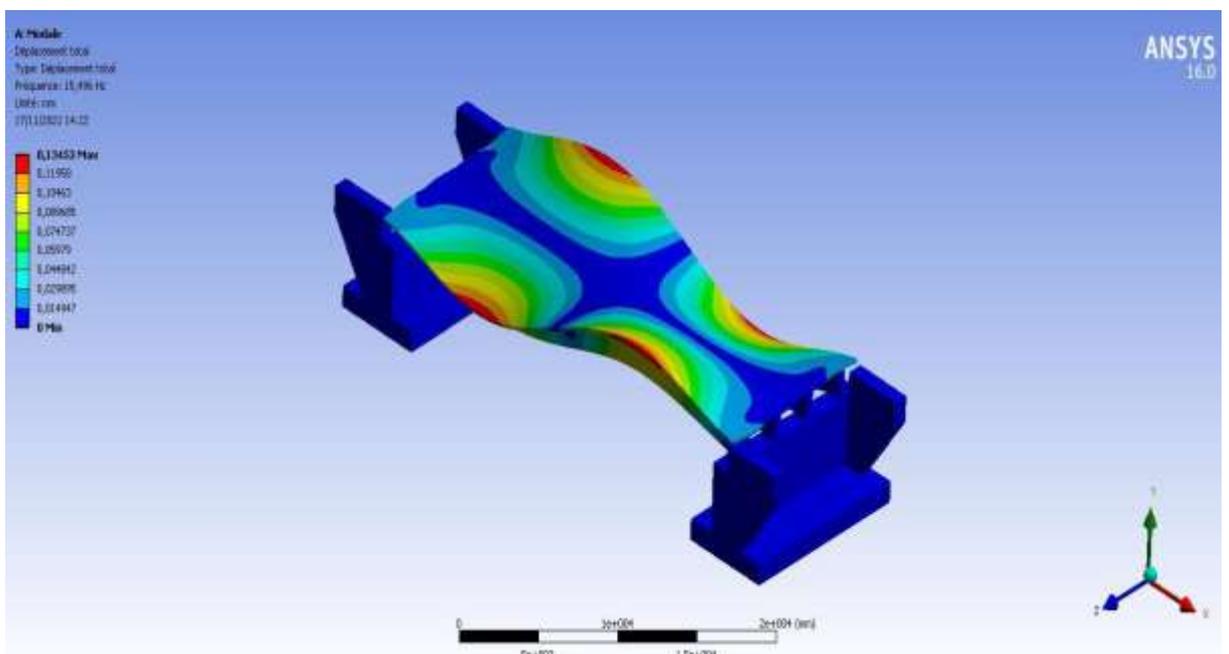


Figure V.13 Mode6 de Vibration avec 1^{er} renforcement

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 ^{er} renforcement	Mode de vibration
01	5.437	Flexion simple
02	6.191	Déplacement latéral
03	9.839	Déplacement latéral
04	12.475	Double fléchissement
05	12.484	Torsion
06	15.496	Déplacement longitudinal

V.3 Modélisation de pont avec double renforcement

V.3.1 Double renforcement

Pour le double renforcement en flexion et au cisaillement, 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 différentes (Figure V1).

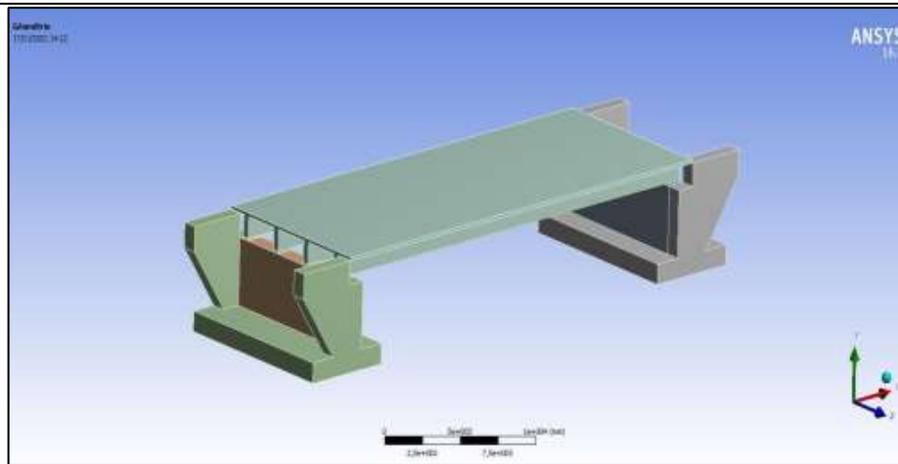


Figure V.15 Renforcement en U des poutres du pont

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 5.52 Hz (1^{er} mode) et 15.96 Hz (6^{ème} mode).

