

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة البليدة 1

Université de BLIDA 1



قسم الهندسة المدنية

Département de Génie Civil

Mémoire de Master 2

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux de Génie Civil

Sujet

**Modélisation numérique d'application des
composites intelligents pour le renforcement
d'éléments de structures**

Présenté par :

AISSA Abdelmalek

BELLONDJA RIADH

Encadré par :

Dr M.ABDESSEMED

Année Universitaire 2019-2020

DEDICACES

*Je dédie ce modeste travail à : Mes très chère parents
qui mont Toujours soutenus durant toutes les périodes
de vie, que Dieu le tout puissant les protèges et les gardes.*

*A tout la famille **Belloundja et Aissa**
À tous mes amis, surtout mes amis à l'université
Pour toutes la promotion 2020*

ABDELMALEK ET RIADH



Remerciements :

Après avoir rendu grâce à Dieu le Tout Puissant et le miséricordieux je tiens à remercier vivement tous ceux qui de près ou de loin ont participé à la rédaction de ce mémoire. Ce mémoire de master, qui est le résultat d'un travail de plusieurs mois.

Nous remercions tout d'abord, Dr Mouloud ABDESSEMED, Vice Recteur et Enseignant Chercheur à l'Université de Blida1, pour nous avoir proposé ce sujet de mémoire, de l'attention qu'il a portée à notre travail. On le remercie pour ses conseils qui ont contribué à l'élaboration de ce travail.

Nos remerciements s'adressent aussi Administration Département de Génie et l'ensemble des nos enseignants et le personnel de ce département, ainsi que tous les étudiants qui nous ont aidés à réaliser ce travail.

Nos sincères remerciements sont aussi adressés envers nos collègues pour un temps agréable et une ambiance exemplaire passée ensemble.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent, aussi à nos parents qui a beaucoup sacrifiés pour que nous puissions atteindre notre but, celui de réaliser leur rêve.

Résumé :

Malgré que certains ouvrages en béton armé demeurent en bon état sous des conditions climatiques rigoureuses et sévères, les désordres survenus au niveau des structures sont souvent dus aux dégradations des matériaux employés, ou au changement de fonctionnalité du bâti (l'accroissement de surcharges d'exploitation). Après diagnostic et investigations diverses, et afin d'y remédier à cette problématique il est impérativement indispensable de procéder à des méthodes soient de réparation soient de renforcement. Les techniques de renforcement des structures en béton armé au moyen de matériaux composites se sont révélés être nettement plus efficace et fiables, comparativement aux anciens procédés de renforcement.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier l'influence du renforcement par matériaux composites sur la résistance d'un château d'eau.

Par logiciel l'Ansys on a fait la modalisation entre de cas (cas renforcé et cas non renforcé) pour déterminer les fréquences et les périodes pour faire la comparaison.

Abstract:

Although some reinforced concrete structures remain in good condition under rigorous and severe climatic conditions, the disorders occurring at the level of the structures are often due to the degradation of the materials used, or to the change in functionality of the building (the increase in overloads of operation). After diagnosis and various investigations, and in order to remedy this problem, it is imperatively essential to proceed with either repair or reinforcement methods. Techniques for reinforcing reinforced concrete structures using composite materials have proven to be significantly more efficient and reliable, compared to older methods of reinforcement.

The objective of this thesis is to study the influence of reinforcement by composite materials on the resistance of a water tower.

By software the ansys we made the modalization between cases (reinforced case and non-reinforced case) to determine the frequencies and periods to make the comparison.

ملخص:

على الرغم من أن بعض الهياكل الخرسانية المسلحة لا تزال في حالة جيدة في ظل ظروف مناخية قاسية وشديدة ، فإن الاضطرابات التي تحدث على مستوى الهياكل غالباً ما تكون بسبب تدهور المواد المستخدمة ، أو إلى التغيير في وظائف

المبنى (زيادة الأحمال الزائدة من عملية). بعد التشخيص والتحقيقات المختلفة ، ومن أجل معالجة هذه المشكلة ، من الضروري بشكل أساسي المضي قدماً في طرق الإصلاح أو التعزيز. أثبتت تقنيات تقوية الهياكل الخرسانية المسلحة باستخدام المواد المركبة أنها أكثر كفاءة وموثوقية بشكل ملحوظ مقارنة بالطرق القديمة للتعزيز.

الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة تأثير التعزيزات بالمواد المركبة على مقاومة برج الماء.

من خلال البرنامج ، أجرينا عملية التعديل بين الحالات (الغلاف المقوى والحالة غير المقواة) لتحديد الترددات والفترات لإجراء المقارنة.

Table des Matières

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Tables des matières.....	iv
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux	x
Liste des symboles et abréviations	xi

Chapitre I :Etude Bibliographique

I.Introduction générale.....	01
I.1 Introduction :.....	01
I.2.Problématique et l'objectif detravail :.....	01
I.4 Structure de génie civil :.....	02
I.4.1.Bâtiment (construction) :.....	02
I.4.2 Ponts et ouvrage d'arts :.....	02
I.4.2.1 Le ponts :.....	02
I.4.2.2LESOUVRAGESD'ART :.....	03
I.5 dégradation des structures :.....	05
I.5.1 introduction :.....	05
I.5.2 Les principales causes de désordres affectant les ouvrages :.....	05
I.5.3 Les types de dégradations :.....	06
I.5.3.1 Dégradations d'origine chimique :.....	07
I.5.3.2 Dégradations d'origine physique :.....	10
I.5.3.3 Dégradations d'origine mécanique :.....	11
I.6. Méthode de diagnostic :.....	12
I.6.1.Types d'investigations :.....	14
I.6.1.1.Investigations non destructives :.....	14
I.6.1.2.Investigations destructives :.....	18
I.7 : Méthodes de renforcements / réparation :.....	21
I.7.1 : Introduction :.....	21
I.7.2 :Béton projeté :.....	22
I.7.2.1 : Projection par voie sèche :.....	22
I.7.2.2 : Projection par voie humide :.....	23

I.7.3 : Renforcement par chemisage en acier :	23
I.7.4 Renforcement par chemisage en béton armé :	24
I.7.5. Renforcement par la tôle collée :	24
I.7.6 Renforcement des structures par précontraintes additionnelles :	25
I.7.6.1 Les différents tracés de la précontrainte additionnelle :	26
I.7.7 Renforcement/réparation par matériaux composites :	26
I.8 Les technique nouvelle pour les éléments de structure :	27
I.8.1 Introduction :	27
I.8.2 Renforcement des éléments structuraux au moyen de PRF :	28
I.8.2.1 Renforcement des poteaux :	28
I.8.2.2 Renforcement des poutres :	29
I.8.2.3 Renforcement des dalles :	29

0

Chapitre II: Composites pour génie civil

II.1 - Introduction.....	31
---------------------------------	-----------

I

I.2 définitions :	31
II.3. Historique :	32
II.4. Généralités sur les matériaux composites :	33
II.5 Les composites intelligents :	35
II.5.1 Les fibres :	35
II.5.2 Les différents types de fibres :	35
II.5.3 Les matrices :	39
II.5.3.1.Les résines :	40
II.5.3.1.1 Différents types de résines :	40
II.5.3.2 Les charges et additifs :	43
II.6 les techniques de mise en œuvre :..	45

ChapitreIII: Méthode des Eléments Finis et Choix de Logiciel :

III.1 – Méthode des éléments finis :	47
III.1.1 Introduction.....	47
III.1.2 Principes de la méthode des éléments finis :	47
III.1.3 Etapes du calcul de la MEF :	48
III.1.3.1 Étapes logiques du calcul par éléments finis :	48
III.2- Principaux produits Ansys.....	50
III.2.1-ANSYS Structural :	50
III.2.2-ANSYS Mechanical :	51
III.2.3-ANSYS CFX et Fluent :	51
III.2.4-Gambit :	51
III.2.5-ANSYS AUTODYN et ANSYS LS-DYNA :	52
III .2.6-ANSYS Electromagnétiques et Ansoft :	52
III.2.7-ANSYS Multiphysics :	52
III.3-Environnements logiciels	52
III.3.1-ANSYS classic :	52
III.3.2-ANSYS Workbench :	52
III.4- Logiciel ANSYS :	53
III.4.1- Analyse structurelle :	53
III.4.2- Ansys 2020 R1 :	54
III.5-Ansys Mechanical APDL :	55
III.5.1-Introduction:	55
III.5.2- Analyse MEF par AnsysMechanical APDL :	55
III.5.3-L'avantage de choisir APDL	56
III.6.Conclusion.....	56

Chapitre IV: Analyse Numérique et cas d'étude

IV.1: Introduction.....	58
IV.2- Description du cas d'étude :	58
IV.3- Géométrie des éléments de l'ouvrage :	59
IV.4 Propriété des matériaux :	59
IV.4.1 : Béton armé:.....	59

IV.4.2 : Les composites.....	60
IV.4.2.1 :Les tissus SiKaWrap-600 C.....	60
IV.4.2.2 :Renforcement par lamelle.....	60
IV.4.2.3 : Renforcement partissu.....	61
IV.5 :Modalisation de chateaux d'eau sur logiciel ansys.....	62
IV.6 :Maillage.....	62
IV.7 : Application de sika wrap.....	63

Chapitre V :Résultat et discussion

V.1. Introduction :.....	66
V.2.Déférences entre analyse modale et les autre analyses :.....	66
V.3.Résultats obtenus grâce à une analyse modale par ANSYS :.....	67
V.4.Résultats numériques du modèle choisi :.....	67
V.4.1.Modélisation de château d'eau sans renforcement :.....	68
V.1.2.Les modes propres de vibration du l'ouvrage par éléments finis :.....	69
V.4.2.Modélisation de châteaux d'eau avec insertion de sika wrap :.....	70
V.5. Comparaison et commentaires :.....	73
V.6.Les	
déplacements :.....	75.7V.Conclu
sion générale :.....	77
Conclusion générale.....	74
Références.....	79

Liste des figures :

Figure I.1 : Bâtiment	2
Figure I.2 : les ponts.....	3
Figure I.3 : Barrage	4
Figure I.4 : château d'eau.....	4
Figure I.5 : rénovation d'une petite villa.....	6
Figure I.6 : Structures atteintes par la carbonatation.....	7
Figure I.7 : Structure atteinte par l'attaque des chlorures.....	7
Figure I.8 : Mécanisme de l'attaque des sulfates.....	8
Figure II.9 : épaufrures dues à l'alcali-réaction.....	9
Figure I.10 : Influence de la corrosion des armatures.....	10
Figure I.11 : tassement différentiel.....	11
Figure I.12 : Schéma du choix d'investigation.....	13
Figure I.13 : Schéma des investigations non destructives.....	15
Figure I.14 : Pachomètre.....	16
Figure I.15 : L'auscultation sonique des bétons.....	17
Figure I.16 : Scléromètre.....	17
Figure I.17 : Sonde de Windsor.....	18
Figure I.18 : Schéma des investigations destructives.....	19
Figure I.19 : Carottage.....	20
Figure I.20 : Mesure du pote.....	21
Figure I.21 : béton projeté par voie sèche.....	23
Figure I.22 : béton projeté par voie humide.....	23
Figure I.23 : plaques d'acier collées.....	25
Figure II.24 : précontrainte additionnelle.....	26
Figure I.25 : matériaux composites.....	27
Figure I.26 :Poteau circulaire en BA confiné par matériaux composites.....	28
Figure I.27 : poutres en BA renforcées par matériaux composites.....	29

Figure I.28: tablier de pont en BA renforcé par matériaux composites.....	29
Figure II.1 : tissu de fibre de carbone	37
Figure II.2 : fibre de verre	37
Figure II.3 : fibre d'aramide	39
Figure II.4 : le rôle de la matrice	40
FigureIV.1 : châteaux d'eau.....	58
FigureIV.2 : détail de châteaux d'eau.....	59
FigureIV.3: vue sur la modélisation châteaux d'eau.....	62
Figure IV.4 : maillage	63
Figure IV.5 : Vue sur L'application des composite	63
Figure IV.5 : Vue sur la couche de siKaWarp600C.....	64
Figure V. 1 : Courbe des fréquences de château d'eau non renforcé	68
Figure V.2 : courbe des périodes de châteaux d'eau non renforcé.....	69
Figure V.3 : Mode de vibration 1(non renforcée).....	69
Figure V.4 : Mode de vibration 2 (non renforcée).....	70
Figure V.5 : Mode de vibration 3 (non renforcée).....	70
Figure V.6 : Courbe des fréquences de château d'eau renforcé	71
Figure V.7 : courbe des périodes de châteaux d'eau renforcée.....	71
Figure V.8 : Mode de vibration 1(renforcée).....	72
Figure V.9 : Mode de vibration 2 (renforcée).....	72
Figure V .10 : Mode de vibration 3 (renforcée).....	73
Figure V.11: courbe de comparaison des fréquences.....	74
Figure V. 12: courbe de comparaison des périodes	74
Figure V.13 : déplacement direction X sans renforcement	75
Figure V.14 : déplacement direction y sans renforcement	75
Figure V.15 : déplacements direction y avec renforcement	76
Figure V.16 : déplacement direction x avec renforcement	76
Figure V.17 : déplacement direction z avec renforcement	77

La listes des tableaux

Tableau II.1 : caractéristique mécanique de quelques fibres.....	34
Tableau III -1 : Organigramme d'étapes caractéristiques d'un programme d'éléments finis..	50
Tableau IV.1 : Propriété de Béton armé.....	60
Tableau IV.2 : Propriétés de SikaWrap -600 C.....	60
Tableau IV.3 : Propriétés de CarboDur S1512.....	61
Tableau IV.4 :Propriété de la résine Sikadur-30.....	61
Tbleau IV.5 :Propriétés de SikaWrap -600 C.....	61
Tableau IV.6 : propriétés de la résine sikadur -300.....	62
Tableau V.1 : Les types d'analyse.....	67
Tableau V.2 : Valeurs des fréquences obtenus par ANSYS « non renforce ».....	68
Tableau V.3 : Valeurs des fréquences obtenus par ANSYS « « renforcée » ».....	71
Tableau V.4 : comparaison entre les valeurs des fréquences.....	74

Liste des symboles et des abréviations :

BTPH : bâtiments, travaux publics, hydrauliques

TFC : tissu de fibres de carbone

MC : matériaux composites

NC : nano 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: Termoplastiques

TD: Thermodurcissables

EBR: EXTERNALLY BONDED REINFORCEMENT

NSM: NEAR SURFACE MOUNTED)

SNSM: SIDE NEAR SURFACE MOUNTED

MEF : méthode des éléments finis

FEA : Finite Element Analysis

APDL: Ansys Parametric Design Language

HPC: High Performance Computing (Calcul haute performance)

E_c : Module d'élasticité

ν : Coefficient de poisson

δ : Densité

f_i : fréquences propres de vibration de la structure

[M] : matrices de masse de la structure

[K] : matrices de rigidité de la structure

Chapitre I : Etude Bibliographique

I-INTRODUCTION GÉNÉRALE

I.1 Introduction :

La majorité des ouvrages de génie civil construits en béton armé sont dimensionnés pour une durée de vie de cent ans en moyenne.

Cependant, cette dernière des fois dépassée par quelques constructions, ou réduite par des différents types de désordres, d'où la nécessité d'un

Renforcement et/ou d'une réparation pour assurer la sécurité des usagers avant d'arriver à leur limite de vie utile.

Au cours des dernières années, une méthode innovatrice de renforcement est proposée. Celle-ci consiste à l'utilisation des matériaux composites à base de fibres en polymère (Polymère Renforcé de Fibre, PRF), pour le renforcement externe des structures en béton armé.

Grâce à leurs caractéristiques mécaniques et physico-chimiques, leurs faibles densités, leurs remarquables résistances à la corrosion, leurs très bonnes tenues à la fatigue ainsi que leurs facilités d'installation, les matériaux composites sont apparus très clairement comme la solution à plusieurs problèmes rencontrés.

I.2. Problématique :

-Quelles sont les différents types de dégradations et quelles sont les méthodes de réparation ?

-Comment modéliser numériquement un élément de structure renforcé par des matériaux composites avec la MEF ?

I.3. l'objectif de travail :

L'objectif de ce travail est de mettre en relief ces principaux paramètres à travers les points suivants :

- . Nous proposons dans ce sujet de master une application de ces composites et/ou d'autres composites intelligents pour renforcer d'une manière externe les éléments de structure
- . Une modélisation pour les M.E.F sera établie
- . La validation des résultats obtenus sera faite par comparaison des fréquences entre un cas renforcé par des composite et l'autre non renforcé

I.4 Structure de génie civil :

I.4.1/Bâtiment (construction) :

Un bâtiment au sens commun est une construction immobilière, réalisée par intervention humaine, destinée d'une part à servir d'abri, c'est-à-dire à protéger des intempéries des personnes, des biens et des activités, d'autre part à manifester leur permanence comme fonction sociale, politique ou culturelle. Un bâtiment est un ouvrage d'un seul tenant composé de corps de bâtiments couvrant des espaces habitables lorsqu'il est d'une taille importante.[32]



Figure I.1 : Bâtiment

I.4.2 Ponts et ouvrage d'arts :

I.4.2.1 Le ponts : D'une façon générale, un pont est un ouvrage en élévation, construit in situ, permettant à une voie de circulation (dite voie portée) de franchir un obstacle naturel ou artificiel : rivière, vallée, route, voie ferrée, canal, etc. La voie portée peut être une voie routière (pont-route), piétonne (passerelle), ferroviaire (pont-rail) ou, plus rarement, une voie d'eau (pont-canal). On distingue les différents types d'ouvrages suivants :

■ **ponceau ou dalot** : pont de petites dimensions (quelques mètres) ;

■ **viaduc** : ouvrage de franchissement à grande hauteur et portée, généralement constitué de nombreuses travées, comme la plupart des ouvrages d'accès aux grands ponts. Le terme de viaduc est généralement réservé aux franchissements situés en site terrestre ;

■ **passerelle** : ouvrage destiné aux piétons, exceptionnellement aux canalisations . [33]



Figure I.2 : les ponts

I.4.2.2 LES OUVRAGES D'ART : Un ouvrage d'art se définit comme une construction de grande importance nécessitée par le rétablissement d'une voie de communication (route, voie ferreuse, canal etc...), un dispositif de protection contre l'action de la terre ou de l'eau, un dispositif de retenue des eaux, et autre. Le terme « d'Art » qui accompagne le mot ouvrage pour traduire que leur conception et leur réalisation font intervenir des connaissances ou l'expérience joue un rôle aussi important que la théorie, connaissances appelées « art de l'ingénieur ». Un ouvrage d'art peut être qualifié selon le milieu dans le quel il est construit : ouvrage d'art terrestre, ouvrage maritime, ouvrage d'art de montagne, ouvrage d'art fluvial etc....

Les différents types d'ouvrages d'art Selon leur nature et leur rôle on distingue :

- a) Les ouvrages de franchissement ou lié a des voies de communications : pont, tunnel, écran acoustique.
- b) Les ouvrages de protection ou de soutènement : destiné a la stabilisation des pentes ou des soutènements des terres afin de se prémunir des effets des mouvements des terres (écroulements, glissements, coulées des boues etc....) : mur, rideaux de palplanche, parois moulé, clouage de massif etc....
- c) Ouvrages de retenues d'eau : barrage (en béton ou en terre et enrochements), digues (remblais longitudinaux naturels ou artificiels).
- d) Autres ouvrages d'arts : tranchée ouverte ou couverte, quais, réservoir, structure paré-pierre ou paré-bloc [32]

•Barrages :

Les barrages ce sont des ouvrages hydrauliques qui barrent, sur toute la largeur, une section d'une vallée et qui créent ainsi une dépression topographique artificielle étanche à l'eau. La retenue créée par le barrage peut stocker un part important des apports d'eau (le barrage surélève le plan d'eau amont).

-Les différents types de barrages :

- Le barrage-voûte
- Le barrage-poids
- Le barrage à contreforts

-La digue



Figure I.3 : Barrage

●**château d'eau :**

Un château d'eau est une construction destinée à entreposer l'eau, et placée en général sur un sommet géographique pour permettre de la distribuer sous pression.

La réserve d'eau joue un rôle de tampon entre le débit demandé par les abonnés et le débit fourni par la station de pompage. Il permet ainsi d'éviter de démarrer trop souvent les pompes et de les protéger. Une telle réserve permet également de faire face aux demandes exceptionnelles en cas d'incendie et de manque d'eau. [32]



Figure I.4 : château d'eau

I.5 dégradation des structures :

I.5.1 introduction :

Le béton armé est le matériau de base le plus utilisé dans le génie civil depuis plus d'un siècle. Il peut se dégrader et perdre une part de ses propriétés sous l'influence de causes multiples qui

peuvent être liées à sa qualité originelle ou à des sollicitations d'exploitation ou d'environnement. Des pathologies apparentes ou cachées peuvent survenir. Afin de connaître leur nature, leur étendue et leur potentialité d'évolution, on établit un diagnostic nécessaire pour la prise des décisions relatives à la maintenance de l'ouvrage concerné. [1]

Suivant les différentes causes de désordres, les opérations de maintenance des ouvrages consistent à :

- Les protéger en limitant la corrosion et en assurant de meilleures conditions d'étanchéité
- Les réparer en cherchant à compenser les pertes de rigidité ou de résistance
- Les renforcer en améliorant les performances et la durabilité de l'ouvrage
- D'empêcher, si possible, le renouvellement des désordres [2]

I.5.2 Les principales causes de désordres affectant les ouvrages :

- Accroissement des charges qui sollicitent la structure :

_ Changement d'usage de la structure (exemple: bâtiment d'habitation réhabilité en centre commercial),

_ Augmentation du niveau d'activité dans la structure (exemple: anciens ponts soumis au trafic actuel),

_ Installation de machinerie lourde dans les bâtiments industriels.

