

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université SAAD DAHLEB BLIDA 1



Domaine Sciences et Technologies

Département de Génie Civil

Mémoire de Projet de Fin d'Etude

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux

Thème :

**Comparaison Technique entre Méthodes de
Réparation et/ou Renforcement d'une Structure
en Béton Armé**

Présenté par :

LOUNES Sarah
SOUANE Fouzia

Encadré par :

Dr. M. ABDESSEMED

Année Universitaire 2019/2020

Dédicaces

Je dédie cet humble travail a :

Mes très chers parents qui m'ont guidée durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, qui ont été à mes côtés, m'ont encouragée à avancer les poings serrés, soutenue, qui se sont sacrifiés pour me voir devenir la personne que je suis devenue.

Mes sœurs, Ouerdia et Imene, qui sont tout pour moi.
Modka.

Ma famille maternelle, mes grands-parents qui m'ont élevée comme leur propre fille, mes tantes, qui ont beaucoup contribué dans ma vie.

Ma très chère amie Farah.

Mes amies Mouna, Amina, Wassila, Tina, Nesrine.

Toutes les personnes qui m'ont transmis de l'énergie positive dans ma vie.

LOUNES Sarah

Je dédie cet humble travail a :

Mon très cher père, qui m'a soutenue et s'est tant sacrifié pour les besoins de mes études.

Toute la famille Souane au grand complet.

Mes très chères amies.

Tous ceux qui m'aiment.

SOUANE Fouzia

Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier le Bon Dieu le Tout Puissant, de nous avoir donné de la force, la volonté et de la patience d'accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier également notre encadreur Dr Mouloud ABDESSEMED, Vice-Recteur chargé de la Planification et Enseignant Chercheur à l'Université de Blida1, l'initiateur du sujet, ainsi que pour son suivi, ses précieux conseils et observation et pour son aide durant toute cette période de travail.

Nous tenons à remercier également, Mme Houcine Nadia, Ingénieur au sein du CTC, qui nous a guidées pour notre projet, ainsi que Mr Boudjoudi, Directeur au CTC, pour son accueil et son aide à trouver un projet (cas d'étude) qui correspond notre thème.

Nos remerciements vont à l'ingénieur Mr Abdou, du Bureau d'Etude en collaboration avec COSIDER, pour son aide, ses orientations, sa patience et sa participation dans la collecte et le traitement des données.

Nous tenons à remercier Dr Kibboua A. et Dr Mhenni au niveau du CGS, pour leur accueil, et l'envoi des documents demandés, ainsi que pour leurs conseils.

Nous remercions également, à l'ensemble des enseignants de notre Département de Génie Civil/ Université de Blida1 pour leur formation, ainsi que pour tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail et en acceptant de l'examiner.

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

ملخص

للجزائر تراث مهم جدا من الأعمال الخرسانية (BA، BP، مختلطة)، سواء في المباني أو الجسور أو غيرها. أثناء خدمة وتشغيل هذه الهياكل، نلاحظ أن العديد منها يتدهور ويتدهور (التعب، والتشقق، والانفجار، وما إلى ذلك) ، وهذا هو السبب في ضرورة اختيار الطريقة و / أو تقنية الإصلاح و / أو التعزيز. الغرض من هذا الملخص هو إعطاء لمحة عامة عن التراث الحالي من حيث البناء الخرساني المسلح وإعطاء التدهور المحتمل بأنواعه المختلفة. سيتم التفكير في اختيار التقنية التي سيتم اعتمادها. من أجل التحقق من صحة هذا الاختيار، سيتم إنشاء حساب رقمي بواسطة M.E.F، مع إدراج حالة دراسة حقيقية.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة المسلحة، المباني، التسليح، الإصلاح، MEF

Résumé

L'Algérie dispose d'un patrimoine très important d'ouvrages en béton (BA, BP, mixte), que ce soit en bâtiment, ponts ou autres. Durant les services et l'exploitation de ces ouvrages, on s'aperçoit que nombreux d'entre eux se dégradent et se détériorent (fatigue, fissuration, éclatement, etc.) c'est pourquoi, il est impératif de choisir la méthode et/ou la technique de réparation et/ou renforcement. L'objet de ce mémoire, c'est de donner un aperçu global du patrimoine existant en matière de construction en béton armé et donner les dégradations éventuelles avec leurs différents types. Une réflexion sur le choix de la technique à adopter sera faite. Afin de valider ce choix, un calcul numérique par la M.E.F sera établi, avec l'insertion d'un cas d'étude réel.

Mots clés : béton armé, bâtiments, renforcement, réparation, MEF.