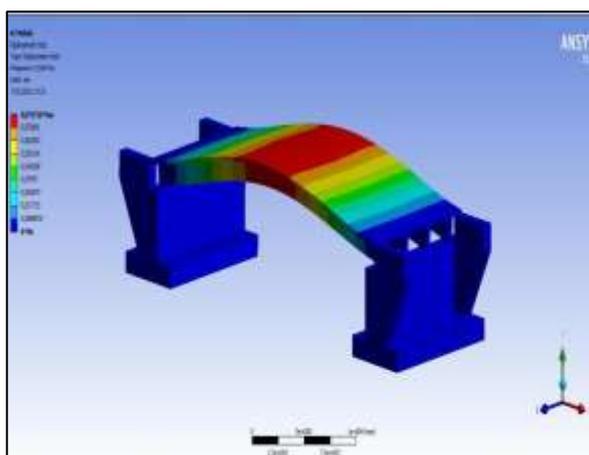


Figure V.16 Mode 1 de vibration (renforcement en U)

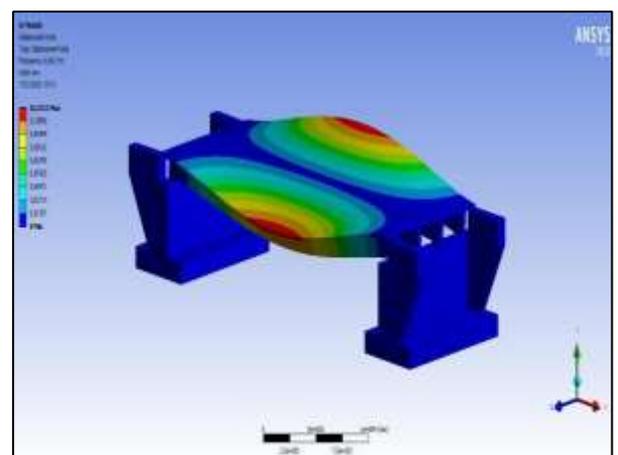


Figure V.17 Mode 2 de vibration (renforcement en U)

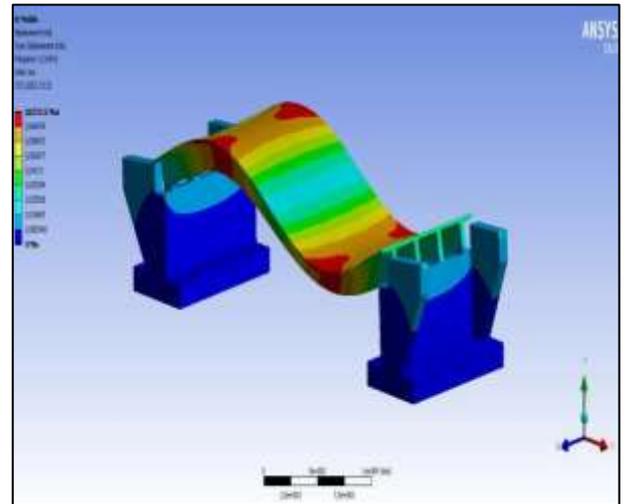
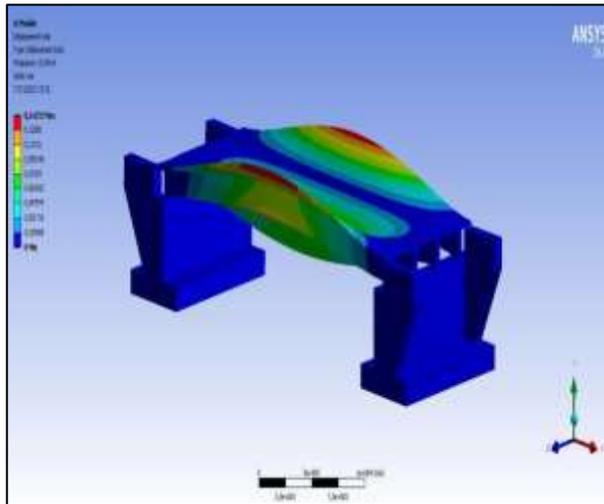


Figure V.18 Mode 3 de vibration (renforcement en U) Figure V.19 Mode 4 de vibration (renforcement en U)

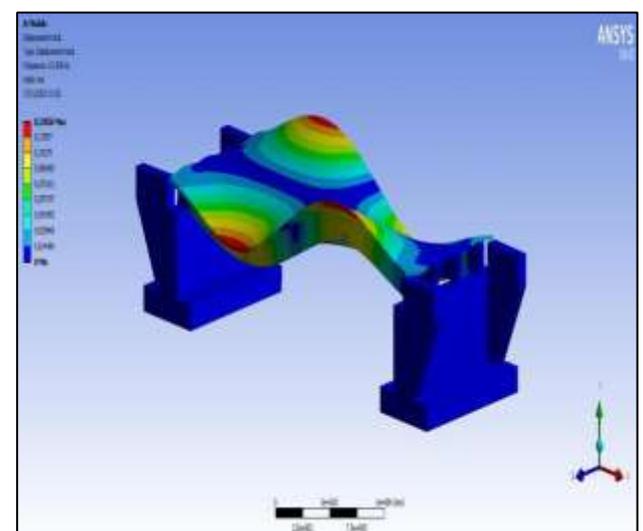
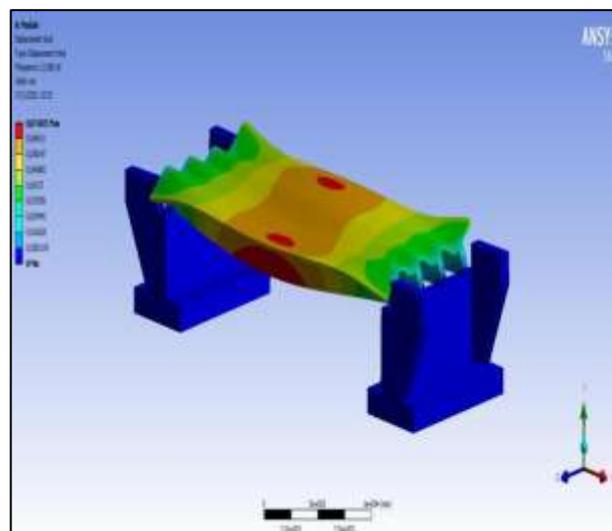