- Défauts dans le projet ou dans l'exécution :

_ armature insuffisante ou mal placée,

_ mauvais matériaux,

_ dimensions insuffisantes des éléments structurels.

- Rénovation des structures anciennes :

_ prise en compte de renforts par des sollicitations non considérées au moment du projet ou de la construction (vibration, actions sismiques et autres),

_ connaissance des insuffisances de la méthode de calcul utilisée lors de la conception, ainsi que des limitations montrées par des structures calculées durant une époque ou une période,

_ vieillissement des matériaux avec une perte des caractéristiques initiales.



Figure I.5 rénovation d'une petite villa

- Changement de la forme de la structure :

- _ Suppression de poteaux, piliers, murs porteurs, élargissement de portées de calcul,
- _ Ouverture de passages en dalles pour escaliers ou ascenseurs

- Nécessité d'améliorer les conditions en service :

- _ Diminuer les déformations et flèches,
- _ Réduire l'intensité des contraintes sur les armatures,
- _ Diminuer l'ouverture des fissures. [3]

I.5.3 Les type de dégradations :

I.5.3.1 Dégradations d'origine chimique :

- Carbonatation :

La carbonatation est un phénomène de vieillissement naturel des matériaux. Elle conduit à la formation du carbonate de calcium par réaction chimique entre la portlandite et le gaz carbonique présent dans l'air. Le taux de présence du gaz carbonique varie en fonction du milieu où se trouve l'ouvrage.

Cette réaction contamine la basicité des bases alcalines présentes dans la solution interstitielle du béton conduisant à une diminution du Ph du béton de 13 à une valeur avoisinant 8 voire moins.

Lorsque la profondeur de la carbonatation atteint les armatures, le film de carbonatation disparaît et les armatures sont dépassivées ainsi le diamètre des armatures diminue ce qui conduit à une diminution de la résistance. Cette carbonatation pourrait aussi conduire à la rouille qui est une matière expansive qui peut causer l'éclatement du béton. [4]



Figure I.6: Structures atteintes par la carbonatation.

- Attaque des chlorures :

L'attaque par les chlorures forme avec la carbonatation la cause principale de la corrosion des armatures.

Les chlorures se rencontrent principalement dans l'eau de mer et l'eau de gâchage. Cette corrosion est due à un mécanisme similaire à celui de la carbonatation par pénétration des ions de chlore dans la matrice du béton.



Figure I.7: Structure atteinte par l'attaque des chlorures

- Attaque des sulfates :

Les sulfates peuvent se rencontrer essentiellement dans les zones agricoles où on utilise les engrais et fertilisant du sel.

Les sulfates peuvent aussi provenir des fumées et des résidus dégagés par les industries chimiques.

En réaction avec la pâte de ciment, trois composés peuvent se former en fonction de la concentration en sulfates, du Ph et de la température : l'ettringite, le gypse et la thaumasite

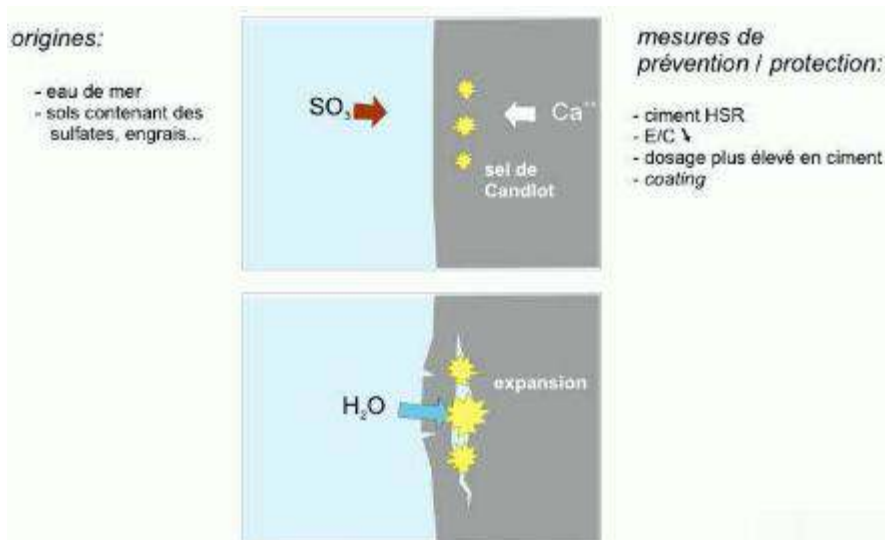


Figure I.8: Mécanisme de l'attaque des sulfates

● Alkali-réaction

Une autre cause des dégradations chimiques est l'alkali-réaction. Ce phénomène peut se produire si les granulats sont réactifs.

L'alkali-réaction regroupe toutes les réactions qui peuvent se produire entre les granulats du béton et les alcalins de la pâte du ciment hydraté.

Les études ont montré que trois conditions doivent être simultanément remplies pour que ces réactions aient lieu :

- _ Le granulat doit être réactif.
- _ Un taux d'humidité relativement élevé compris entre 80 et 85%.
- _ Une grande concentration en alcalins.



Figure I.9: épaufrures dues à l'alkali-réaction

● La corrosion des armatures

Certaines attaques chimiques conduisent à la corrosion des armatures.

On peut définir la corrosion comme la transformation des métaux en composé divers sous l'action de phénomènes naturels.

La dégradation causée par ce phénomène est facile à déceler. Les symptômes en sont : une surface oxydée, piquée, laissant apparaître en général des plaques et écailles d'oxydes facilement détachables, d'aspect rouge brun, typique.

Dans le cas de l'acier, ce composé adhère mal au métal d'où il est issu et se détache facilement en écailles ; la surface de la section se trouve réduite.

La corrosion de l'acier provoque la réduction de la section de l'armature (partiellement, localement ou en totalité). De plus, la réaction chimique de formation de la rouille (mélange d'oxydes et d'hydroxyde de fer) s'effectue avec une expansion (le volume de l'acier devient 3 à 4 fois supérieur). Ce gonflement provoque dans le béton des contraintes d'expansion importantes, supérieures à la résistance à la cohésion du béton. La manifestation visuelle qui en résulte se présente sous forme de fissures en surface qui s'amorcent à partir de l'acier.

Des fissures internes reliant les armatures peuvent aussi disloquer le béton. La décohé sion peut présenter des pustules ou des plaques de béton. Les manifestations diffèrent selon l'épaisseur du béton, l'écartement et le diamètre des aciers. Il en résulte que l'élément en béton armé ne fonctionne plus, au point de vue de la résistance des matériaux, comme il avait été calculé primitivement. [1]

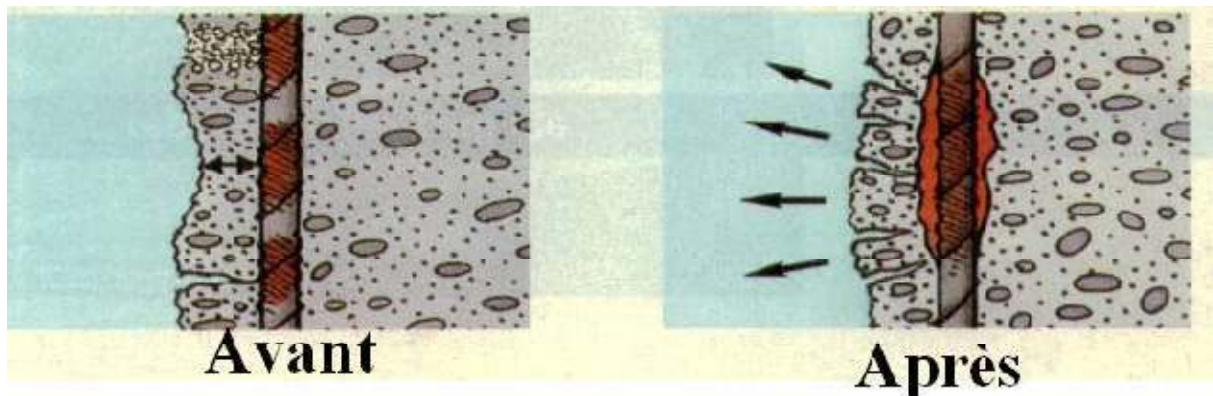


Figure I.10: Influence de la corrosion des armatures.

I.5.3.2 Dégradations d'origine physique :

- Séisme :

Un séisme est une manifestation de la tectonique des plaques. Il se traduit en surface par une vibration du sol provenant d'un déplacement brutal de la roche. En surface, un séisme peut dégrader ou détruire des bâtiments, produire des décalages de la surface du sol de part et d'autre des failles. Il peut aussi provoquer des chutes de blocs, une liquéfaction des sols meubles imbibés d'eau, des avalanches ou des raz de marée (tsunamis).

- Gel dégel :

Dans les zones où le climat est très froid, l'eau absorbée par le béton gèle si elle est exposée à des températures inférieures à zéro degré Celsius, le béton augmente de volume et la pression résultante pourra éclater ou épaufrer la surface du béton

- Le retrait :

Le retrait est un phénomène physico-chimique qui existe de façon systématique au sein du béton. Il correspond à l'action du départ de l'eau excédentaire du béton vers l'extérieur de l'élément de structure. Le symptôme caractéristique de l'action du retrait sur un ouvrage est la fissuration qui peut être soit orientée, soit multidirectionnelle. [5]

I.5.3.3 Dégradations d'origine mécanique :

- Tassement différentiel :

Lorsqu'un sol tasse d'une façon inégale sous les différents points d'une fondation, on dit qu'il y a un tassement différentiel.

Il se manifeste soit par un basculement soit par de graves désordres dans les éléments non structuraux et parfois dans la structure elle-même si les efforts sont incompatibles avec la sécurité des matériaux.

Les causes des tassements différentiels sont multiples, mais les plus fréquemment rencontrés sont :

- Les sols compressibles.
- Les remblais récents
- La non homogénéité du sous-sol de fondations
- L'emploi des fondations hétérogènes
- Les affouillements du sol sous les fondations
- La modification du volume de certains sols en fonction de la teneur en eau...



Figure I.11: tassement différentiel.

● Ondes de chocs : Le béton est susceptible de s'épaufrer quand il est soumis à des ondes de choc. Ceci est dû aux différentes vitesses de propagation des ondes dans les différents matériaux (les agrégats, le liant et les armatures). La résistance aux chocs peut être améliorée par l'emploi pour la confection du béton, d'agrégats anguleux et rugueux et par l'utilisation de sections fortement armées.

● Désordres dus à un défaut de conception : Si certains schémas de fissuration correspondent à un type de sollicitations bien défini, on peut aussi, à partir du relevé des fissures, essayer de comparer l'état d'une structure à celui prévu par le calcul, dans le but de détecter des anomalies de fonctionnement. Si le tracé des fissures est conforme au schéma prévu, une indication sur le risque de dépassement d'un chargement normal est donnée par la valeur de l'ouverture des fissures et sa variation. Des fissures correspondant à un schéma non prévu constituent, aussi, une indication de fonctionnement anormal. La plupart du temps, les fissures résultent d'une insuffisance consécutive à des oublis ou à des impasses au niveau des études, parfois aussi d'un manque de coordination entre le bureau d'études et le chantier. [6]

I.6 Méthodes de diagnostic :

Le diagnostic d'un ouvrage est une étape importante dans le processus de sa réhabilitation. Il permet avant tout de se prononcer sur son état de santé et de voir quelles sont les éventuelles pathologies ainsi que leur ampleur. Généralement lorsque l'on effectue un diagnostic, c'est quand un client a découvert quelque chose qui n'allait pas dans le fonctionnement de l'ouvrage ou bien l'apparition de désordres.

Le diagnostic peut avoir principalement deux finalités. Dans un premier temps, il peut être demandé de suivre l'évolution des différentes pathologies dans le temps, que ce soit à court, moyen ou long terme. Cela permet d'évaluer le comportement de l'ouvrage sous l'effet de ces troubles, de voir s'il y a une stagnation du phénomène ou s'il y a une dégénérescence, auquel cas il est important de prévoir des réparations. L'autre finalité d'un diagnostic c'est de répertorier tous les désordres, mais aussi la constitution de chaque élément, en vue d'un traitement immédiat.

Pour répondre à la demande du client, il est nécessaire de comprendre le plus précisément possible ses besoins et les caractéristiques de l'ouvrage à diagnostiquer. Pour cela, on effectue une visite sur site ou, à défaut de pouvoir s'y rendre, l'analyse de photos et de plans agrémentés de toutes les observations du client.

Cette phase est primordiale pour préparer au mieux le futur diagnostic. Il s'agit de :

- Connaître le type d'ouvrage sur lequel on va réaliser le diagnostic et l'environnement dans lequel il se trouve ;
- Relever les principales dimensions de l'ouvrage et ses matériaux constitutifs ;
- Noter les principaux types de désordres et estimer leur quantité.

Lorsque l'ensemble de ces données sont recueillies, un document contractuel permettant de matérialiser l'offre de l'entreprise au client est rédigé : le devis.

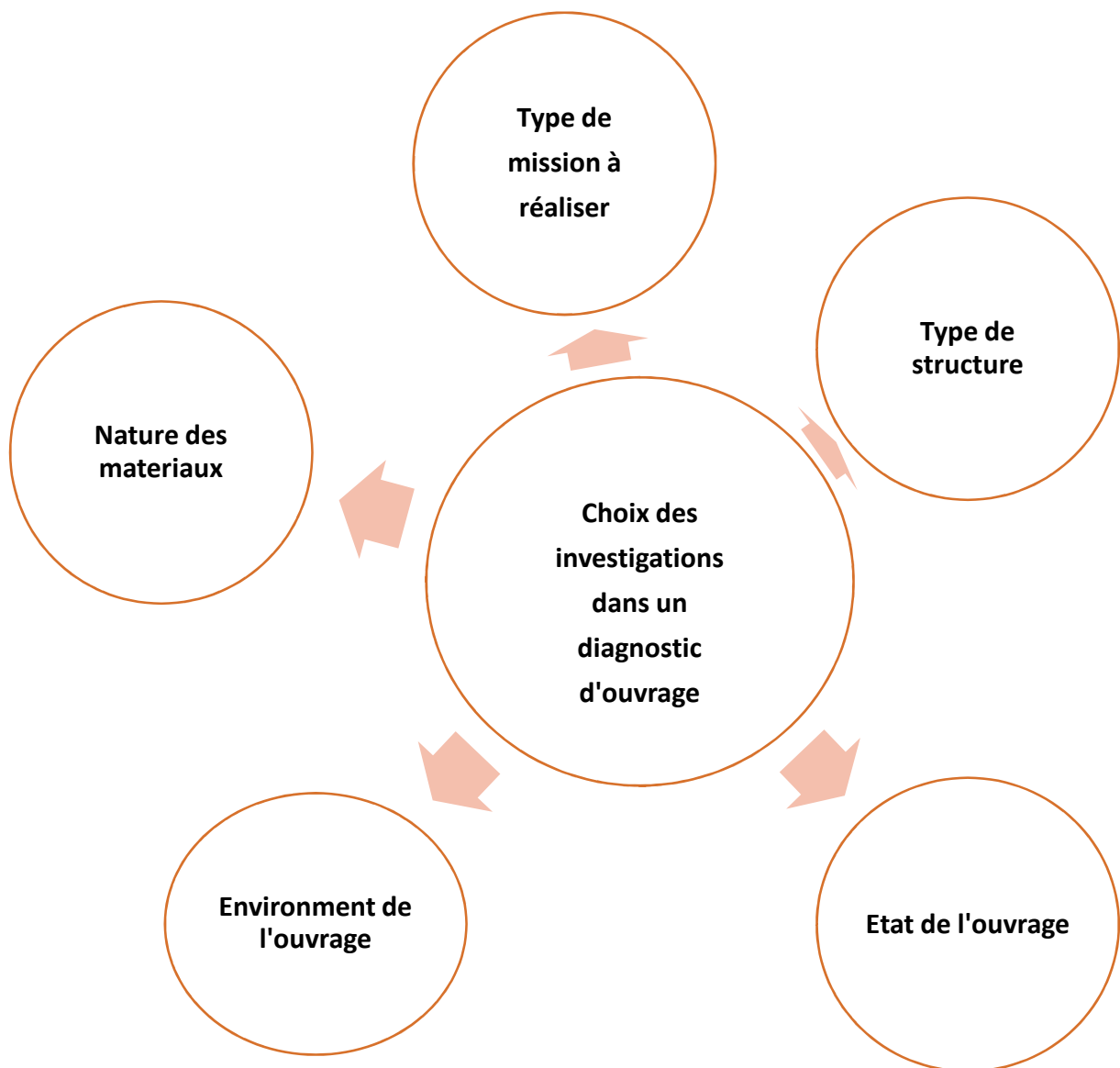


Figure I.12 : Schéma du choix d'investigation

Le choix des investigations dépend de :

✓ **Type de mission à réaliser :**

Diagnostic de maintenance en vue d'éventuelles réparations, diagnostic structure pour un calcul de résistance ou encore évaluation des risques vis-à-vis des biens et des personnes.

✓ **Nature des matériaux :**

Les matériels et techniques utilisés pour réaliser le diagnostic ne sont pas les mêmes si l'on a à faire à du béton, de l'acier, du bois ou encore de la pierre.

✓ **Type de structure :**

Géométrie et taille de l'ouvrage.

✓ **Etat de l'ouvrage :**

Les investigations dépendent des désordres qui affectent l'ouvrage. On aura par exemple recours à un matériel particulier en présence de fissures ou d'armatures corrodées dans le béton.

✓ **Environnement de l'ouvrage :**

L'étude porte également sur l'environnement dans lequel se trouve l'ouvrage car certains désordres y sont parfois directement liés. C'est ainsi fréquemment le cas pour les structures soumises à des attaques chimiques.

De plus, les accès limités voire impossibles sur une partie de la structure peuvent être un frein à la réalisation d'investigations et nécessiter l'utilisation de moyens spécifiques (nacelle, échafaudages, etc.).

I.6.1- Types d'investigations :

Il est possible de classer les différentes investigations en deux catégories : soit les méthodes non destructives, soit les méthodes destructives. Les principales méthodes rencontrées lors de diagnostics sont décrites dans la suite

I.6.1.1. Investigations non destructives :

Le principe des investigations non destructives réside dans le fait qu'on ne touche pas directement à la structure. Pour les ouvrages en béton armé, il existe différentes méthodes permettant d'effectuer un diagnostic sans risques de porter atteinte à son intégrité.

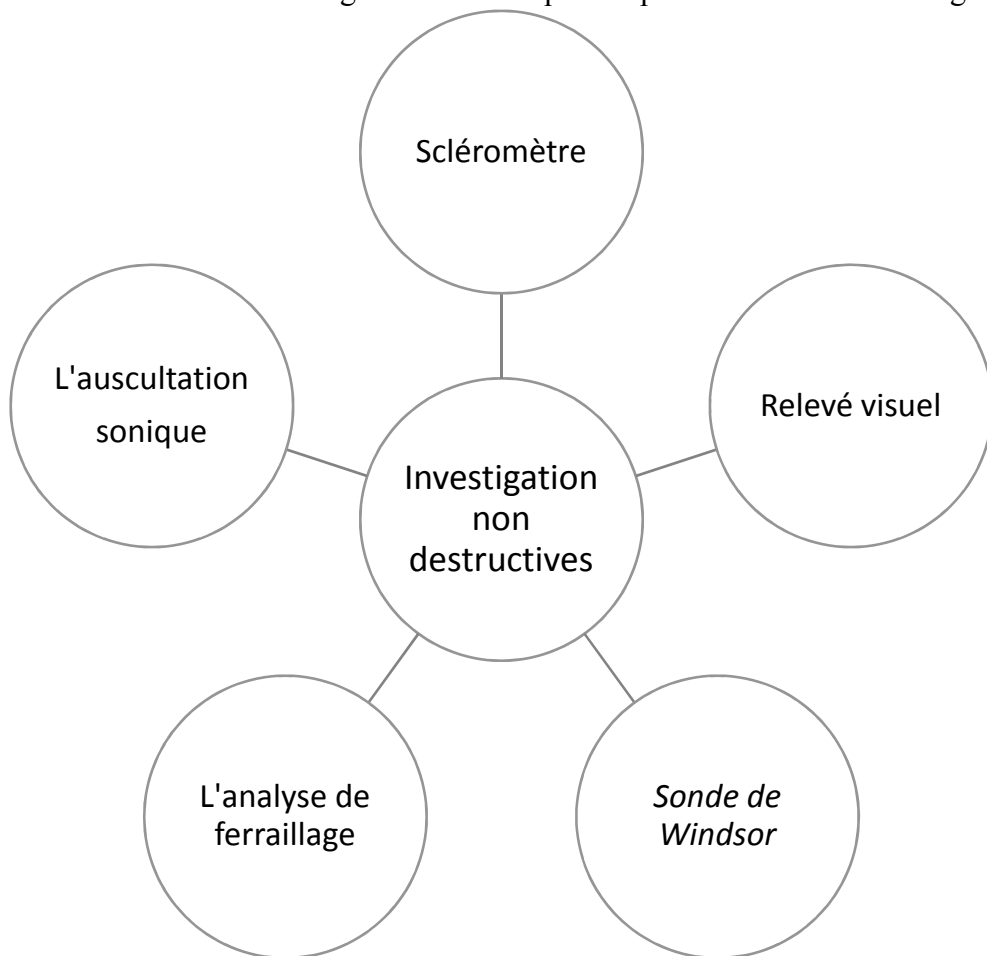


Figure I.13: Schéma des investigations non destructives

Relevé visuel : Le principe du diagnostic visuel est d'aller sur le site et de répertorier les différents défauts que présentent les structures. Ces défauts, pour les ouvrages en béton armé peuvent être très nombreux.