Abstract

Algeria has a very important heritage of concrete works, whether in buildings, bridges or others. During the service and operation of these structures, we notice that many of them degrade and deteriorate (fatigue, cracking, bursting, etc.), which is why it is imperative to choose the method and/or the technique of repair and/or reinforcement. The purpose of this brief is to give an overview of the existing heritage in terms of reinforced concrete construction and give the possible degradations with their types. A reflection on the choice of the technique to be adopted will be made. In order to validate this choice, a numerical calculation by the M.E.F will be established, with the insertion of a real study case.

Keyword: reinforced concrete, buildings, reinforcement, repair, MEF.

Liste des figures

Figure I.1 : Les parties composantes d'un pont	4
Figure I.2 : Les parties composantes d'un pont	5
Figure I.3 : Dégradations du béton dû à la réaction alcalis-granulats	10
Figure I.4 : Attaques de sulfates sur le béton	10
Figure I.5 : Attaques des acides	11
Figure I.6 : Lixiviation	11
Figure I.7 : Dégradation due aux sels de déverglaçage	12
Figure I.8 : Phénomène de carbonatation	13
Figure I.9 : Aspect physico-chimique de la corrosion	14
Figure I.10 : Phénomène de corrosion des armatures d'un béton armé	14
Figure I.11 : Graphe représentant les étapes de corrosion d'un ouvrage en béton armé	15
Figure I.12 : Représentation de fissures visibles sur la surface d'un béton	15
Figure I.13 : Epaufrures causées par le choc dans la construction	17
Figure I.14 : Dommages sur le béton engendrés par la ségrégation	17
Figure I.15 : Effet du ressuage sur le béton	18
Figure I.16 : Eclatement de l'enrobage du a un incendie et au choc	18
Figure I.17 : Le scléromètre	20
Figure I.18 : Prélèvement de carottes	20
Figure I.19 : Fissuromètre	20
Figure I.20 : Extensomètre	21
Figure I.21 : Hygromètre	21
Figure I.22 : Appareil à ultrasons	21
Figure I.23 : Mise en place des armatures de renforcement avec augmentation de la rugosité du poteau	24
Figure I.24 : Méthode d'injection	25
Figure I.25 : Adjonction d'armatures complémentaires	26
Figure I.26 : Technique de projection par voie sèche	26
Figure I.27 : Technique de projection par voie mouillée	27

Figure I.28 : Technique de précontrainte additionnelle	28
Figure II.1 : Les différents types de composites	34
Figure II.2 : Organigramme des différentes familles de matrice	35
Figure II.3 : Courbes force–déformation des aciers pour poutres réparées et renforcées	45
Figure IV.1 : Photos de l’ouvrage	56
Figure IV.2 : Vue plan XY de la structure a l’aide du logiciel ANSYS	56
Figure IV.3 : Vue plan YZ de la structure	56
Figure IV.4 : Vue plan XZ de la structure	56
Figure IV.5 : Modélisation en 3D de la structure à l’aide du logiciel ANSYS	57
Figure IV.6 : Différentes colorations du béton mis en place	58
Figure IV.7 : Fissuration et mauvaise mise en œuvre due à un défaut d’exécution	58
Figure IV.8 : Ségrégation profonde et superficielle repérée sur les armatures	58
Figure IV.9 : Armatures apparentes par endroits	58
Figure IV.10 : Poutre décalée du poteau	59
Figure IV.11 : Ségrégation avec corrosion des armatures	59
Figure IV.12 : Déformation et corrosion des armatures	59
Figure IV.13 : Solid 65 a 3D	60
Figure IV.14 : Solid 185 a 3D	61
Figure IV.15 : Modélisation du maillage de la structure a l’aide du logiciel ANSYS	64
Figure IV.16 : Conditions aux limites.....	65
Figure IV.17 : Réalisation du coffrage des poteaux à chemiser	67
Figure IV.18 : Modélisation a l’aide d’ANSYS du poteau dans le cas du chemisage	67
Figure IV.19 : Modélisation du béton de chemisage autours du poteau	67
Figure IV.20 : Modélisation de la poutre chemisée à l’aide d’ANSYS	68
Figure IV.21 : Modélisation du béton de chemisage autours de la poutre	68
Figure IV.22 : Pose de la SikaCarbodur sur la face inférieure de la poutre	69
Figure IV.23 : Pose de la Sika Wrap sur toutes les surfaces du poteau	70
Figure IV.24 : Connectivité des éléments : (a) élément solide65 (béton) et éléments link8 (acier), (b) élément solide65 (béton) et les couches du matériau composite éléments solide46	71
Figure V.1 : Modélisation de l’analyse modale (MODE 1) du bâtiment avant renforcement	74