Figure V.20 Mode 5 de vibration (renforcement en U) Figure V.21 Mode 6 de vibration (renforcement en U)

Le tableau V.3, ci après donne les valeurs des fréquences trouvés avec les modes observés pour ce type de renforcement.

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

N°	Fréquence double renforcement	Mode de vibration
01	5.52	Flexion simple
02	6.64	Déplacement latéral
03	10.94	Torsion
04	12.69	Double fléchissement
05	12.856	Déplacement longitudinal
06	15.958	Double torsion

V.4 Comparaison et interprétation

Sur la base du travail de modélisation effectué, concernant l'analyse modale, il s'est avéré que le type le plus performant de renforcement est le 2^{ème} mode (renforcement par "Carbodur et Wrap", avec des gain variant de 3.82% pour le 1^{er} mode et 30.09 % pour le dernier 4^{ème} mode. Le tableau ci après illustre la comparaison déterminée et les écarts trouvés (Tableau V.4).

Tableau V.4. Tableau comparatif des fréquences et modes de vibration des cas étudiés

N°	Fréquence avant renforcement	Fréquence 1 ^{er} renforcement	Fréquence double renforcement	Ecart plus défavorable
01	5.317	5.437	5.52	3.82 %
02	5.694	6.191	6.64	16.62 %
03	8.607	9.839	10.94	27.08 %
04	12.309	12.475	12.69	30.09 %
05	12.358	12.484	12.856	4.03 %
06	13.89	15.496	15.958	14.89 %

Conclusion Générale et Recommandations

Conclusion Générale et Recommandations

Le renforcement par composites de fibres de carbone (CFRP) sont de plus en plus répandus dans les applications pour la réhabilitation des structures élevées (bâtiments, ponts, tunnels, ect...). Depuis plus de trente ans d'utilisation de ces produits, très efficaces, ont montré des performances très élevées.

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

- Il est nécessaire de prendre en charge la mise à niveau (réhabilitation) des structures anciennes et endommagées, qui peuvent donner lieu à des conséquences néfastes (dégâts humains et matériels).
- Un patrimoine important, d'ouvrages en béton, nécessite une attention particulière et un choix adéquat de moyens de renforcement de ses éléments porteurs (poutres, entretoises, dalles).
- La modélisation numérique par application d'un logiciel professionnel (Ansys Worbench/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 30 %, 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), avec un comportement non linéaire des ses matériaux constituants (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] **Calgaro J.A. et Lacroix R.** (1999), Pathologie et évaluation des ponts existants, Vol. C4, Techniques de l'Ingénieur, Paris, France.

[2] **Boularouk Ch.** (2015), Analyse numérique du comportement des structures renforcées par matériaux composites, mémoire de fin d'études, Ecole Nationale Polytechniques, El Harrach, Alger.

[3] **Abdessemed M., Kenai S., Attar A. and Kibboua A.** (2008), Maintenance and Rehabilitation Program for Algerian Bridges, 11 DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components "Globality and Locality in Durability", Istanbul, Turkey, May 11-14, 2008.

[4] **Abdessemed M.** (2003), Comportement des poutres isostatiques en béton armé renforcées par tissus de fibres et lamelles de fibres de carbone, Mémoire de Magister, Université de Blida, Algérie.

[5] **Taibi Amel** (2016), Elaboration d'un programme de calcul en C++ pour la conception et l'étude des éléments structuraux renforcés par composites, Département de Génie Civil Université de Blida1, Algérie.

[6] **CSTB (Freyssinet)** (2014), Foreva TFC, Avis technique 314-757, Renforcement des structures par un procédé de collage de fibres de carbone, Groupe Spécialisé N°3, France.

[7] **Blevot J. et Perchat J.** (2000), Comportement expérimental des éléments en béton armé soumis à différents modes de sollicitations, vol. C2, Technique de l'ingénieur.

[8] **Avis Technique CSTB** (2020), N°3.3/20-1021_V1 Sika® CarboDur, Groupe Sika Algérie.

[9] **Tahar Abbes M.** (2013), Méthodes numériques (Livre), Tome1, Office des Publications Universitaires (OPU), Edition 2.05.4775, Alger, Algérie.