Les principaux désordres sont les suivants :

- Les fissures avec leur ouverture et leur longueur.
- Les fractures avec leur ouverture, décalage ou rejet.
- La présence de coulures de calcite.
- Les zones d'altération superficielles et profondes.
- Les zones humides ainsi que les zones de mousses ou de végétation.
- Les zones de faïençage.
- Les éclats de béton en formation ou profonds ainsi que la présence d'aciers apparents.
- Les zones de ségrégation.

Tous ces éléments doivent être répertoriés sur des plans, accompagnés d'un reportage photographique des principaux désordres. Cette première étape permet de définir la gravité des troubles mais aussi de permettre de classer les différents éléments selon leur priorité

L'analyse du ferrailage :

Les mesures de reconnaissance du ferrailage (position et enrobage) peuvent se faire à l'aide d'un pachomètre. La profondeur d'auscultation de cet appareil est de l'ordre de 10cm suivant le béton et le réseau d'armature. Il existe deux types de mesures : soit par détection linéaire, consistant à détecter les aciers perpendiculaires à la trajectoire du pachomètre, soit par imagerie, permettant de détecter les aciers présents dans un carré de soixante centimètres de côté.



Figure I.14: Pachomètre.

La première méthode permet par exemple de connaître l'espacement des cadres d'une poutre. Alors que la deuxième permet de déterminer le clouage des aciers au niveau d'une jonction poteau/poutre. Cependant, pour les deux types de mesure, les résultats donnent les enrobages et l'espacement du ferrailage. Il peut être utile, lorsque cela est possible, de dégager quelques armatures afin de calibrer l'appareil. L'inspection des armatures dégagées permet de confirmer leur nature, et de mettre en évidence d'éventuels désordres ou pertes de section en zone altérée.

L'auscultation sonore :

L'auscultation sonore est une méthode utilisée pour caractériser la qualité du béton. Le principe de l'essai repose sur la mesure de la vitesse de propagation du son dans le matériau.

On mesure la propagation d'une première impulsion d'un train d'ondes généré par un transducteur, entre deux points déterminés du béton. On peut, à partir du temps de propagation mesuré, exprimer une vitesse conventionnelle de propagation : c'est le quotient de la distance entre les deux transducteurs par le temps mesuré.

Deux méthodes de mesure sont possibles : soit la mesure en transparence, qui fournit une information sur la qualité du béton « à cœur », soit la mesure en surface, qui concerne la couche externe, sur une épaisseur de 6 à 8 cm de béton environ.

Pour les mesures en transparence, le principe est que la vitesse de propagation du son est moindre dans le

vide. Si le béton est poreux ou de mauvaise qualité, il y aura plus d'air dans le matériau.

Ainsi la vitesse de propagation mesurée sera plus faible. Pour ce qui est des mesures en surface, elles permettent de déterminer la présence d'une couche ou bien la profondeur d'une fissure



Figure I.15 : L'auscultation sonore des bétons

Scléromètre :

Le principe de l'essai sclérométrique repose sur la corrélation entre la dureté d'un matériau et sa résistance à la compression. Pour déterminer la dureté du béton, une bille d'acier est projetée sur une sonde en contact avec l'ouvrage à inspecter. Lors de son rebond, la bille entraîne un index coulissant sur une règle de mesure. Plus le rebond sera important, plus le matériau sera dur.



Figure I.16: Scléromètre

Essai de résistance à la pénétration :

La sonde de Windsor est généralement reconnue comme le meilleur moyen pour exécuter l'essai de résistance à la pénétration. La profondeur de la pénétration fournit une indication de la résistance du béton à la compression



Figure I.17 : Sonde de Windsor.

Cette méthode donne des résultats variables, et il ne faut pas s'attendre à obtenir des mesures précises de la résistance du béton. Cet essai a toutefois l'avantage de fournir un moyen rapide de contrôler la qualité et la maturation du béton coulé sur place. Il fournit aussi un moyen d'évaluer le développement de la résistance par la cure. Cet essai est essentiellement non destructif puisqu'il peut être effectué sur place sur le béton, et qu'il ne nécessite qu'un rebouchage mineur des trous sur les faces qui ont subi l'essai.

Investigations destructives :

Lorsque cela est possible, il peut s'avérer utile d'avoir recours à des essais destructifs. Ces méthodes permettent généralement de faire des prélèvements et de connaître la nature des matériaux présents, leurs caractéristiques mécaniques et chimiques ainsi que leur état d'altération.

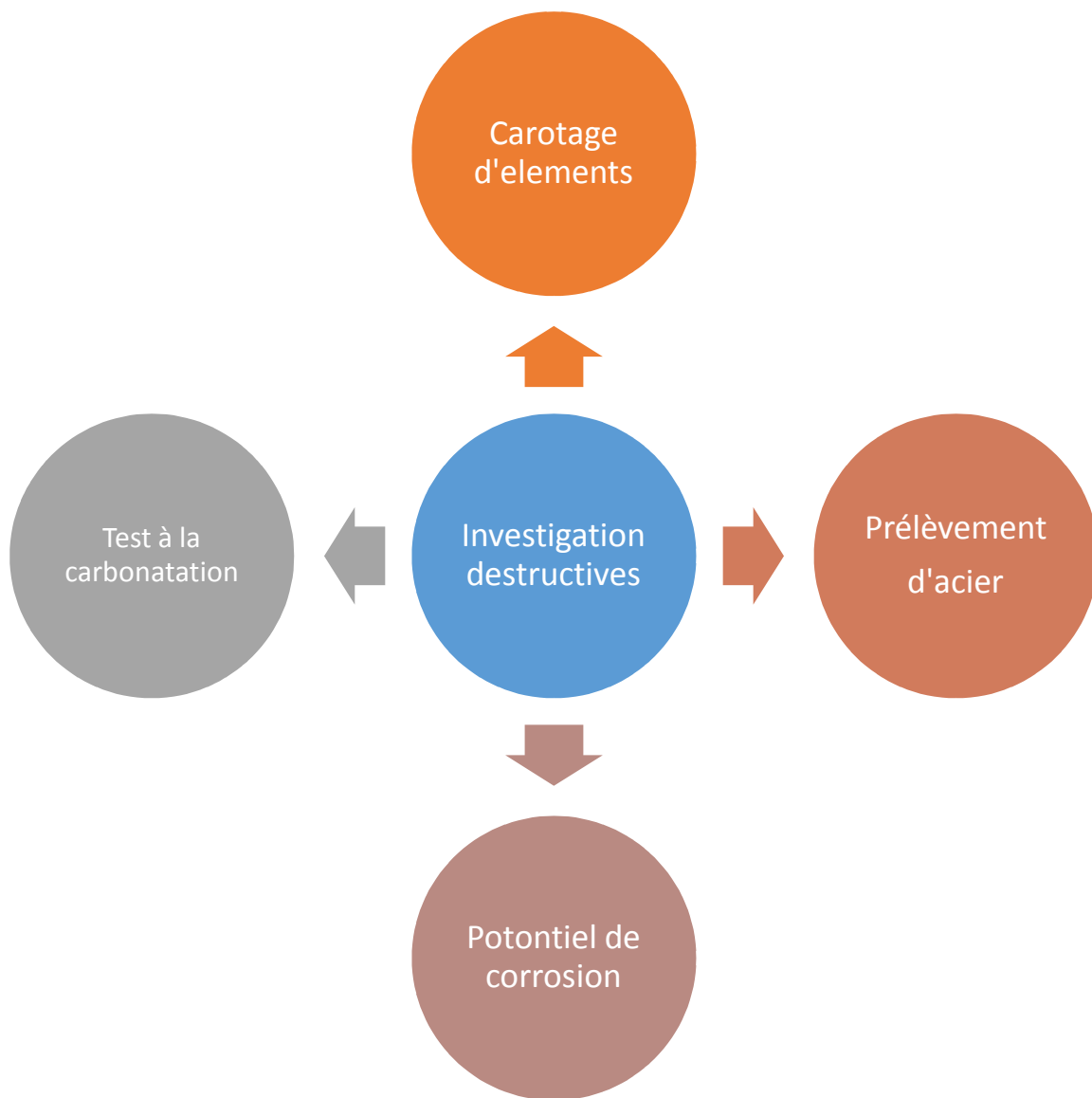


Figure I.18: Schéma des investigations destructives.

Test à la carbonatation :

Le dioxyde de carbone atmosphérique qui pénètre à travers la porosité du béton, depuis la surface du parement, réagit avec les constituants alcalins contenus dans le béton. Au fur et à mesure de sa pénétration, ce processus conduit à une réduction de la valeur du pH d'une valeur de 13 à une valeur inférieure à 9. Ceci a pour effet de diminuer voir supprimer l'effet de passivation de l'acier qui lui assurait une protection naturelle contre la corrosion. Le degré d'avancement de la carbonatation (profondeur de carbonatation) de la matrice cimentaire est directement lié aux caractéristiques intrinsèques des matériaux (porosité, âge, ...) ainsi qu'aux conditions environnementales (humidité, température, ...). Une des méthodes d'essai existante consiste à pulvériser un colorant sensible au pH (solution de phénolphtaléine) sur une coupe fraîche de béton. La partie non colorée indiquant la zone carbonatée ($\text{pH} < 9$).

Carottage :

Le carottage d'éléments en béton armé peut avoir différentes utilités. On y a recours principalement pour effectuer des essais de résistance à la compression sur les carottes prélevées, afin de déterminer les caractéristiques mécaniques des éléments. Il est aussi possible d'analyser chimiquement le prélèvement afin de connaître les constituants du béton tels que le type de ciment utilisé, le rapport E/C estimé, la taille des granulats. En ce qui concerne les dallages, il est parfois nécessaire de devoir carotter l'élément afin de réaliser des essais géotechniques tels que le pénétromètre dynamique ou bien un prélèvement de sol en vue de déterminer les caractéristiques mécaniques du sol en place. Cela a lieu généralement lorsque l'ouvrage change de destination, quand les charges d'exploitation changent ou si une restructuration du bâtiment est envisagée.



Figure I.19: Carottage.

Prélèvement d'acier :

En cas de re-calcul d'une structure, il est important de connaître les aciers présents dans un ouvrage.

Le prélèvement d'acier permet de déterminer le type d'acier (HA, lisse, TOR, etc.) ainsi que leurs caractéristiques mécaniques telles que la limite d'élasticité.

Mesure du potentiel de corrosion :

La mesure du potentiel de corrosion ne peut se faire que sur des ouvrages ayant un ferraillement continu et n'ayant pas de revêtement de surface pouvant agir comme isolant.

Le principe de l'essai est de mettre à nu une armature puis la connecter à une borne d'un millivoltmètre à haute impédance. Une électrode de référence est placée sur le parement et elle-même reliée à une autre borne du millivoltmètre.

Elle est dite de référence car elle a un potentiel constant du à un équilibre électrochimique.

Les résultats obtenus permettent de déterminer la probabilité de corrosion des armatures .



Figure I.20: Mesure du pote

I.7 : Méthodes de renforcements / réparation :

I.7.1 : Introduction :

Diverses techniques de renforcement sont utilisées, comme: le béton projeté, la précontrainte extérieure, les tôles collées et le collage des matériaux composites à bases de fibres de carbone.

Les techniques les plus répandues en Algérie (chemisage, béton projeté, etc.), présentent des inconvénients tels que : la mise en œuvre, la durée, la nécessité de grands réaménagements et le changement très apparent de la forme de la structure chemisée. Cependant, les matériaux composites, utilisés dans l'industrie aéronautique et spatiale, commencent à avoir leur application comme techniques de renforcement.

Ces matériaux sont introduits sur le marché national (SIKA Outre-mer, Contact, Freyssinet France, Freyssinet Italie, MBT, etc.), et leur application comme matériaux de renforcement est encore non maîtrisable par la plupart de nos entreprises et surtout celles du bâtiment. L'idée de renforcement par ces matériaux est basée sur le principe de L'HERMITE qui, dans les années 70 utilisait des tôles collées sur des zones tendues de la pièce à renforcer pour augmenter les performances de fonctionnement de cette dernière.

Le projet de réparation et/ou de renforcement des structures de béton armé et de maçonnerie repose, en général, sur la mise en œuvre d'une combinaison de plusieurs techniques que l'on peut ranger dans l'une des cinq catégories suivantes :

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

La réparation ou le renforcement des structures en béton armé fait appel le plus souvent à l'ajout de matière, plus rarement à l'ajout des forces les techniques d'ajout de matière sont utilisées pour les renforcements structuraux

Les trois techniques classiques d'ajout de matière sont l'ajout d'armatures passives (appelé parfois chemisage), l'ajout de béton (exemple béton projeté), et les tôles collées. Mais ces techniques commencent de plus en plus à être remplacées par d'autres techniques telles que la technique d'ajout de lamelles de carbone. Lamelles de fibre de verre, ou tissu de fibres de carbone. [7]

I.7.2 : Béton projeté :

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

La difficulté de l'emploi de cette méthode provient essentiellement du mode d'application et de mise en œuvre (matériels, main d'œuvre et problèmes de sécurité).

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

I.7.2.1 : Projection par voie sèche :

Le procédé par voie sèche est le plus utilisé pour les réparations. Les matériaux secs, c'est-à-dire le ciment et les granulats, sont incorporés directement dans une canalisation, où ils sont transportés par l'air comprimé jusqu'à la lance.

L'eau sous pression est introduite dans le mélange à la lance par l'entremise d'une bague perforée, cette bague permet le mélange de l'eau avec les matériaux.

Le malaxage de l'eau et des matériaux secs se produit dans la lance et au contact de la surface.

Le procédé par voie sèche a l'avantage de pouvoir être arrêté et reparti à tout moment durant les travaux. En effet, comme le contact du ciment et de l'eau ne se fait qu'à la lance, il n'y a aucune prise possible dans l'appareillage si la production du béton est interrompue.

Des résistances élevées peuvent être facilement obtenues avec ce procédé puisqu'il permet d'atteindre de faibles rapports eau/liant. [8]

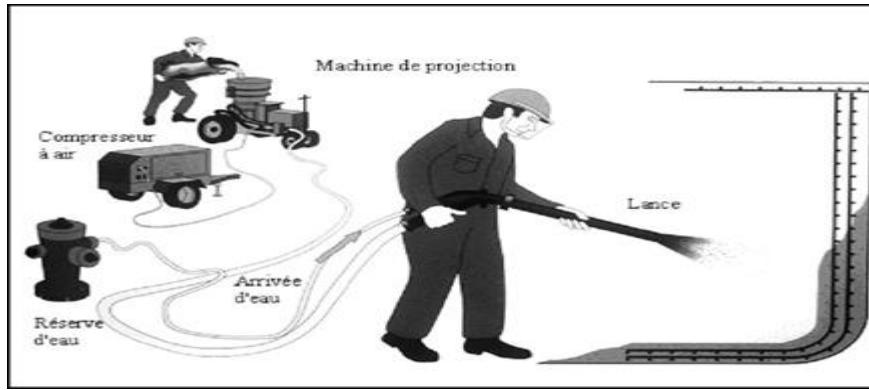


Figure I.21: béton projeté par voie sèche.

I.7.2.2 : Projection par voie humide :

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



Figure I.22: béton projeté par voie humide.

I.7.3 : Renforcement par chemisage en acier :

Ce type de renforcement est utilisé généralement pour les poteaux et moins pour les poutres; l'union de la platine à la structure peut se faire par : Collage, vissage, ou bien ancrage.

Afin d'éviter le glissement, les éléments en acier supplémentaires peuvent être joints au moyen de boulons d'extension ou éléments de fixation spéciaux. En variante, des produits novateurs peuvent être également utilisés, tels que par exemple des résines époxy ou collage par mortier. La section transversale de profilés en acier peut être tout simplement à plat ou en forme diverse, selon les exigences de conception.

Cette technique permet d'améliorer considérablement la résistance, d'où son efficacité a été clairement démontrée, à la fois par les recherches expérimentales et par des observations sur le terrain effectuées durant le séisme de Northridge en 1994. [9]

I.7.4 Renforcement par chemisage en béton armé :

Ce procédé a d'ailleurs longtemps été l'une des techniques de réhabilitation les plus courantes. Il consiste en une augmentation considérable des sections par la mise en œuvre d'un ferrailage additionnel à l'ancien élément et d'un nouveau béton d'enrobage pour favoriser l'accrochage.

Elle est utilisée pour des poutres à âme verticale ; elle permet un enrobage des parties latérales de l'âme et rend ainsi le renfort plus effectif. [10]

I.7.5. Renforcement par la tôle collée :

La technique de tôles collées permet, soit d'accroître la capacité portante d'un ouvrage, soit de renforcer localement une structure présentant des insuffisances de résistance.

Cette technique est applicable aux structures en béton armé et aux zones fonctionnant en béton armé des structures précontraintes. Diverses conditions doivent être réunies pour la bonne réussite d'une opération de renforcement ou de réparation. La surface du béton doit subir, avant tout une préparation soignée (burinage, bouchardage, voire sablage à sec ou humide selon les conditions du chantier) 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 re-profiler la surface qui n'aurait pu efficacement être traitée par les précédentes techniques, en limitant la surface à ragréer à 20% de la surface de collage et en s'assurant qu'il n'y a aucune zone ragréée en extrémité de tôles.

L'acier de renfort est constitué dans la plupart des cas de tôles en aciers E24-2. Dans le cas où il est nécessaire de souder les tôles, on utilise de l'acier E24-3. Ces tôles, ont une épaisseur de 3 à 5 mm. Le choix d'un acier de nuance supérieure ou d'épaisseur plus importante est à déconseiller car il faut que l'acier se plastifie avant son décollement de façon à obtenir une structure ductile et non fragile.

La tôle est collée par l'utilisation d'une résine époxydique sur une épaisseur de l'ordre de millimètre après l'application d'une couche préliminaire d'accrochage sur la surface de béton

. L'inconvénient de cette technique est la corrosion des aciers, et par conséquent la nécessité de leur protection sur leur surface visible. Des techniques ont été développées précédemment par l'utilisation de matériaux plus performants et non vulnérables à la corrosion (non corrosifs), comme les composites à bases de fibres de carbone.

Afin de s'affranchir des difficultés liées à la mise en œuvre des tôles collées, ainsi que la corrosion possible de ces tôles, surtout aux endroits humides, plusieurs groupes d'industriels et de laboratoires ont entrepris des recherches portant sur l'emploi de matériaux composites. [11]



Figure I.23 : plaques d'acier collées.

I.7.6 Renforcement des structures par précontraintes additionnelles :

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

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

Elle peut s'appliquer à tous types de structures existantes en béton armé ou en béton précontraint.

Cette méthode de renforcement bien que très efficace présente quelques difficultés de mise en œuvre. En effet, elle nécessite de dimensionner soigneusement des ancrages et de déterminer le chemin approprié des câbles. Ainsi, des forages à travers certaines parties de la structure existante sont nécessaires. Ces forages doivent être exécutés sans toucher aux différentes armatures existantes.

En fin, il faut prendre toutes les dispositions pour contrôler que la précontrainte additionnelle se répartisse dans la structure et surtout dans les zones fissurées. [12]



Figure I.24: précontrainte additionnelle.

I.7.6.1 Les différents tracés de la précontrainte additionnelle :

- Le tracé rectiligne :
 - Simple, plus pratiques et aussi facile à le mettre en œuvre.
 - Les pertes par frottement sont localisées au niveau des zones d'ancrages.
 - Un câblage rectiligne permet d'améliorer la résistance au cisaillement.

- Le tracé polygonal :
 - Plus efficace que le tracé précédent, il consiste à dévier les câbles.
 - La mise en œuvre est plus compliquée, à cause de la confection des déviateurs, mais c'est la conception la plus courante.
 - Les pertes par frottement sont un peu plus fortes que dans le cas d'un tracé rectiligne. [12]

I.7.7 Renforcement/réparation par matériaux composites :

La plupart des applications à travers le monde de la technique de renforcement par PRF « polymère renforcé de fibres » à structures historiques se trouvent dans de vieux bâtiments de maçonnerie. Cependant, les structures faites de d'autres matériaux aussi, comme le bois et en fonte, ou même vieux béton, ont reçu la mise à niveau à l'aide de PRF.

En général, le technique de renforcement avec des matériaux composites peut être utilisé pour améliorer la ductilité ainsi que la capacité de résistance en flexion et au cisaillement de tous les éléments structurels (poteaux, poutres, dalles, murs porteurs), les éléments du pont (piles, tablier) et dans certains cas, des structures en béton précontraint existants. [13]

Parmi les matériaux composites de renforcement ou de réparation, on peut citer :

- Lamelle de fibres de carbone.
- Lamelle de fibres de verre.
- Tissu de fibres de verre.
- Tissu de fibres de carbone appelé T.F.C.
- Composite de résidus plastiques.



Figure I.25:matériaux composites.

I.8 Les technique nouvelle pour les éléments de structure :

I.8.1 Introduction :

La technologie du renforcement par les polymères renforcés de fibres est l'une des technologies les plus efficaces pour l'accroissement de la résistance des éléments structuraux porteurs. Son application est relativement simple, très peu dérangeante pour les utilisateurs des ouvrages renforcés et peu exigeante en main-d'œuvre. Ainsi, elle représente l'une des solutions de rechange les plus souhaitables en matière d'accroissement de la résistance des ouvrages existants. Les caractéristiques non corrosives des fibres, leur rapport résistance poids élevé et leur résistance à la plupart des substances chimiques donnent à ce système de renforcement une durée de vie bien plus longue que celle des matériaux conventionnels tels que l'acier, c'est à dire une valeur plus économique à long terme

Le principe de renforcement des structures par matériaux composite est de coller des polymères renforcés par des fibres (PRF) d'acier ; verre ou aramide ... etc. à l'interface du

béton tendu par des résines époxy ; Ces PRF sous formes des lamelles ; plats ; barres ou tissus.

Cette méthode de renforcement à plusieurs techniques on va citer les plus utilisées :

■ **EBR** (EXTERNALLY BONDED REINFORCEMENT): Le principe de cette méthode est de collée extérieurement sur la partie tendue du structure la feuille de PRF (lamelle ou tissu)

■ **NSM** (NEAR SURFACE MOUNTED) : Le principe de cette technique est d'insérée des plat ou des barres de PRF dans l'enrobage de la partie tendue de la structure en BA.

■ **SNSM** (SIDE NEAR SURFACE MOUNTED) : Le principe de cette méthode est d'insérée des plats ou des barres de PRF sur les côtés de la partie tendue de la structure en BA. [14]

I.8.2 Renforcement des éléments structuraux au moyen de PRF :

I.8.2.1 Renforcement des poteaux :

L'utilisation d'une enveloppe formée de feuilles de PRF autour de la colonne permet non seulement d'assurer une protection supplémentaire, mais aussi d'améliorer la résistance en compression par l'effet du confinement produit par les fibres du composite en plus d'une augmentation de ductilité très significative comparativement à la colonne sans composite. [15]



Figure I.26:Poteau circulaire en BA confiné par matériaux composites

I.8.2.2 Renforcement des poutres :

On peut effectuer un renforcement en flexion en collant les bandes sur la surface tendue de lapoutre, et le renforcement en cisaillement peut être apporté par le collage des bandes sur lesparois de ces mêmes poutres.



Figure I.27 : poutres en BA renforcées par matériaux composites.

I.8.2.3 Renforcement des dalles :

L'utilisation de composites en bandes peut aussi améliorer la résistance en flexion de dalles en béton armé. [15]



Figure I.28: tablier de pont en BA renforcé par matériaux composites

Chapitre II :

Composites pour génie civil

II -Chapitre 2 : Composites pour génie civil

II.1 Introduction :

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels.

Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de forme. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés. Ils offrent une meilleure isolation thermique, et pour certains d'entre eux une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger les structures et de réaliser des formes complexes aptes à remplir plusieurs fonctions.

Dans chacun des marchés d'application (bâtiment, automobiles, équipements industriels...) ces performances remarquables sont à l'origine de solutions innovantes.

Les matériaux composites offrent aux industriels et aux concepteurs des possibilités nouvelles d'associer fonctions, formes et matériaux au sein de la réalisation. C'est un système de plus en plus performant.

Le poids, la plurifonctionnalité sont autant d'atouts de principes de processus nouveaux de conception, d'industrialisation, qui permettent d'étendre les possibilités techniques et de mieux satisfaire des besoins parfois contradictoires (poids –fonction ...) auxquels les matériaux homogènes classiques répondent difficilement. [16]

II.2 définitions :

Dans un sens large, le mot " composite " signifie, constitué de deux ou plusieurs parties différentes. En fait l'appellation "matériau composite" ou "composite" est utilisée dans un sens beaucoup plus restrictif, qui sera précisé tout au long de ce travail. Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément.

Et dans un sens plus précis, un matériau composite utilisé dans la réparation des structures est par définition, toute matière première comportant un renfort sous forme filamentaire et nécessite l'association intime d'au moins deux composants: le renfort et la matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser, ce qui introduit la notion d'un agent de liaison.

Contrairement aux matériaux classiques dont on connaît à l'avance les caractéristiques mécaniques, celles des composites ne sont réellement connues qu'après fabrication, car on réalise en même temps, le matériau et le produit bien définis.

Actuellement, les composites à matrice organique représentent plus de 99% des matériaux composites; toutefois, il existe également des composites à matrice inorganique (métallique ou céramique) dont la diffusion reste encore marginale. [17]

II.3. Historique :

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

inférieures des tabliers en utilisant des tissus pré-imprégnés à base de fibres de carbone mis en œuvre suivant la méthode de « stratification directe » décrite ci-dessus.

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

- Aux États-Unis : les recherches concernant le renforcement des structures du génie civil par matériaux composites ont été initiées suite au séisme de Loma Prieta (Californie) survenu en octobre 1989. À partir de 1994, des tests sismiques en laboratoire, sur des maquettes d'échelles de plus en plus importantes, ont démontré l'intérêt de l'utilisation des PRF. La validation de la technique de renfort par composites collés a été suivie par le renforcement d'ouvrages réels tels que le Highway Bridge à Butler (Ohio, en 1996), le Great Western Bank Building à Sherman Oaks (Californie, en 1997) ou encore le Foulk Road Bridge à Delaware (Californie, en 1997). [18]

- En Europe : les principales applications en réhabilitation de structures sont apparues en Suisse fin 1991, puis en France à partir de 1996. En 1996, Freyssinet a renforcé le premier pont autoroutier français en remplaçant les plats collés métalliques classiques par des tissus secs et imprégnés sur place par un adhésif spécifique à base de résine époxydes, mis au point par Atofindley, compatible avec le béton et capable d'imprégner les fibres de carbone. Bien qu'initialement utilisés pour des applications en aéronautique, les PRF ont progressivement gagné le domaine du génie civil, et même si la France est loin d'égaliser l'utilisation intensive des PRF au Japon (évaluée actuellement à environ 1 million de m² par an), on estime qu'environ 40 000 m² de renforts en fibres de carbone ont été utilisés, sur le territoire national, pour le renforcement de structures en béton armé en 2007. [18]

- Au Canada :

Au Canada les études ont été menées pour renforcer extérieurement des ponts anciens corrodés ou ne pouvant supporter l'augmentation des surcharges de calcul. Le procédé l'Hermitte devient peu applicable dans ce pays, de fait de la très forte corrosion saline liée aux énormes quantités de sels répandues sur l'ensemble du réseau routier pendant la longue période hivernale. Plusieurs ouvrages ont été renforcés par cette technique, on peut citer ! en 1993, renforcement du pont de Calgary (Alberta) par des câbles de 6 m de long, l'objet de ce travail était essentiellement de contrôler la durabilité d'un tel renforcement ; en 1995, à Sherbrooke, renforcement par fretage à l'aide de tissus de fibres de carbone pré imprégnés de plusieurs colonnes de bâtiment dans l'enceinte de l'université, en 1996, réhabilitation du ponts Clearwater Creek (Alberta) à partir de bandes de tissus de fibres de carbone pré imprégnées ; en 1997, renforcement d'un pont âgé de 27 ans à Winnipeg (Manitoba) par pose de tissus de fibre de carbone. en 1997, dans le centre de Winnipeg (Manitoba), une structure de toiture a été renforcée par le même procédé. Il faut noter que l'utilisation de fibres de carbone en génie

civil représente aux Etats-Unis et au Canada environ 30 tonnes en 1996 et un peu moins de 50 tonnes en 1997. La croissance de ce marché devrait être supérieure à 30% par an pendant les cinq années qui suivent. [18]

●En Algérie :

L'application du procédé de renforcement par matériaux composites a commencé en 1999, dans la réhabilitation de quelques ouvrages d'art tels que le pont routier voûte Sidi Rachad et l'ouvrage rail PK 459 sur oued Bili Braguette (Constantine), avec le partenariat SAPTA Freyssinet- France (fourniture et pose de TEC) d'une part, et la sous-traitance avec SIKA- outre mer d'autre part avec l'application des produits de colmatage et d'injection des fissures sur la maçonnerie et le béton. [19]

II.4. Généralités sur les matériaux composites :

Les matériaux composites appartenant à la famille des Polymères Renforcés de Fibres (PRF) conviennent pour une gamme très étendue d'utilisations dans le domaine de la construction. Ceci s'explique notamment par la diversité des formes dans lesquelles ils peuvent se présenter : feuilles, tissus ou enveloppes préformées, lamelles pultrudées, collés sur les parois extérieures de la structure (moulage au contact), sous forme d'engravure, de profilés structuraux ou encore sous forme de barres pour le renforcement interne du béton.

Dans le secteur du génie civil, deux types de produits de construction en matériaux composites sont principalement utilisés : les tissus (secs ou pré-imprégnés sous forme de feuilles), et les plats (ou lamelles). Les tissus sont collés sur site et polymérisent lors de la mise en œuvre (moulage au contact), alors que les plats sont préfabriqués (pultrusion). Cependant, ces différents types de matériaux composites ont des propriétés mécaniques proches, qui sont notamment gouvernées par le comportement (résistance et rigidité) des fibres. En effet, les PRF associent des fibres de résistance élevée à une matrice polymère qui les lie et dans laquelle elles sont noyées. Ce sont les propriétés propres à ces deux composants qui confèrent au matériau ses propriétés globales. Ces propriétés dépendent de la fraction volumique de fibres, de leur orientation, du type de matrice utilisé, ou encore de la méthode de fabrication. Par exemple, la pultrusion permet d'introduire un pourcentage plus important de fibres, et donc d'augmenter la rigidité et la résistance du PRF. [20]

Dans le secteur du génie civil, deux types de produits de construction en matériaux composites sont principalement utilisés : les tissus (secs ou pré-imprégnés sous forme de feuilles), et les plats (ou lamelles). Les tissus sont collés sur site et polymérisent lors de la mise en œuvre (moulage au contact), alors que les plats sont préfabriqués (pultrusion). Cependant, ces différents types de matériaux composites ont des propriétés mécaniques proches, qui sont notamment gouvernées par le comportement (résistance et rigidité) des fibres. En effet, les PRF associent des fibres de résistance élevée à une matrice polymère qui les lie et dans laquelle elles sont noyées. Ce sont les propriétés propres à ces deux composants qui confèrent au matériau ses propriétés globales. Ces propriétés dépendent de la fraction volumique de fibres, de leur orientation, du type de matrice utilisé, ou encore de la méthode de fabrication. Par exemple, la pultrusion permet d'introduire un pourcentage plus important de fibres, et donc d'augmenter la rigidité et la résistance du PRF.

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

	Module D'Young (GPA)	Résistance à la traction (MPa)	Allongement a la rupture (%)	Densité (g/cm ³)
Fibre de verre E	70-80	2000-3500	3.5-4.5	2.5-2.6
Fibre verre C	85-90	3500-4800	4.5-5.5	2.46-2.49
Fibre carbone HM	390-760	2400-3400	0.5-0.8	1.85-1.89
Fibre carbone HR	240-280	4100-5100	1.6-1.73	1.75
Fibre aramide	62-180	3600-3800	1.9-5.5	1.44-1.47

Tableau II.1 : caractéristique mécanique des quelques fibres

Même si ce sont les fibres qui confèrent au PRF sa résistance et sa rigidité, la matrice joue néanmoins plusieurs rôles essentiels au bon fonctionnement du PRF : elle lie les fibres ensemble tout en les répartissant sur l'ensemble du volume du composite, elle les protège d'un environnement parfois agressif, et permet de transférer les efforts entre les différentes fibres. Un des principaux avantages des PRF réside dans leur très faible poids, la masse volumique de la matrice doit être minimisée et être inférieure à celle des fibres. Les polymères les plus utilisés sont les polyesters, en raison de leur faible coût et de leur facilité de fabrication. Les vinylesters, d'un coût plus élevé que les polyesters, sont très résistants aux acides et aux alcalins et sont donc particulièrement adaptés pour protéger les fibres de verre du milieu cimentaire en évitant les réactions acide-base (de type réaction alcali-silice) qui les détérioreraient. Les vinylesters sont donc employés pour la fabrication des barres d'armatures composites internes de certaines structures en béton. Enfin les matrices époxydes présentent de très bonnes qualités d'adhérence et sont donc largement employées lors de l'imprégnation sur place des feuilles de PRF (technique dite du moulage au contact). Elles ont cependant un coût encore supérieur au coût des vinylesters. Finalement, les Polymères Renforcés de Fibres de Carbone (PRFC) étant les plus couramment utilisés en renfort structurel. [22]

II.5 Les composites intelligents :

II.5.1 Les fibres :

Les fibres couramment utilisées dans les matériaux composites sont les fibres de verre, de carbone et d'aramide. Leur géométrie monodimensionnelle unique, en plus d'être particulièrement adaptées à la réalisation du composite, procurent aux joncs et lamelles en PRF une rigidité et une résistance plus grandes que les PRF en formes tridimensionnelles.

Cela est dû à la faible densité, par défauts, dans les configurations monodimensionnelles par opposition aux membres trois-dimensionnelles

II.5.2 Les différents types de fibres :

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

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

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

a-fibre de carbone :

Ce sont les plus utilisées pour les composites, les étapes successives de leur fabrication sont :

L'oxydation (250-400 °C):

La carbonatation (600 - 1300 °C), qui permet l'obtention de fibres de haute résistance (a la traction);

La graphitisation (>1800°C) qui permet l'obtention de fibres à haut module (pour la flexion), le premier fibre de carbone a été inventée et produite par T. Edison (en utilisant la pyrolyse des fibres de bambou pour leur usage dans une lampe à incandescence).

Les premières utilisations expérimentales datent des années 60 et les premières unités industrielles ne sont apparues qu'au début des années 70. Les fibres de carbone bénéficient de caractéristiques sans équivalent et de propriétés physiques très étendues résistance et haut module d'élasticité en traction longitudinale:

- Grande résistance à la fatigue et à la déformation
- Faible masse volumique
- Grande résistance à l'usure,

- Absorption des vibrations;
- Grande stabilité dimensionnelle:
- Grande stabilité thermique (les fibres de carbone sont pratiquement incombustibles):
- Bonnes conductivités thermiques et électriques,
- Grande résistance à la corrosion vis-à-vis des acides, bases, sels et des produits organiques,
- Transparence aux rayons X. [23]

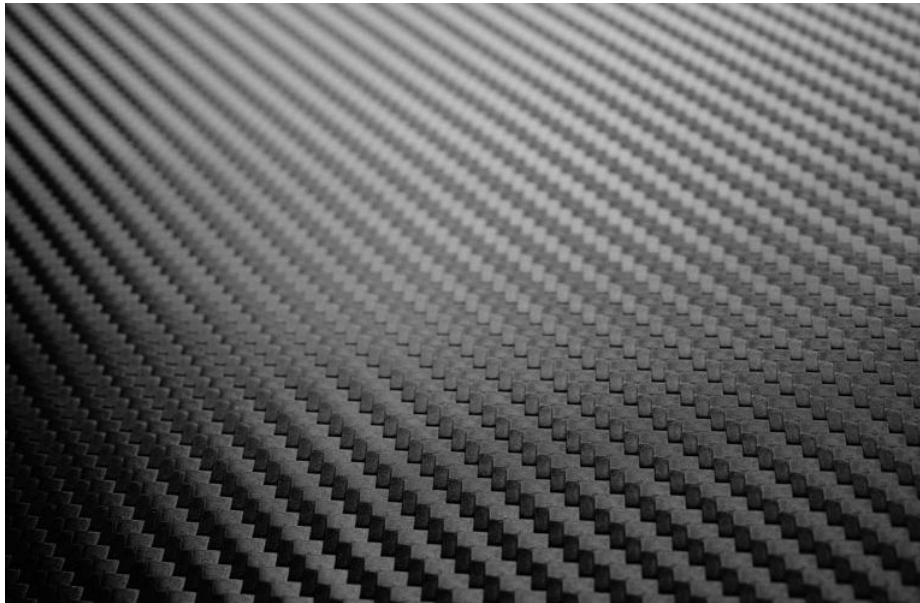


Figure II.1 : tissu de fibre de carbone

b. Fibres de verre :

Les fibres de verre sont élaborées à partir d'un verre fondu appelé verre textile, composé de silice (SiO₂), alumine (Al₂O₃), chaux (CaO), magnésium (MgO), etc. Ces produits peu coûteux, associés à des procédés assez simples d'élaboration, confèrent aux fibres de verre un excellent renfort qui les place de loin au premier rang des renforts

Les fibres de verre présentent plusieurs avantages :

- rapport performance mécanique/prix,
- bonne performance spécifique (pour verre R),
- bonne adhérence avec toutes les résines (existence d'ensimages);
- tenue température élevée (50% de la résistance conservée à 350°C).
- dilatation et conductivité thermique faibles,
- bonnes propriétés diélectriques.



Figure II.2 : fibre de verre

c. Fibres d'aramide :

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

Ces fibres présentent les avantages suivants:

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

Mais aussi les inconvénients :

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

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

- bas module (70GPa) utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles.
- Haut module (130Gpa) utilisées pour les composites HIP.



Figure II.3 : fibre d'aramide

d. Fibres diverses :

Si les fibres citées sont les plus utilisées, il existe néanmoins d'autres types de fibres renfort. On peut citer :

- Les fibres à bases de bore, carbure de bore et carbure de silicium :

Elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur âme en tungstène portée à 1200°C qui sert de substrat. On obtient des fibres de 100 à 150 microns de diamètre (ce qui est supérieur au diamètre des autres fibres) mais leur prix est élevé et elles sont difficiles à mettre en œuvre (fragilité, usinage difficile, manipulations dangereuses). [24]

- Les fibres à bases de silice ou de quartz :

Elles sont obtenues par fusion et utilisées surtout dans des composés à haute tenue thermique (bonnes propriétés d'ablation avec les résines phénoliques).

- Les fibres de polyamide ou de polyester :

Elles sont utilisées parfois comme fibres de renfort dans des structures peu sollicitées.

- Le polyéthylène :

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

II.5.3 Les Matrice :

La matrice composée elle-même d'une résine (polyester, époxy etc.) , et de charges dont le but est d'améliorer les caractéristiques de cette résine tout en diminuant le coût de production. D'un point de vue mécanique l'ensemble résine-charges se comporte comme un matériau homogène et le composite est constitué de ce matériau homogène (la matrice) et d'un renfort. Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques élevées, alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis –vis des agressions extérieures.[25]

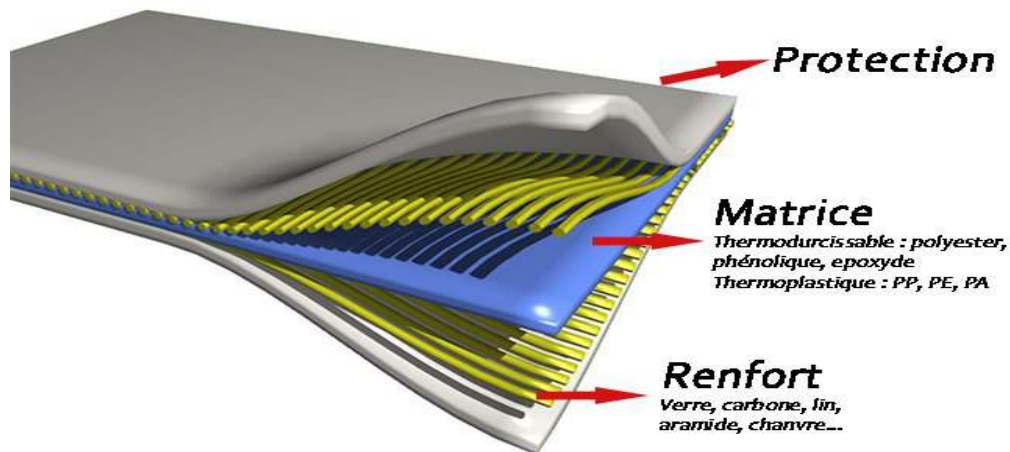


Figure II.4 : le rôle de la matrice

II.5.3.1. Les résines :

II.5.3.1.1 Différents types de résines :

Les résines utilisées dans les matériaux composites ont pour rôle de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de les protéger de l'environnement extérieur, les résines doivent donc être assez déformables et présentent une bonne compatibilité avec les fibres. En outre elles doivent avoir une masse volumique, et des caractéristiques mécaniques spécifique élevées.

Compte tenu des contraintes, les résines utilisées sont des polymères modifiés par différents adjuvant et additifs (agents de démoulage stabilisant etc.), les résines sont livrées en solution sous forme de polymères en suspension dans des solvants. Deux grandes familles de résines polymères existent: les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables.

Ces deux types de résines possèdent, la faculté de pouvoir être moulés ou mises en forme pour donner, soit un produit fini soit un produit semi-fini dont la forme peut être modifiée. [26]

a- Les résines thermodurcissables (TD) :

Sont associées à des fibres longues, leur structure a la forme d'un réseau tridimensionnel qui se pontent (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme, de façon définitive lors d'un chauffage (la transformation est donc irréversible). Ces résines conduisent à une structure géométrique qui ne peut être détruite que par un apport important d'énergie thermique, ainsi elles possèdent des propriétés mécaniques et surtout thermomécaniques plus élevées que les résines thermoplastiques.

Du fait de ces caractéristiques plus élevées, les résines thermodurcissables sont les plus employées actuellement dans la mise en œuvre des matériaux composites, parmi ceux qui sont les plus utilisées : [27]

●les résines polyesters insaturés:

C'est la résine la plus utilisée dans les composites de grande application. Elles passent successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible. La réaction du durcissement dépend de la réactivité de la résine, et de la forme de l'objet fabriqué (épaisseur, etc.).

Suivant leur module d'élasticité, les résines polyesters sont classés en: résines souples, résines semi-rigides et résines rigides.

Les résines habituellement utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont de type rigide,

Leurs avantages sont:

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

Et leurs inconvénients sont:

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

● **Les époxydes:**

Ce sont les plus utilisés après les résines polyesters insaturées, du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, ces résines époxydes sont généralement utilisés sans charges ou additifs, ce sont des matrices de composites à haute performance (la construction aéronautique spatial, missiles, etc.).

Toutefois pour bénéficier réellement de ces performances, il est nécessaire d'avoir des durées de transformation et surtout de recuisons très longues, correspondant à des températures relativement élevées de l'ordre de 100°C.

• **ses avantages sont :**

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

• **ses inconvénients:**

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

● **les résines vinylesters:**

Elles sont considérées comme des variantes de polyesters, qui se produisent à partir d'acideacryliques, elles possèdent une bonne résistance à la fatigue et un excellent comportement à lacorrosion, mais demeurent combustibles.

● **les résines phénoliques:**

Elles se caractérisent par une bonne tenue au feu sans fumée, elles restent fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à colorer et mettre en œuvre.

● **les résines polyuréthannes et polyurées :**

Dans la fabrication des pièces composites, il est utilisé surtout des formules, dont la faible viscosité permet un bon remplissage du moule, les constituants sont livrés à l'état de pré polymères liquides.

● **Poly-imides :**

Ces résines sont surtout utilisées dans les composites à haute performance pour leurs stabilités à haute température (de l'ordre de 250°C), elles restent toutefois difficiles à mettre en œuvre, utilisées essentiellement dans les pièces de structure pour les réacteurs.

● **Bismaléimides :**

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

b- les résines thermoplastiques (TP):

La famille des résines thermoplastiques est très vaste, et peut être séparée en plastique de grande diffusion et plastique technique. Les plastiques de grande diffusion sont mises en œuvre par injection pour obtenir des objets moulés, soit par extension pour obtenir des films, des plaques, des tubes, des profilés, etc.

Les plastiques sont généralement mis en œuvre par injection.

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

La structure de ces résines a la forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour mettre en forme (les chaînes se plient) et les refroidir pour les fixer.

Les principales résines thermoplastiques utilisées sont les suivants:

- polyamide: une bonne tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures.
- polytéraphthalate éthylénique et butylique: bonne rigidité.
- polycarbonate: une bonne tenue au choc.
- polysulfures de phénylène: une résistance à l'hydrolyse.
- polyoxyméthylènes: une bonne tenue à la fatigue.
- polysulfurés: une bonne stabilité chimique.
- polypropylène: assez stable en température, mais combustible.

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

Ces diverses résines peuvent être renforcées par des fibres courtes, cependant dans le domaine des composites ces résines ont un développement limité du fait de la nécessité de faire appel à des transformations à haute température de produits solides. [27]

II.5.3.2 Les charges et additifs :

Il est désigné sous le nom général de charge ou additif toute substance inerte, minérale, ou végétale qui incorporée à la résine, permet de modifier de manière sensible les propriétés

mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface, de réduire le prix de revient du matériau transformé ou de faciliter la mise en œuvre du matériau composite. À l'inverse des matrices thermoplastiques (TP), les matrices thermodurcissables (TD) contiennent toujours des charges de nature et de forme variées, à des taux souvent élevés pouvant atteindre 60% en termes de masse. [28]

Pour une résine donnée, le choix des charges ou des additifs est déterminé en fonction des modifications recherchées, d'une manière générale ce choix devra satisfaire un certain nombre d'exigences:

- compatibilité avec la résine de base.
- uniformité de qualité et de granulométrie.
- faible action abrasive.
- bas prix de revient. [29]

a- les charges:

Il y a plusieurs types de charges:

•les charges organiques:

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

•les charges minérales:

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

•Oxydes et hydrates métalliques:

•Poudre et micro sphères:

L'alumine, les oxydes de zinc, de magnésium et de titane sont utilisés sous forme de poudre fine.

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

•Alumine et tri hydrate d'aluminium:

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

• Trioxyde d'antimonié :

Il apporte aux résines une coloration blanche.

• Les céramiques:

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

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

•Le verre:

- poudres de verre : Une nouvelle variété de poudre de verre de granulométrie de 13 µm, son incorporation confère aux thermodurcissables une meilleure résistance à l'abrasion et à la compression, elle permet par ailleurs d'obtenir un retrait plus faible et plus homogène des pièces mouillées.

- billes de verre creuses: Sont obtenues par chauffage de billes de verre contenant un agent de gonflement, elles améliorent la résistance à la pénétration de l'eau et au vieillissement
- microsphères de verre: l'utilisation de microsphères de verre permet de réduire de 25 à 35% la masse des pièces obtenues (destinées à l'industrie d'automobiles)

•Le carbone:

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

b- Les Additifs:

Les additifs se trouvent en faible quantité, quelques pourcentages de moins, par contre les charges peuvent atteindre des dizaines de pourcentage et interviennent comme étant:

• **Lubrifiants et agents de démoulage:**

Ces agents ont pour objet de faciliter le façonnage de la résine et de réduire la tendance de la résine à adhérer aux moules.

• **pigments et colorants:**

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

A partir de ces pigments, il est également possible d'obtenir des pâtes colorantes, constitué de dispersions de pigment dans une pâte de manière à avoir une utilisation aisée.

Les colorants sont des composés organiques solubles dans l'eau ou dans un solvant organique, leur emploi est généralement limité, à savoir sa mauvaise tenue chimique et thermique.

Le choix de ces agents est fonction de sa compatibilité avec la résine du composite et de l'utilisation du matériau composite.

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

Ces agents peuvent aboutir à un mauvais état de surface, un gauchissement ou des microfissurations de la pièce moulée, bien que l'incorporation des charges à la résine en limite le retrait; il est souvent nécessaire d'ajouter des produits spécifiques anti- retrait (additif appelé "lowshrink") qui diminuent ou annulent le phénomène de retrait. Ces produits améliorent également l'écoulement de la matière dans certaines techniques de moulage.

Ces agents anti-retrait sont généralement des produits à base de thermoplastiques ou d'élastomères, se présentent sous forme de poudre ou de solution.

• **Agents anti- ultraviolets:**

Les agents anti-ultraviolets ont pour fonction de protéger les résines des rayons ultraviolets.

Le principe de ces agents est d'absorber le rayonnement ultraviolet et éviter ainsi la détérioration prématurée de la résine par rupture de liaisons atomiques ou par passage à un état excité qui favorise l'oxydation. [30]

II.6 les techniques de mise en œuvre :

Il existe différentes techniques de mise en œuvre des renforts en matériaux composites sur un substrat béton :

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

chauffante est ensuite appliquée sur la surface des tissus et une enveloppe étanche, raccordée à une pompe à vide, permet d'appliquer une pression externe pendant toute la durée de polymérisation ou de polycondensation.

- Mise en œuvre par stratification directe (ou moulage au contact): Cette fois la polymérisation se fait à température ambiante (le renfort atteint sa résistance totale au bout d'une semaine) selon les étapes suivantes : - préparation de surface du béton - (éventuellement) application d'une couche primaire d'imprégnation - dépose des tissus (aux dimensions voulues) - imprégnation et marouflage des renforts - (éventuellement) application d'une couche de protection
- Collage de plaques composites (technique dite du double encollage):

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

- traitement de surface du substrat béton par sablage, par eau ou sous pression et meulage - nettoyage de la surface traitée par un dépoussiérage
- application d'une couche du polymère époxyde (colle) sur la surface nettoyée.
- nettoyage à l'acétone de la surface du plat à encoller
- application d'une couche du polymère époxyde (colle) sur le plat composite
- mise en pression du plat sur le support béton (recouvert de la première couche du polymère époxyde) et retrait de l'excédent de colle
- mise en pression du joint collé par marouflage du plat, permettant d'enlever les éventuelles bulles d'air et assurer ainsi une bonne adhérence. [31]

Chapitre III :
Méthode des Eléments Finis ET
Choix de Logiciel

III-Chapitre 3 : Méthode des Éléments Finis et Choix de Logiciel :

III.1 – Méthode des éléments finis :

III.1.1 Introduction

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 initiale 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 [34].

III.1.2 Principes de la méthode des éléments finis :

La MEF est basée sur une idée simple : subdiviser (discrétiser) une forme complexe en un grand nombre de sous domaines élémentaires de forme géométrique simple (éléments finis) interconnectés en des points appelés nœuds. Nous considérons le comportement mécanique de chaque élément séparément, puis nous assemblons ces éléments de telle façon que l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements soient satisfaits en chaque nœud.

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.

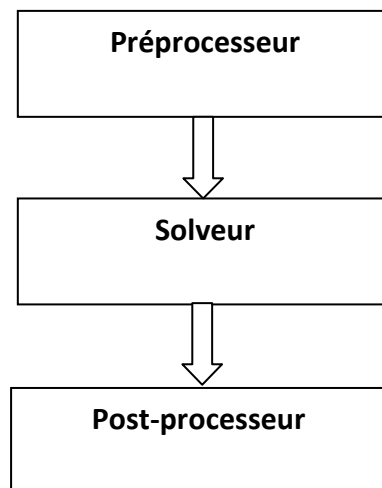
La solution trouvée, il reste cependant à déterminer les caractéristiques de la méthode ainsi développée, notamment l'unicité de l'éventuelle solution ou encore la stabilité numérique du schéma de résolution. Il est essentiel de trouver une estimation juste de l'erreur liée à la discrétisation et montrer 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 EDP linéaire avec opérateur symétrique (comme l'est l'opérateur laplacien), il s'agit finalement de résoudre une équation algébrique linéaire, inversible dans le meilleur des cas.

III.1.3 Étapes du calcul de la MEF :

III.1.3.1 Étapes logiques du calcul par éléments finis :

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



- 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, $\epsilon...$).

- Post-processeur :

- Présenter les résultats de façon intelligible et synthétique
 - Sous forme numérique
 - Sous forme graphique
- Effectuer des fonctions complémentaires : combinaisons, interprétations
Interpolations, animation. [35]

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

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

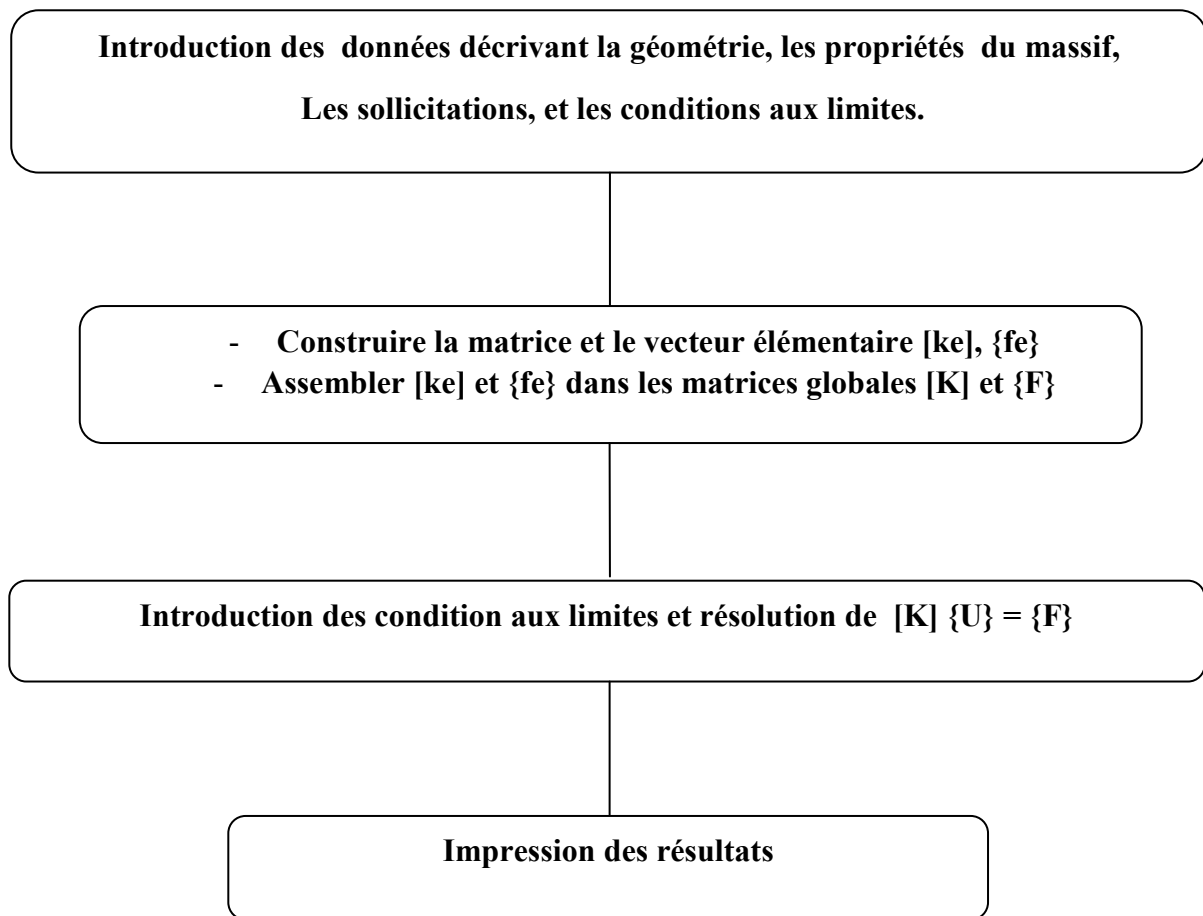


Tableau III-1: Organigramme d'étapes caractéristiques d'un programme d'éléments finis.

III.2- Principaux produits Ansys

III.2.1-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.2.2-ANSYS Mechanical :

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

III.2.3-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 (pré-mélangé et non pré-mélangé), transport de particules, écoulements en milieux poreux, maillages mobiles et dynamiques avec reconstruction du maillage, entre autres. Les schémas numériques temporels et spatiaux peuvent être modifiés pour améliorer la convergence. Fluent est parallélisé et permet de tirer parti de systèmes multiprocesseurs aussi bien au sein d'une seule machine qu'en réseau (cluster, dualcore, plateforme multi-CPU).

III.2.4-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.2.5-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.2.6-ANSYS Electromagnétiques et Ansoft :

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

III.2.7-ANSYS Multiphysics :

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

III.3-Environnements logiciels :

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

III.3.1-ANSYS 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 Paramétrique Design Language). ANSYS classic est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.

III.3.2-ANSYS Workbench :

Cette plate-forme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en réutilisant le code ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièces) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul. Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. La 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.4- Logiciel ANSYS

III.4.1- Analyse structurelle :

Le logiciel d'analyse structurelle d'Ansys vous permet de résoudre des problèmes techniques structurels complexes et de prendre plus rapidement de meilleures décisions en termes de conception. Grâce aux solveurs d'analyse par éléments finis (FiniteElementAnalysis, FEA) disponibles dans la suite logicielle, vous pouvez personnaliser et automatiser les solutions pour vos problèmes de mécanique structurelle ainsi que les paramètres d'analyse de scénarios de conception. Vous pouvez aussi facilement les connecter à d'autres outils d'analyse physique afin de gagner en fidélité. Le logiciel d'analyse structurelle d'Ansys est utilisé dans de nombreuses industries et permet aux ingénieurs d'optimiser la conception de leurs produits et de réduire le coût des tests physiques [36].

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 Matériel Designer (Concepteur de matériaux) dans Mechanical pour créer des éléments de volumes élémentaires représentatifs (RVE). Les modèles soumis à une grande déformation ne doivent pas être simplifiés en passant inutilement à des solveurs explicites. La capacité adaptative non linéaire (NLAD) gère automatiquement les simulations difficiles grâce au remaillage de la solution au cours du processus. La technologie de fracture SMART « splitting morphing adaptive remeshing technique », technologie de séparation, morphing, adaptation et remaillage) a été ajoutée à Mechanical pour la modélisation de la propagation des fissures dans les structures où la fracture est une préoccupation, de façon à éliminer les processus de maillage complexe et les suppositions. Ansys Motion est une solution de conception de nouvelle génération basée sur une dynamique multi corps flexible présente dans l'interface de Mechanical. Elle permet une analyse rapide et précise de corps flexibles et rigides au sein d'un solveur unique [36].

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'AnsysAutodyn et Ansys LS-DYNA, vous permet d'effectuer des simulations de chute, de choc et d'explosion. Ansys AQWA, avec les capacités de simulation offshore présentes dans Mechanical, fournit des capacités spécifiques à l'industrie pour les ingénieurs évoluant dans la conception d'environnements marins [36].

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, finitélémentanalyses)
- ❖ Optimisation 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 [38].

III.4.2- 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 AnsysMinerva. Cette plateforme de pointe stimule la collaboration au sein des équipes de conception mondiales et augmente le partage de données pour innover dans la conception des produits et réduire les coûts de développement [38].

Ansys 2020 R1 comprend des améliorations à AnsysMechanical pour aider les ingénieurs à concevoir des modèles complexes, fortement non linéaires et extrêmement volumineux. Cette version propose également une chaîne de simulation considérablement simplifiée dans Ansys Fluent, de sorte que même les ingénieurs débutants peuvent exécuter des simulations multi phases complexes avec rapidité et aisance. Les autres versions du portfolio comprennent de nouveaux outils dynamiques pour Ansys HFSS SBR + et Ansys Maxwell qui améliorent considérablement les processus de conception électronique / électromagnétique [38].

a/ Version étudiants :

Ansys fournit des produits logiciels gratuits pour les étudiants, parfaits pour le travail effectué en dehors de la salle de classe, comme les devoirs, les projets clés, les concours étudiants et plus encore. Nos produits renouvelables peuvent être téléchargés par des étudiants du monde entier. Les produits Ansys étudiant peuvent être installés sur toute machine MS Windows 64 bits prise en charge. En savoir plus sur Découvre la vie d'étudiant, Ansys AIM étudiant et Ansys étudiant pour pouvoir les télécharger dès aujourd'hui [39].

b/ 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

III.5-Ansys Mechanical APDL:

III.5.1-Introduction:

Les solveurs par éléments finis Ansys offrent une gamme et une profondeur de capacités inégalées par quiconque dans le monde de la simulation assistée par ordinateur. L'électromagnétisme thermique, structurel, acoustique, piézoélectrique, électrostatique et couplé en circuit n'est qu'un exemple de ce qui peut être simulé. Quel que soit le type de simulation, chaque modèle est représenté par un langage de script puissant... le AnsysParametric Design Language (APDL). APDL est le fondement de toutes les fonctionnalités sophistiquées, dont beaucoup ne sont pas exposées dans l'interface utilisateur de WorkbenchMechanical. Il offre également de nombreuses commodités telles que le paramétrage, les macros, les branchements et les boucles et les opérations mathématiques complexes. Tous ces avantages sont accessibles dans l'interface utilisateur AnsysMechanical APDL [37].

III.5.2- Analyse MEF par AnsysMechanical APDL :

L'ANSYS Mechanical APDL destiné pour l'analyse par éléments finis fournit une introduction pratique à l'analyse technique à l'aide de l'un des programmes à éléments finis à usage général les plus puissants du marché. Les étudiants trouveront une approche pratique et intégrée qui combine la théorie des éléments finis avec les meilleures pratiques pour développer, vérifier, valider et interpréter les résultats des modèles d'éléments finis, tandis que les professionnels de l'ingénierie apprécieront la compréhension approfondie présentée sur la structure et le comportement du programme. Les sujets supplémentaires couverts incluent une introduction aux commandes, aux fichiers d'entrée, au traitement par lots et à d'autres fonctionnalités avancées d'ANSYS [40].

III.5.3-L'avantage de choisir APDL

Naviguez confortablement dans l'interface utilisateur Mechanical APDL et appliquez un flux de travail éprouvé pour créer, résoudre et post-traiter des modèles d'éléments finis 2D et 3D.

Les avantages d'utiliser le produit APDL par rapport au autre produit come Workbench sont les suivant :

- ❖ -Importez et / ou créez une géométrie selon les besoins pour la création de leur modèle de simulation.
- ❖ -Utilisez la logique de sélection pour opérer efficacement sur les sous-régions d'un modèle pour le maillage, le chargement et le post-traitement.

- ❖ -Comprendre le concept d'attributs d'élément et l'appliquer à la création de maillages efficaces et efficaces à l'aide de poutres, de coques et d'éléments solides.
- ❖ -Créez des interactions complexes entre les régions du modèle grâce au contact, au couplage, aux équations de contrainte et aux interfaces boulon / joint.
- ❖ -Mettre en œuvre des solutions de champ couplé en utilisant des éléments d'écoulement de fluide 1-D et des éléments solides 2-D et 3-D.

III.6.Conclusion

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

Chapitre IV:
Analyse Numérique et cas d'étude

ChapitreIV: Analyse Numérique et cas d'étude

IV.1 – Introduction

Dans cette étude deux différents modèles ont été créés afin d'étudier le comportement d'un châteaux d'eau de béton renforcé avec matériaux composite intelligent (sika wrap) .

a) Modélisation de châteaux d'eau sans renforcement.

b) Modélisation de châteaux d'eau avec sika wrap.

IV.2- Description du cas d'étude :

Le château d'eau est situé dans la wilaya de Tipasa, distante de 75Km à l'ouest d'Alger, se localisant dans la zone III caractérisée par des fortes activités sismiques, il a été construite en 2006 avec une capacité de 300 mètre cubes.



Figure IV.1 : châteaux d'eau

IV.3- Géométrie des éléments de l'ouvrage :

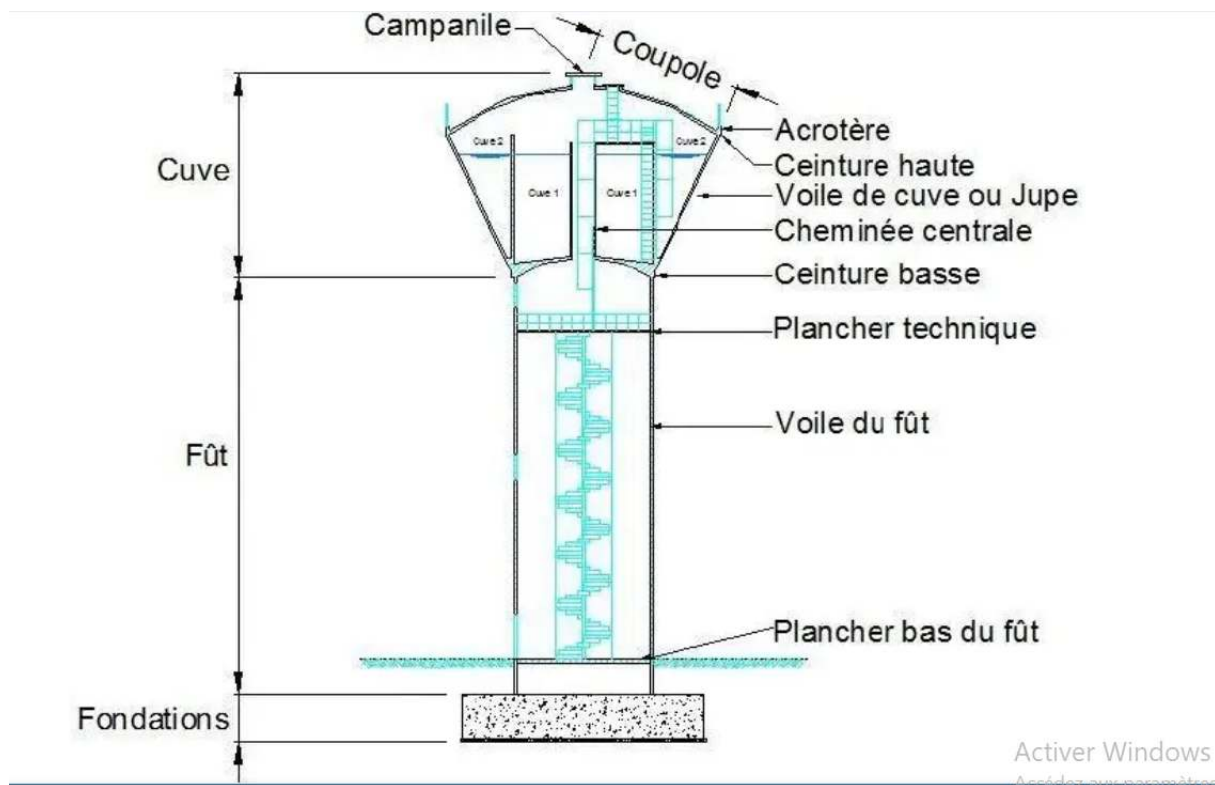


Figure IV.2 : détail de châteaux d'eau

• les caractéristiques géométriques sont :

- Hauteur totale du château d'eau : 31.9m
- Volume de stockage : 300m³
- Diamètre de la cuve : 16.2m
- Diamètre de support cylindrique : 4.60m
- Hauteur de support cylindrique : 27m

IV.4- Propriétés des matériaux

IV.4.1- 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 .

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

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

Pour les deux modèles (modélisation de châteaux d'eau sans renforcement , modélisation de châteaux d'eau par matériaux composites traditionnels ,les propriétés du béton sont identique et sont les suivantes :

Module d'élasticité (E_c)	25000MPa
Coefficient de poisson (ν)	0.2
Densité (δ)	2500 kg/m ³

Tableau IV.1: Propriétés de Béton armé

IV.4.2 Les composites /

IV.4.2.1 Les tissus SikaWrap -600 C :

Est un tissu de renforcement de structures, à base de fibres de carbone assemblées de façon unidirectionnelle, applicable sur le support après imprégnation préalable. (Application dite « humide »).

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, applicable après imprégnation préalable du support et du tissu application dite « par voie humide» [41].

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

Tableau IV.2: Propriétés de SikaWrap -600 C

IV.4.2.2-Renforcement par lamelle :

Le renforcement en flexion d'éléments d'ouvrages par PRFC est réalisé en collant des lamelles Sika CarboDur en surface des zones tendues du béton armé [82], c'est pour ça dans notre cas nous utilisant lamelle Sika CarboDur.

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. Contrairement aux tissus que l'on imprègne sur chantier, les conditions de fabrication des lamelles sont strictement contrôlées ce qui permet de garantir les caractéristiques du renfort PRFC. Contrôle de production : chaque lot de produits finis (env. 3000 m) est contrôlé en ce qui concerne le module d'élasticité, la résistance en traction, l'allongement à rupture. La largeur et l'épaisseur des lamelles sont contrôlées sur chaque rouleau de 250 m.

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

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

Tableau IV.3: Propriétés de CarboDur S1512

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.

❖ **Matériaux composites traditionnels :**

Les propriétés du colle époxydique Sikadur-30 pour le cas du modélisation de pont par matériaux composites traditionnels sont les suivantes :

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

Tableau IV.4: Propriétés de la résine Sikadur-30

IV.4.2.3-Renforcement par tissu :

Les tissus de la gamme SikaWrap sont principalement utilisés en tant que renfort d'éléments de structures travaillant à l'effort tranchant (poutres), à la compression (confinement de poteau). Ils peuvent aussi être utilisés en tant que renfort d'éléments de structures travaillant en flexion (dalles, poutres).

Les tissus SikaWrap -600C :

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 tissuapplication dite « par voie humide»

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

Tableau IV.5: Propriétés de SikaWrap -600 C

b) Colle époxydique Sikadur-300 :

Le Sikadur-300 est la résine d'imprégnation du tissu SikaWrap-600 C et le primaire pour le support.

❖ **Matériaux composites traditionnels** Les propriétés du colle époxydique Sikadur-300 pour le cas du modélisation de pont par matériaux composites traditionnels sont les suivantes :

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

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

IV.5 : Modalisation de châteaux d'eau sur logiciel ansys :

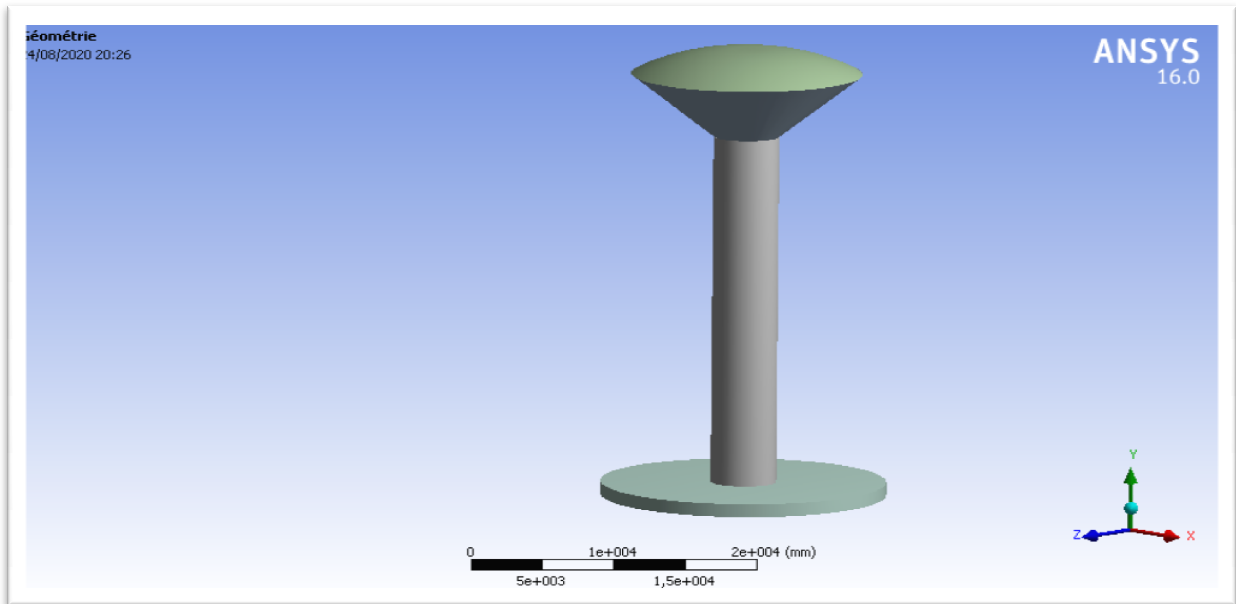


Figure IV.3:vue sur la modélisation châteaux d'eau

IV.6. Maillage :

Le maillage est une méthode pour diviser l'élément en question en particules élémentaires ayant les mêmes propriétés et examiner chaque particule séparément, l'assemblage des particules élémentaires nous ramène à l'élément initial. Dans ce modèle on a utilisé pour le maillage (discrétisation de l'élément).

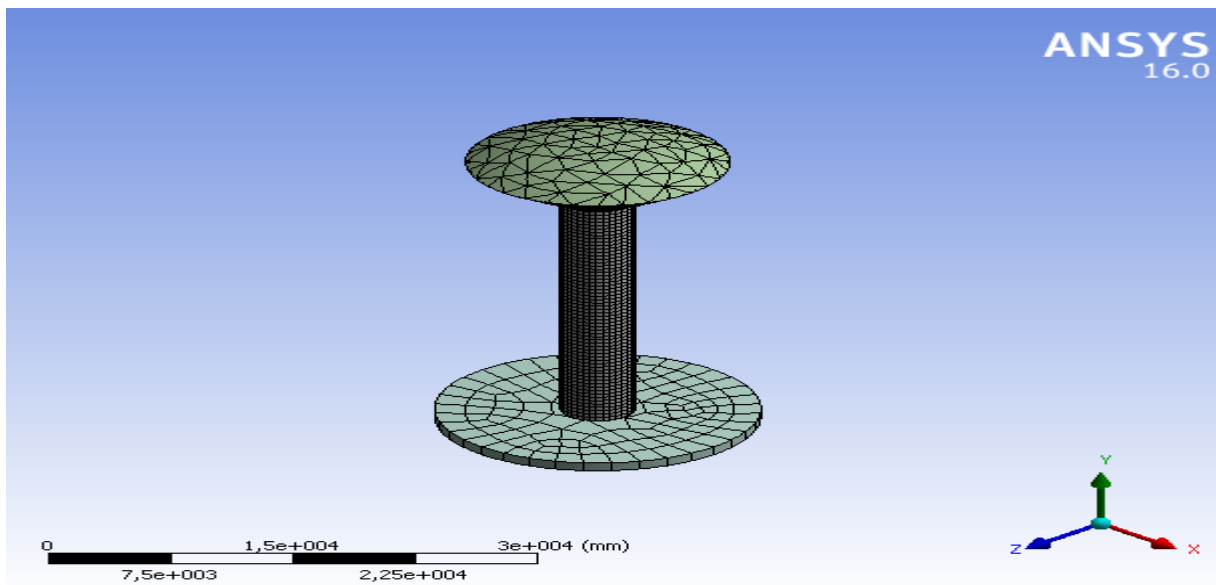


Figure IV.4 : maillage

IV.7. Application de sika wrap :

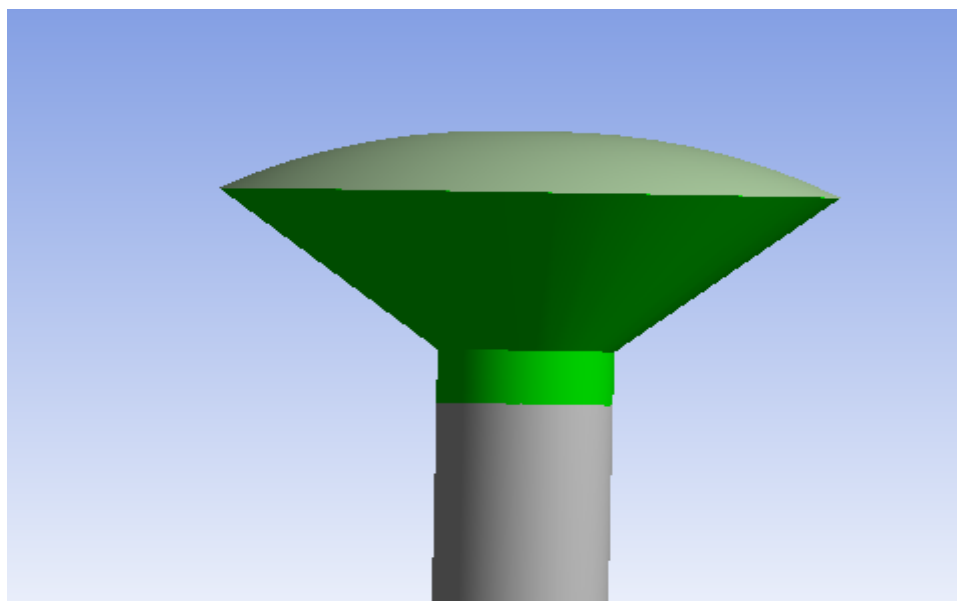
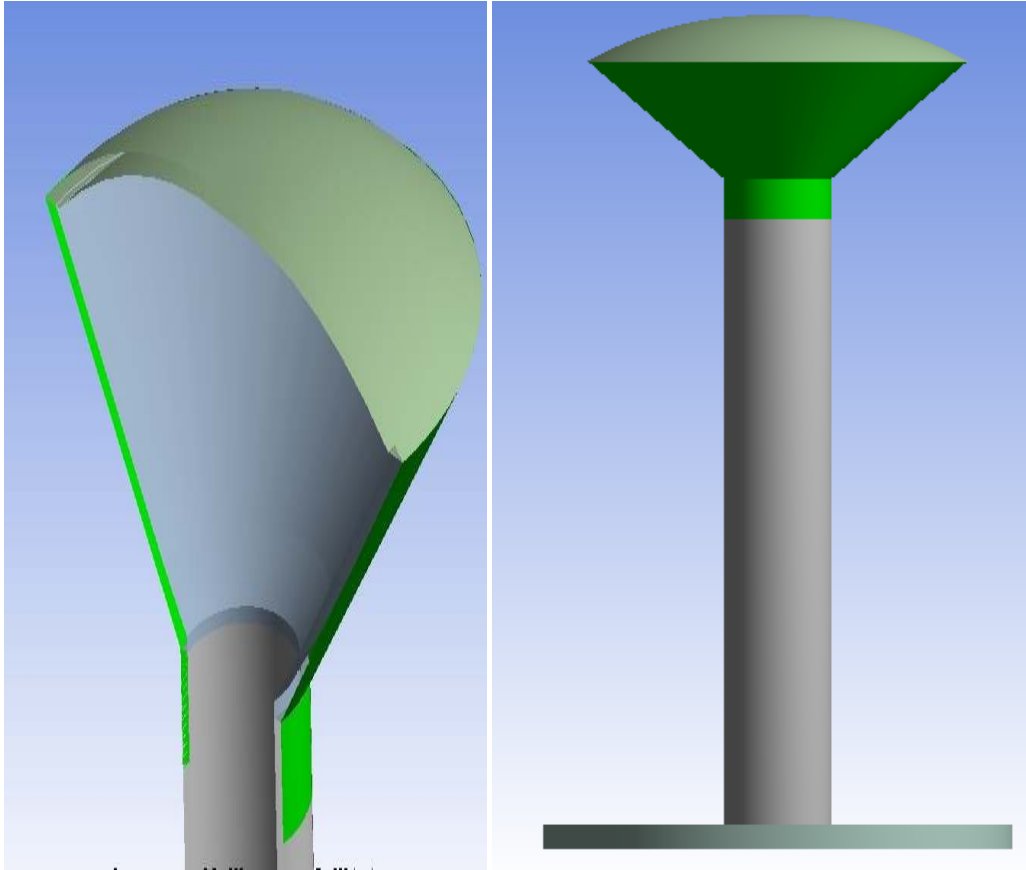


Figure IV.5 : Vue sur L'application des composite



FigureIV.6 : vue sur la couche de sikaWarp600-c

Chapitre V :
Résultat et discussion

Chapitre V : Résultat et discussion

V.1. Introduction :

Une analyse modale permet de déterminer les vibrations caractéristiques (modes et fréquences de résonance) d'une structure ou d'un composant d'une machine. Il s'agit de paramètres importants à considérer pour le design d'une structure soumise à des chargements dynamiques, et en particulier à des effets d'amortissement dans un assemblage ou à des effets gyroscopiques pour un composant de machine soumis à des accélérations. On peut citer les exemples de toutes les structures précontraintes ou rotatives, telle qu'une aube de turbine, un instrument de musique ou un pont suspendu. Il faut rappeler qu'une précontrainte de traction contribue à augmenter les fréquences de résonance d'une structure, alors que des états de compression les diminuent.

V.2. Différences entre analyse modale et les autres analyses :

Une analyse de vibrations propre d'une structure est une analyse très similaire à une analyse linéaire statique, pour ce qui est des étapes de pré-processing.

❖ Une analyse modale peut être appliquée à toutes les géométries, c'est-à-dire aussi bien à des corps volumiques que surfaciques ou linéiques. On peut également considérer un point de masse, sans ajouter pour autant de flexibilité à la structure, et donc induire une réduction de ses fréquences propres de vibrations.

❖ Aucun effort mécanique ou thermique ne peut être appliqué à la structure dans le cadre d'une analyse modale de vibrations propres. Cependant, la structure peut être ou non contrainte, grâce aux conditions aux limites appliquées, et ce choix va particulièrement affecter les résultats obtenus, aussi bien en termes du calcul des fréquences propres que de la forme des modes de vibrations. Il faut donc être particulièrement attentif à la façon dont on fixe ces conditions aux limites.

❖ Le contact peut être considéré dans le cadre d'une analyse modale. Cependant, le contact entre différentes pièces sera considéré dans le cadre d'une analyse linéaire, et donc les surfaces en contact sont considérées sans gap entre elles, et les contacts comme parfaits (pas de séparation possible des surfaces en contact). On peut éventuellement introduire des contacts non linéaires dans le modèle, mais ils seront alors considérés comme libres, c'est-à-dire sans aucune contrainte entre les surfaces (aucun phénomène d'attraction, de mouvements relatifs, etc.).

❖ En termes de propriétés des matériaux, une analyse modale requiert que l'on renseigne le module d'élasticité, le coefficient de Poisson et la masse volumique du ou des matériaux considérés.

Type d'analyse	Données d'entrée	Données de sortie	Non linéarité
Modale	Aucune	- Fréquences propres de vibration et modes de déformation - Contraintes/déformations	Non
Harmonique	Excitations sinusoïdales sur un intervalle de fréquences	- Réponse sinusoïdale pour chaque fréquence de sollicitation - Réponse min/max pour l'ensemble des fréquences	Non
Spectrale	Spectre représentant la sollicitation en fonction du temps	Réponse maximale du modèle soumis à cette sollicitation dépendant du temps	Non
Aléatoire	Spectre représentant la distribution en termes de probabilité de la sollicitation	Réponses à cette distribution de probabilité de sollicitation	Non
Transitoire	Sollicitations variant dans le temps	Réponse en fonction du temps	Oui

Tableau V.1: Les types d'analyse

V.3.Résultats obtenus grâce à une analyse modale par ANSYS :

Pour ce qui concerne les résultats obtenus grâce à une analyse modale, ANSYS retourne par défaut les fréquences de vibrations propres de la structure. Le calcul de la forme associée à ces différents modes de vibrations (déplacements de la structure, qu'il faudra faire attention à bien considérés comme des valeurs relatives, et non absolues. On doit ensuite être demandé à partir des données générées initialement. On peut réclamer le calcul de grandeurs supplémentaires, telles que les contraintes ou les déformations subies par la structure, mais là encore, il ne s'agira que de valeurs relatives, et non absolues...

V.4.Résultats numériques du modèle choisi

V.4.1.Modélisation de château d'eau sans renforcement :

L'analyse modale du modèle calibré a conduit à l'obtention des paramètres modaux de la structure du pont étudié. Les fréquences modales de l'analyse par la méthode des éléments finis fournies par ANSYS sont données dans le **tableau VI.2**. Avec les formes des modes correspondantes illustrées dans les figures.

MOD	FREQ(HZ)	Périodes(s)	LOAD	STEP	SUBSTEP
1	1.2628	0.791891035	1	1	1
2	1.2642	0.79101408	1	2	2
3	4.0233	0.248552183	1	3	3
4	8.2013	0.121931888	1	4	4
5	8.2073	0.121842749	1	5	5
6	13.178	0.075884049	1	6	6

Tableau V.2 : Valeurs des fréquences obtenus par ANSYS « non renforcé »

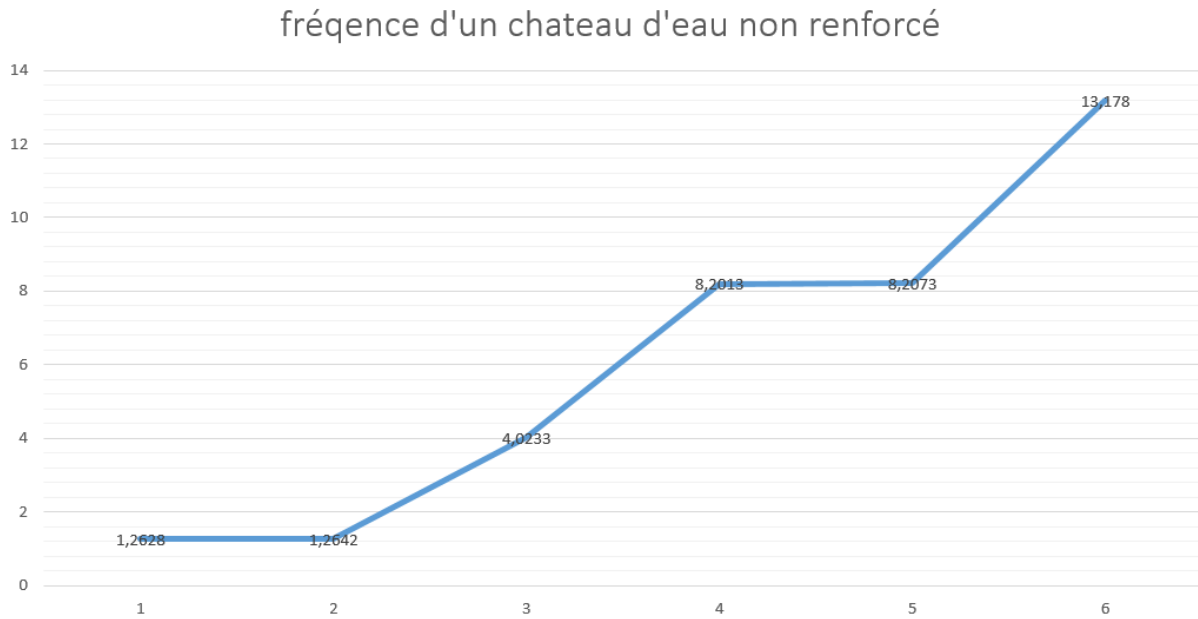


Figure V. 1 : Courbe des fréquences de château d'eau non renforcé

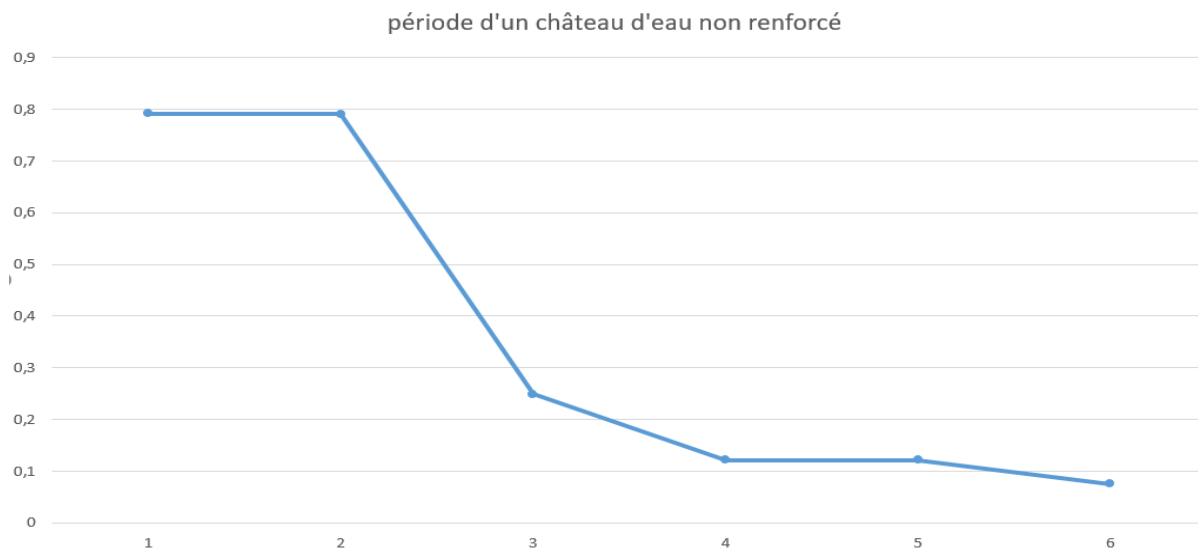


Figure V.2 : courbe des périodes de châteaux d'eau non renforcé

V.1.2. Les modes propres de vibration de l'ouvrage (non renforcée) par éléments finis :

Mode 1 :

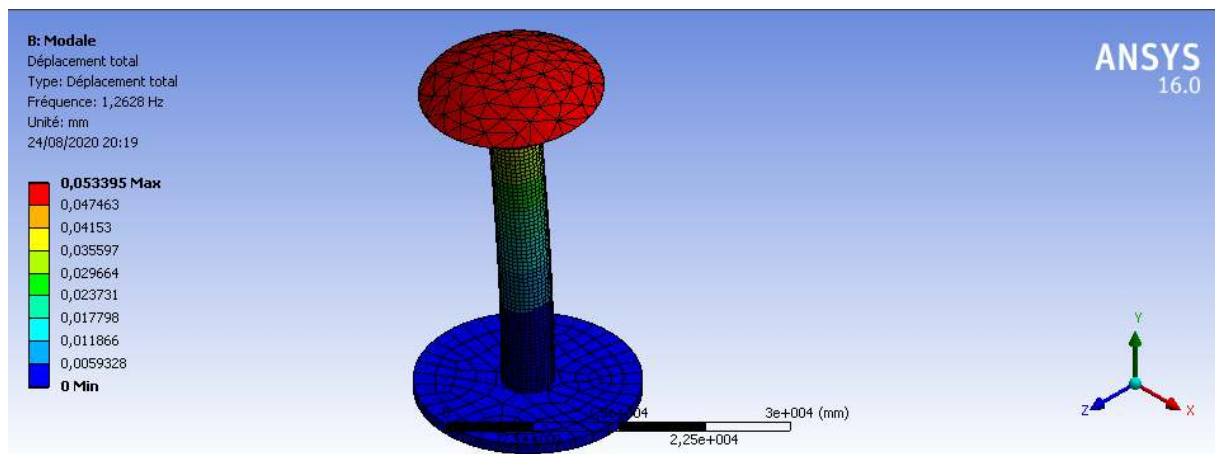


Figure V.3 : Mode de vibration 1 (non renforcée)

Mode 2 :

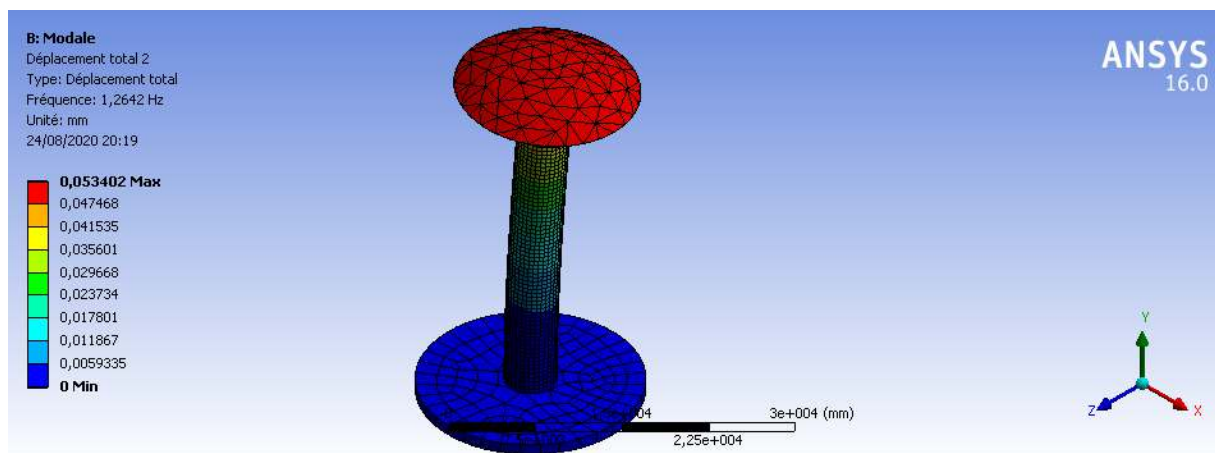


Figure V.4 : Mode de vibration 2 (non renforcée)

Mode 3 :

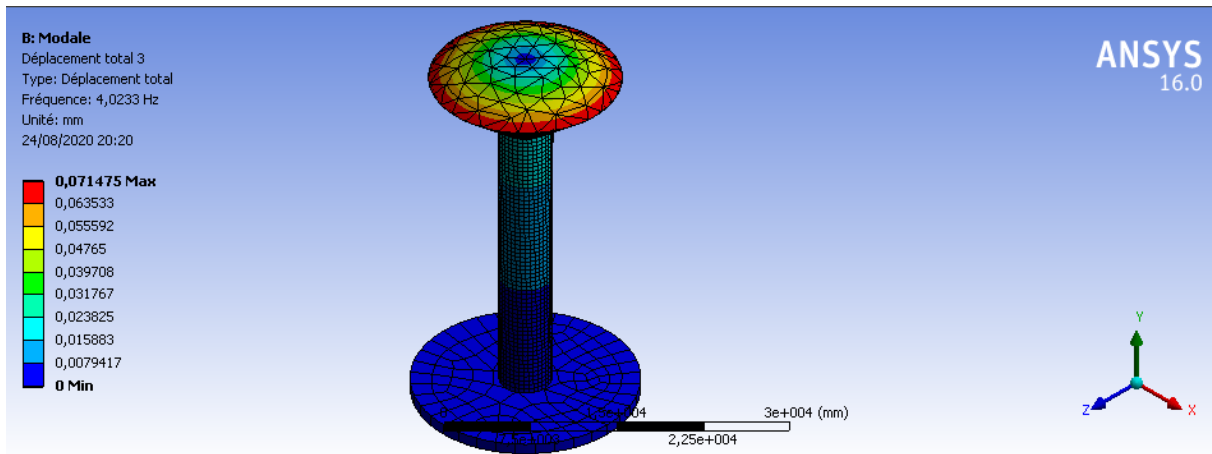


Figure V.5 : Mode de vibration 3 (non renforcée)

V.4.2. Modélisation de châteaux d'eau avec insertion de sika wrap :

L'analyse modale du modèle calibré a conduit à l'obtention des paramètres modaux de la structure du pont étudié. Les fréquences modales de l'analyse par la méthode des éléments finis fournies par ANSYS sont données dans le **tableau VI.3** avec les formes des modes correspondantes illustrées dans les figures.

MOD	FREQ(HZ)	Periode(s)	LOAD	STEP	SUBSTEP					
1	1.9	0.526315789	1	1	1					
2	1.9085	0.523971705	1	2	2					
3	6.103	0.166306363	1	3	3					
4	11.77	0.084961767	1	4	4					
5	11.78	1	5	5	6	18.65	0.053619302	1	6	6
6	18.65	0.053619302	1	6	6					

Tableau V.3 : Valeurs de fréquences obtenues par ANSYS « « renforcée » »

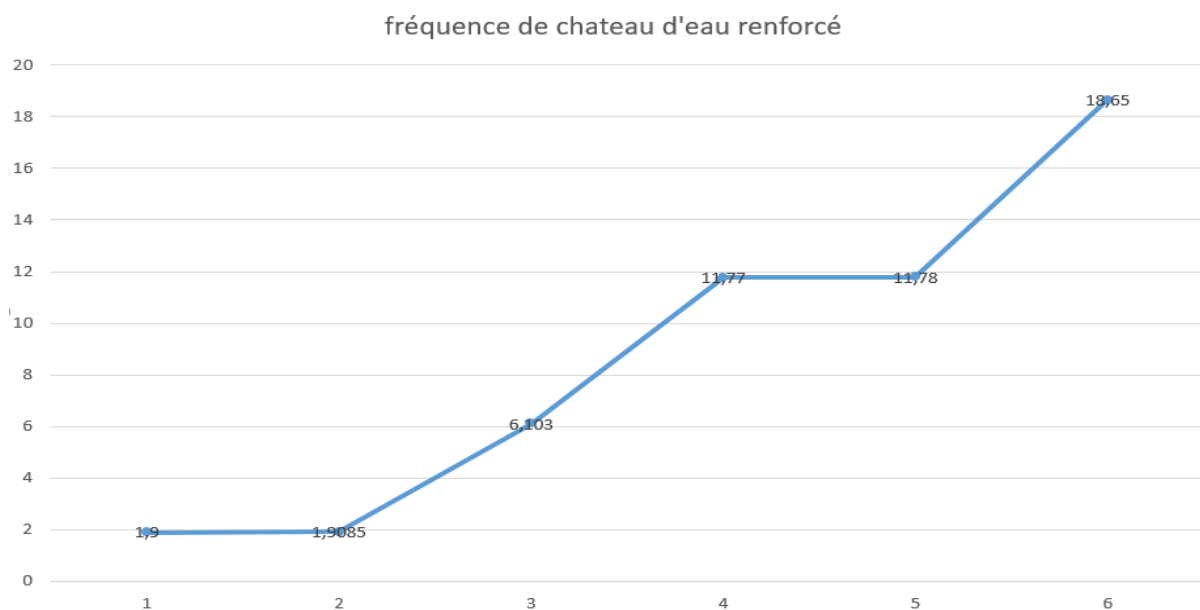


Figure V.6 : Courbe des fréquences de château d'eau renforcé

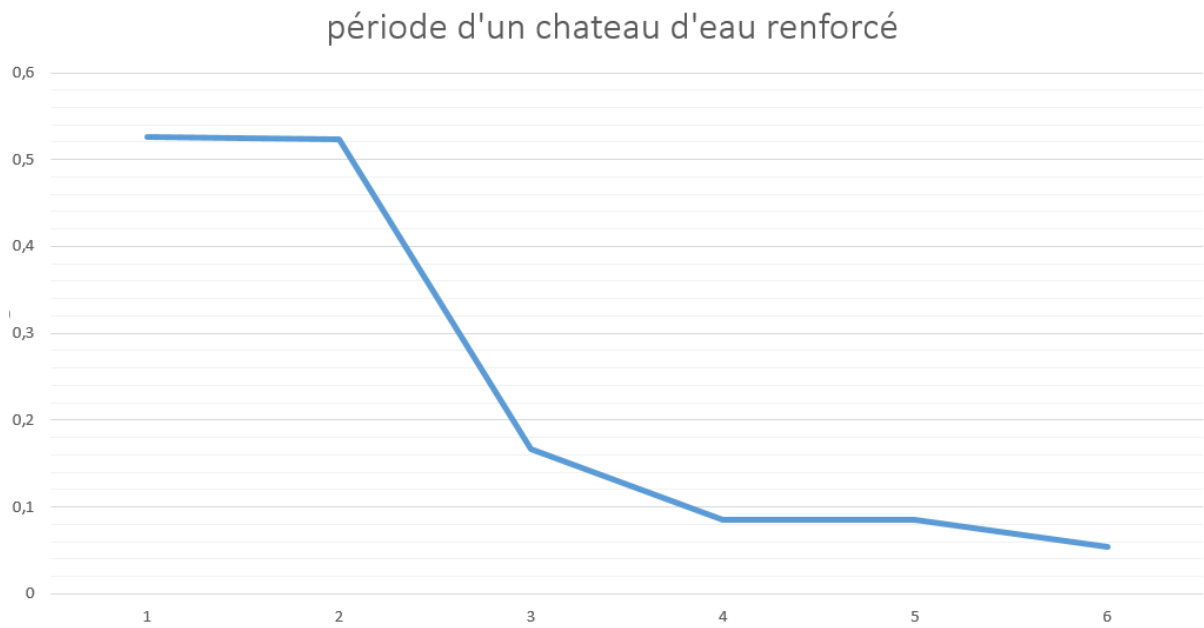


Figure V.7 : courbe des périodes de châteaux d'eau renforcée.

Les modes propres de vibration du l'ouvrage par éléments finis après l'application de sika wrap :

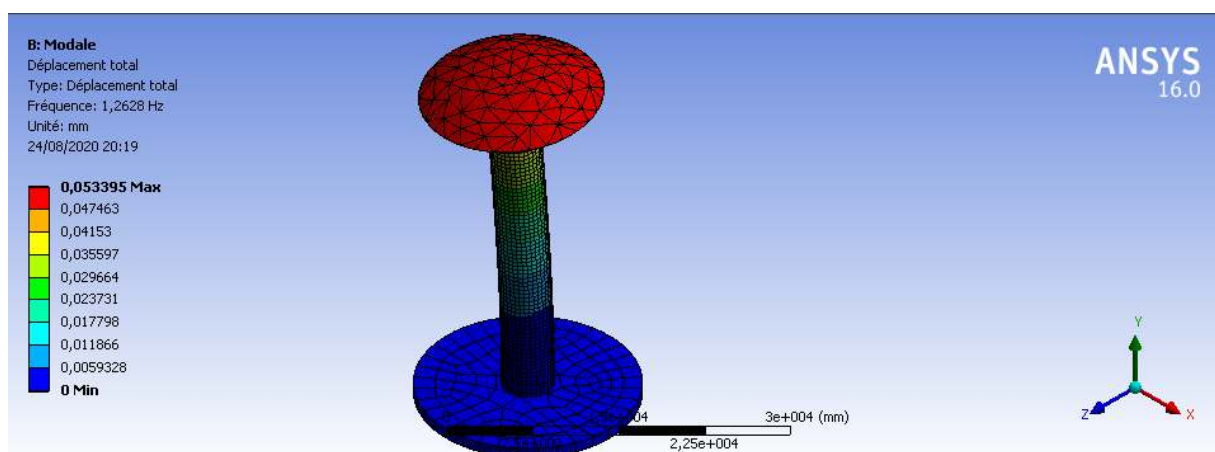


Figure V.8 : Mode de vibration 1 (renforcée).

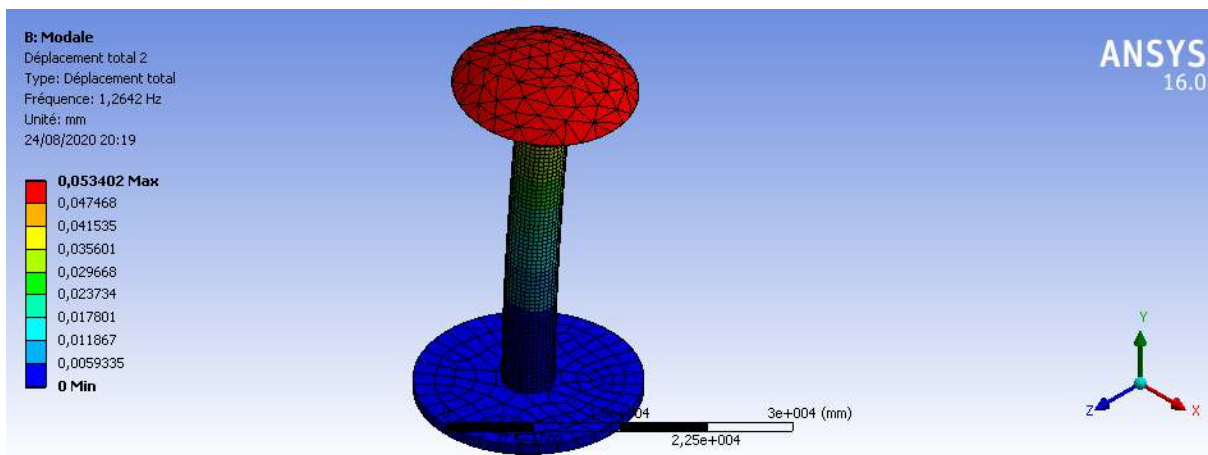


Figure V.9 : Mode de vibration 2 (renforcée).

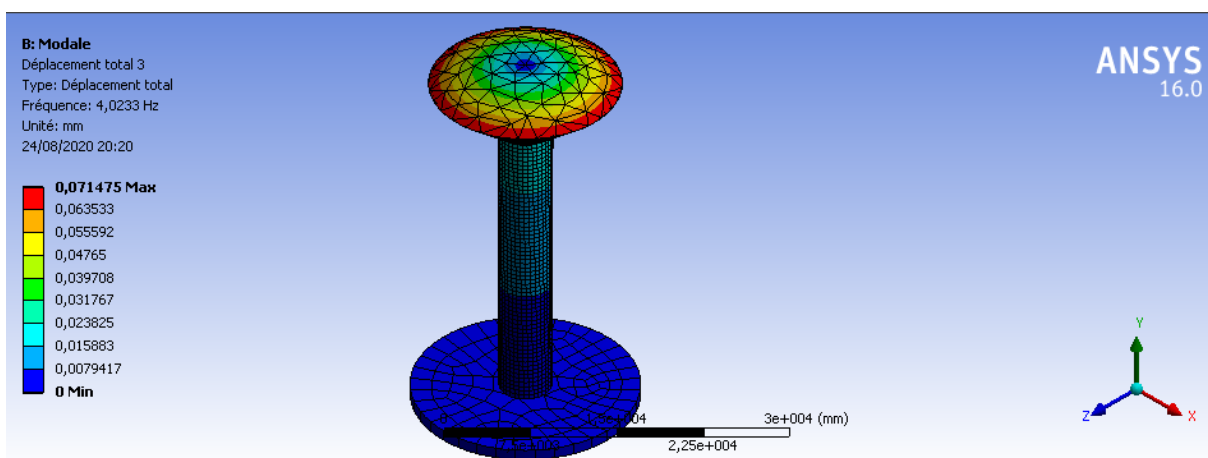


Figure V.10 : Mode de vibration 3 (renforcée).

V.5. Comparaison et commentaires :

Le tableau IV.4 présente une comparaison des valeurs numériques des fréquences et des périodes obtenir par la modélisation en élément finis de châteaux d'eau des deux cas étudiés.

MOD	Renforcé		Non renforcé	
	Fréquence (HZ)	Période (s)	Fréquence (HZ)	Période (s)
1	1.9	0.526315789	1.2628	0.791891035
2	1.9085	0.523971705	1.2642	0.79101408
3	6.103	0.166306363	4.0233	0.248552183
4	11.77	0.084961767	8.2013	0.121931888
5	11.78	0.084889643	8.2013	0.121842749
6	18.65	0.053619302	13.178	0.075884049

Tableau V.4 : comparaison entre les valeurs des fréquences

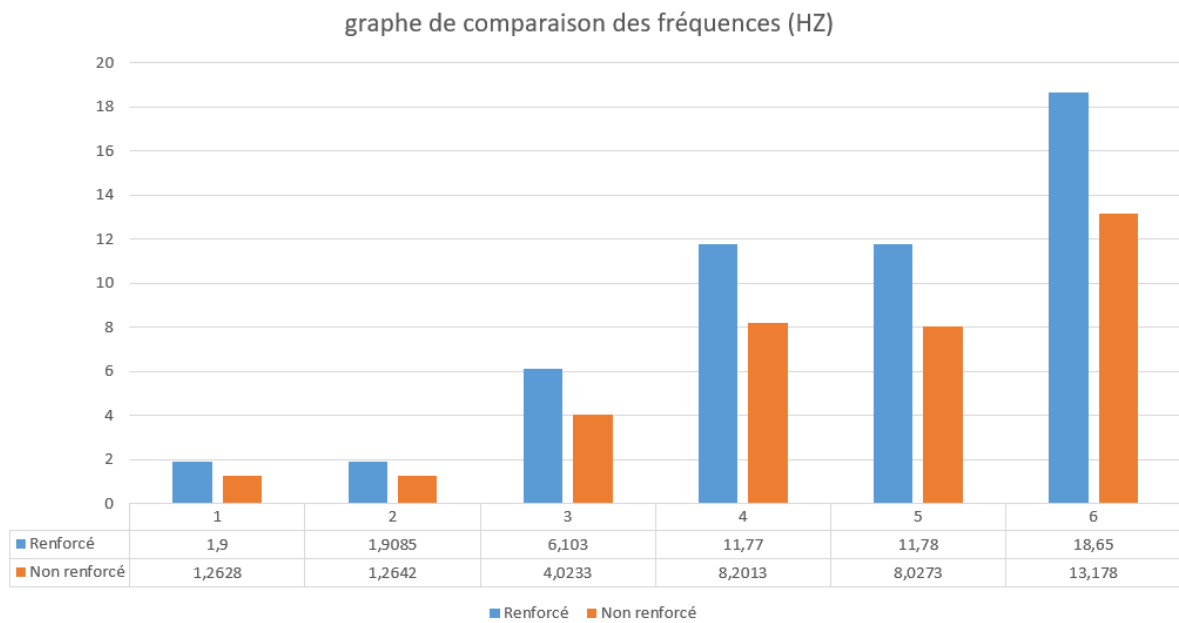


Figure V.11: courbe de comparaison des fréquences

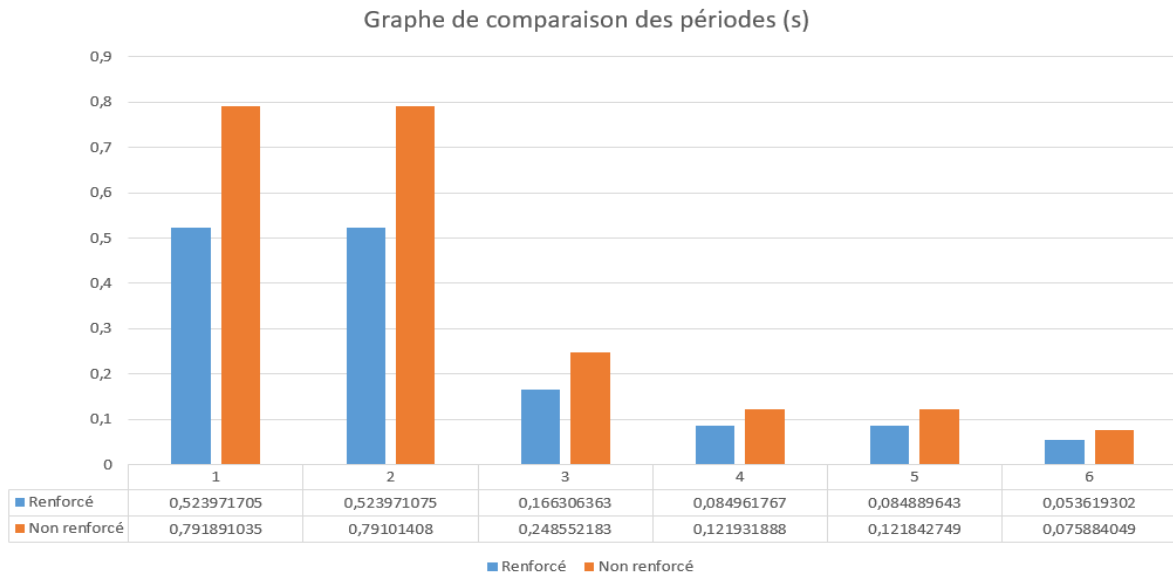


Figure V. 12: courbe de comparaison des périodes.

Commentaire : D'après le tableau et le graphe :

- Les fréquences dans le cas renforcée est augmenté par rapport le cas non renforcée.
- Les périodes dans le cas renforcée et diminue par rapport le cas non renforcée.
- Donc les châteaux d'eau et bien rigide après le renforcement.

V.6.Les déplacements :

► Avant le renforcement :

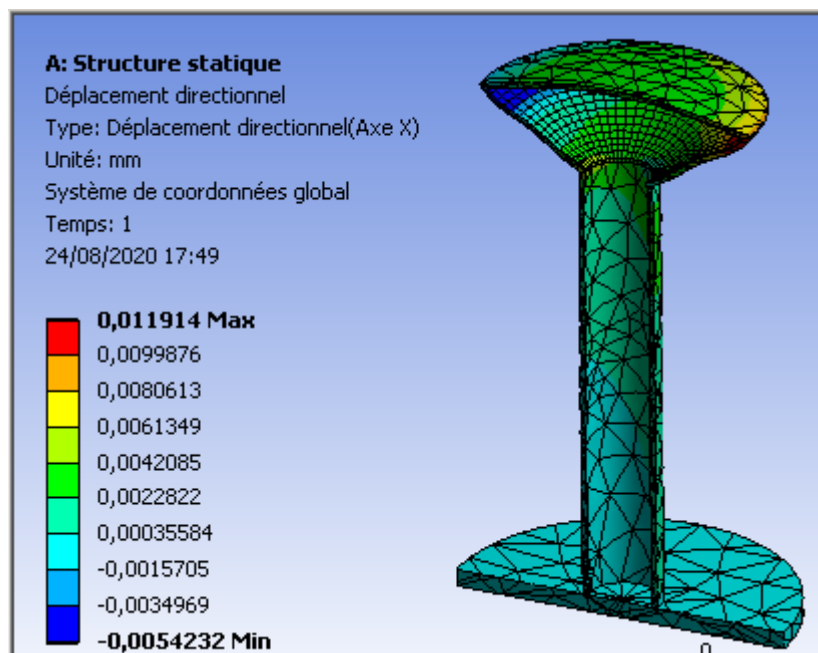


Figure V.13 : déplacement direction X sans renforcement.

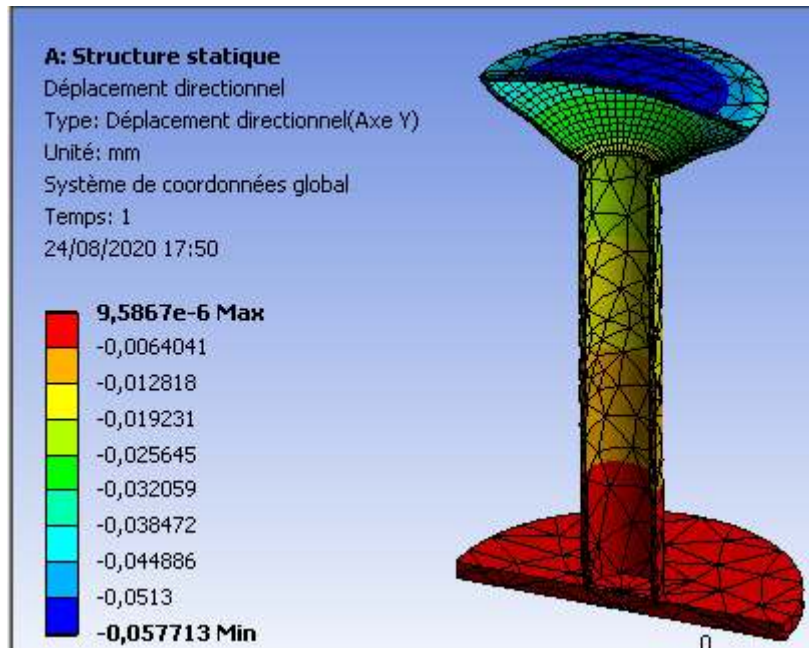


Figure V.14 : déplacement direction y sans renforcement.

► apres le renforcement :

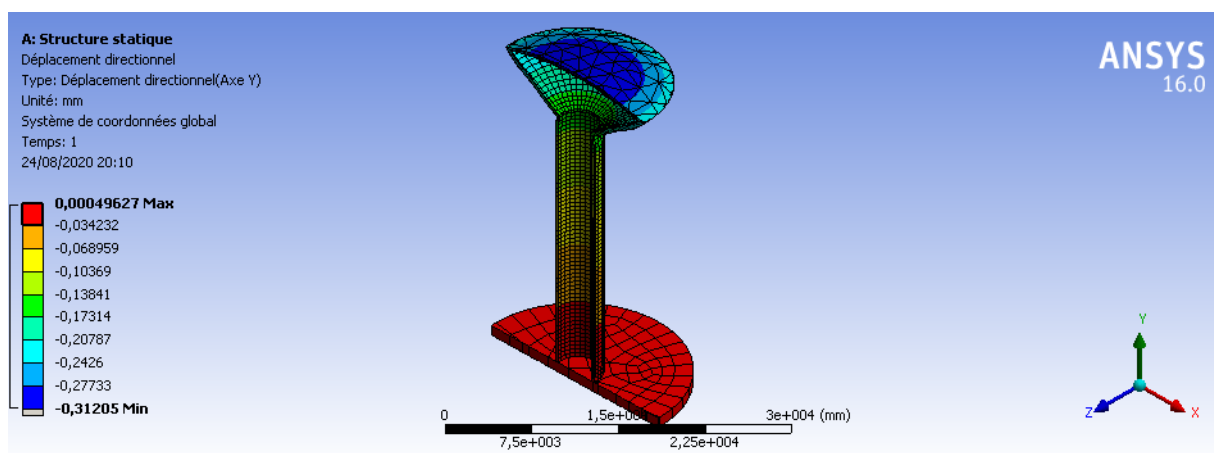


Figure V.15 : déplacements direction y avec renforcement

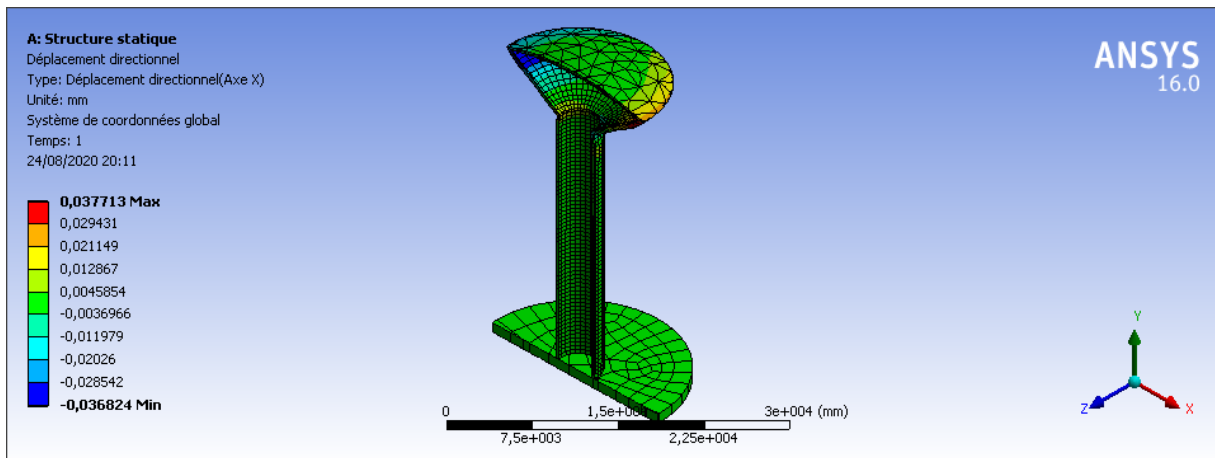


Figure V.16 : déplacement direction x avec renforcement.

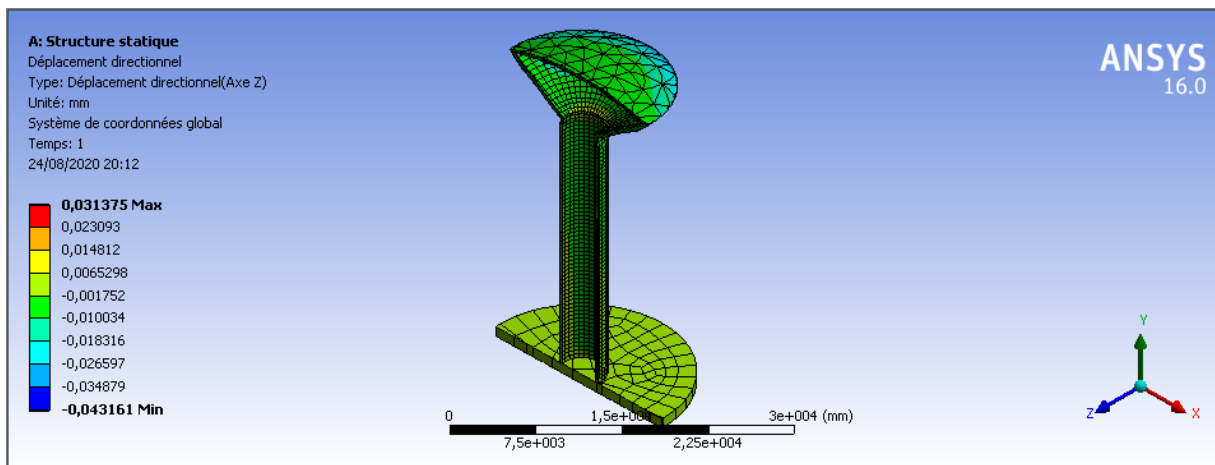


Figure V.17 : déplacement direction z avec renforcement.

V.7 Conclusion Générale :

Dans la présente étude nous avons donc essayé de recenser les différentes dégradations qui peuvent affecter surtout les ouvrages en béton. Nous avons aussi présentés les causes de dégradation, les moyens de les identifier et les méthodes de réparation. La conclusion que nous avons tirée de la présente étude est que les dégradations des ouvrages en béton ont essentiellement pour origines :

- Mauvaise qualité des matériaux
- Mauvaise qualité de la mise en oeuvre du béton
- Faute de conception
- Absence d'étude détaillée des propriétés physiques, chimiques et mécanique des sols
- Absence d'étude de l'influence des facteurs environnementaux sur le comportement à long terme des constructions en béton.

Et dans la partie de la modalisation on constaté ce qui suit :

-La modélisation numérique par application d'un logiciel professionnel (Ansys 2020), qui est amplement utilisé universellement, a permis de choisir un modèle numérique proche de la réalité et qui a donné une lecture approfondie des résultats.

L'application de la technique composite, comme solution innovante donne un gain appréciable, à sa portance et à la stabilité de l'ouvrage.

Enfin, le renforcement de châteaux d'eau en utilisant des matériaux composites demeure un sujet d'intérêt.

Références Bibliographiques :

- [1] Ould El Hacem Zein El Abidine. RENFORCEMENT DU BETON PAR LES MATERIAUX COMPOSITES. Mémoire de Master Académique Option : Génie civil / structures. Année : 2015/2016.
- [2] Riad Benzaid, Habib Abdelhak Mesbah, Nasr-Eddine Cheikh. Contribution à l'Etude des Matériaux Composites Dans le Renforcement et la Réparation Des Eléments Structuraux Linéaires en Béton. Editions Universitaires Européennes. Editions Universitaires Européennes, pp.264, 2010, 978-613-1-55146-8. .
- [3]. Hicham BELHANNACHI .REHABILITATION ET RENFORCEMENT DES POTEAUX EN BETON ARME. Juillet 2009.
- [4] S. HAOUARA, les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages en BA, 2005.
- [5] BOUAKKAZ.M, caractérisation du béton par les méthodes non destructives, 2012.
- [6] M.BROUXEL, la démarche du diagnostic, 2013.
- [7] OUZAA.KH, réhabilitation des structures, 2004.
- [8] LEANA. I, durabilité des réparations des ouvrages d'art en béton, 2013.
- [9] A. Mandara. STRENGTHENING TECHNIQUES FOR BUILDINGS, (2002) p255.
- [10] Jean PERCHAT. Béton armé : Règles BAEL-Pathologie et réparation des ouvrages- C 2 317, Technique de l'ingénieur, p19
- [11] Richard Andrew Barnes, Geoffrey Charles Mays. Strengthening of reinforced concrete beams in shear by the use of externally bonded steel plates: Part 1 – Experimental programmed, (2006) 396–402.
- [12] Mohcene BOUKHEZAR. Réhabilitation et renforcement des poutres au moyen des matériaux composites », thèse de Magister en Génie Civil, Université Mentouri Constantine, Juillet 2009.
- [13] GORNET. L, généralités sur les matériaux composites, 2010.
- [14] N.BOURAHLA (2007), renforcement de la maçonnerie par les fibres en verre, USTSD Blida.
- [15] JR. FANGUEIRO, fibrous and composite materials for civil engineering applications, 2011.]
- [16] A.GALGAROS et P.LACROIX (2000), projet de renforcement et de réparation d'un pont, traité de construction, technique de l'ingénieur
- [17] Cahier des clauses techniques-SIKA, SIKA CARBODUR-SIKA WRAP-CCT37
- [18] A.JEAN GALAGAROS, (2000), composites à fibre de carbone dans le génie civil, traité plastiques et composites, technique de l'ingénieur

- [19] Abdessamed Mouloud (2003), comportements des poutres isostatiques en béton armé renforcées par tissus et lamelles de fibres du carbone, thèse de magister, USTSD Blida
- [20] Benjamin LACLAU. Étude des spécificités des bétons de la première moitié du 20ième siècle et leur adaptabilité aux nouvelles technologies de renforts composites- Refhorm V1, 2009.
- [21]Mohcene BOUKHEZAR. Réhabilitation et renforcement des poutres au moyen des matériaux composites », thèse de Magister en Génie Civil, Université Mentouri Constantine, Juillet 2009.
- [22]MOHRA ABDELLAH ; YAGOUBI AISSA. Renforcement des poutres flexionnelles en béton armé par des matériaux composites en utilisant la technique EBR, thèse de Master en Génie Civil, Université Mentouri Constantine, 2013.
- [23]Khalifa A, Nanni A, Belarbi A, Tumialan G. Shearstrengthening of continuousreinforced concrete beamsusingexternallybondedcarbonfiberreinforcedpolymersheets. In:Proceedings of the fourth international symposium on fibre-reinforcedpolymer (FRP) reinforcement for concrete structures (FRPRCS-4). Baltimore, MD, November 1999. p. 995–1008.
- [24] ISIS-M04-F. Février 2002. Renforcement externe de structures en béton armé à l'aide de polymers renforcées de fibres. Canadian Standards Association, Rexdale, Canada.
- [25] Mebarki Souad. (2016) “ Etude du l’effet de matrice sur le comportement des stratifies carbone-époxy ”, Mémoire de fin d’études, Université A. M. Oulhadj –Bouira
- [26] N.BOURAHILA (2007), renforcement de la maconnerie par les fibres en verre, USTSD Blida
- [27] « Étude Expérimentale et Numérique du Comportement Micromécanique des Liaisons Collées de type Sifflet et Double Sifflet », Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2007.
- [28]« Étude Expérimentale et Numérique du Comportement Micromécanique des Liaisons Collées de type Sifflet et Double Sifflet », Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2007.
- . Abdelghani. M, Etude de poutres en béton armé renforcées par matériaux composites selon la technique NSM, 2015.
- [29] M. BOUMAAZA, Réhabilitation des Poutres en Béton Armé Rompues au Cisaillement à l’aide des Matériaux Composites, 2015.
- [30] «Les solutions techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages de génie civil en béton», Année 2011.

- [31] Contribution à l'étude expérimentale et théorique de structures en béton armé renforcées à l'effort tranchant par collage de composites à matrice organique", Thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne, 2001.
- [32] Abdessamed mouloud (2003), comportements des poutres isostatiques en béton armé renforcées par tissus et lamelles de fibres du carbone, thèse de majister, USTSD Blida.
- [33] Leblouba moussa, hanifi fouad (2015), vérification par rapport aux addenda au RPA2003 les effets de la maçonnerie et des étages souples sur les structures a ossatures en béton armé , mémoire de PFE ,ENTP.
- [34] Logiciel de calcul de structure, (2020) " analyse aux éléments finis (MEF)", Dlubal Software SARL, 93464 Tiefenbach Allemagne.
- [35] Hicham BELHANNACHI« Réhabilitation et Renforcement des Poteaux en Béton Armé», Thèse de magister 2009, Université Mentouri, Constantine.
- [36] ANSYS products , 2020, " ANSYS Structures", Site web official Ansys.
- [38]] ANSYS Produits, 2020, " Ansys 2020 R1", Home de Site web official Ansys. [76] ANSYS Srvices, 2020, " Introduction To AnsysMechanical APDL ", Site web official Ansys.
- [39] AcademicAnsys, 2020, " Free Student Software Downloads ", Home site web official.
- [40] Mary Kathryn Thompson and John M. Thompson (2017)," ANSYS Mechanical APDL for FiniteElementAnalysis", Description of the book ,Copyright © 2017 Elsevier Inc. All rightsreserved.
- [41] Avis Technique 3/16-875 (2012), "SikaCarboDurSikaWrap", Annule et remplace l'Avis Technique 3/10-669 ,(arrêté du 21 mars 2012).