Figure V.2 : Modélisation de l'analyse modale (MODE2) du bâtiment avant renforcement	74
Figure V.3 : Modélisation de l'analyse modale (MODE 3) du bâtiment avant renforcement	75
Figure V.4 : Modélisation de l'analyse modale (MODE 4) du bâtiment avant renforcement	75
Figure V.5 : Modélisation de l'analyse modale (MODE 5) du bâtiment avant renforcement	76
Figure V.6 : Modélisation de l'analyse modale (MODE 6) du bâtiment avant renforcement	76
Figure V.7 : Courbe des fréquences du bâtiment sans renforcement	77
Figure V.8 : Courbe des périodes du bâtiment sans renforcement	77
Figure V.9 : Modélisation du déplacement directionnel du bâtiment	78
Figure V.10 : Modélisation de la contraint normale du bâtiment	78
Figure V.11 : Modélisation de l'analyse modale (MODE 1) du bâtiment dans le cas du chemisage	79
Figure V.12 : Modélisation de l'analyse modale (MODE 2) du bâtiment dans le cas du chemisage	79
Figure V.13 : Modélisation de l'analyse modale (MODE 3) du bâtiment dans le cas du chemisage	80
Figure V.14 : Modélisation de l'analyse modale (MODE 4) du bâtiment dans le cas du chemisage	80
Figure V.15 : Modélisation de l'analyse modale (MODE 5) du bâtiment dans le cas du chemisage	81
Figure V.16 : Modélisation de l'analyse modale (MODE 6) du bâtiment dans le cas du chemisage	81
Figure V.17 : Courbe des fréquences du bâtiment dans le cas du chemisage	82
Figure V.18 : Courbe des périodes du bâtiment dans le cas du chemisage	82
Figure V.19 : Modélisation du déplacement vertical du bâtiment dans le cas du chemisage	83
Figure V.20 : Modélisation de la contrainte normale du bâtiment dans le cas du chemisage	83
Figure V.21 : Modélisation de l'analyse modale (MODE 1) du bâtiment dans le cas des matériaux composites	84
Figure V.22 : Modélisation de l'analyse modale (MODE 2) du bâtiment dans le cas des matériaux composites	84

Figure V.23 : Modélisation de l'analyse modale (MODE 3) du bâtiment dans le cas des matériaux composites	85
Figure V.24 : Modélisation de l'analyse modale (MODE 4) du bâtiment dans le cas des matériaux composites	85
Figure V.25 : Modélisation de l'analyse modale (MODE 5) du bâtiment dans le cas des matériaux composites	86
Figure V.26 : Modélisation de l'analyse modale (MODE 6) du bâtiment dans le cas des matériaux composites	86
Figure V.27 : Courbe des fréquences du bâtiment dans le cas des matériaux composites	87
Figure V.28 : Courbe des périodes du bâtiment dans le cas des matériaux composites	87
Figure V.29 : Modélisation du déplacement vertical du bâtiment dans le cas des matériaux composites	88
Figure V.30 : Modélisation de la contrainte normale du bâtiment dans le cas des matériaux composites	88
Figure V.31 : Graphe de comparaison des fréquences des trois cas étudiés	89
Figure V.32 : Graphe de comparaison des fréquences des trois cas étudiés	90

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Etapes de chemisage en béton armé	24
Tableau II.1 : Différents types de composites	33
Tableau II.2 : Comparaison entre les deux types de résines	37
Tableau II.3 : Caractéristiques mécaniques des fibres de carbone	39
Tableau II.4 : Caractéristiques mécaniques des verres type E et R mesurées sur filament	40
Tableau II.5 : Caractéristiques mécaniques des fibres d'aramide	41
Tableau II.6 : Les caractéristiques des fibres et renforts	42
Tableau II.7 : Performances comparées des différents types d'architecture	43
Tableau II.8 : Désignation des poutres renforcées avant et après endommagement et mode de collage des différents composites	45
Tableau II.9 : Comparaison qualitative entre fibres	46
Tableau IV.1 : Propriétés du béton armé utilisé dans la modélisation	61
Tableau IV.2 : Propriétés de CarboDur S1512	62
Tableau IV.3 : Propriétés de la résine Sikadur -30	62
Tableau IV.4 : Propriétés de Sika Wrap -600 C	63
Tableau IV.5 : Propriétés de la résine Sikadur -300	63
Tableau IV.6 : Nombre des nœuds du bâtiment	64
Tableau IV.7 : Géométrie des composites	70
Tableau V.1 : Valeurs des fréquences et des périodes données par ANSYS	77
Tableau V.2 : Valeurs des fréquences et périodes du cas du bâtiment chemisé obtenues par ANSYS	82
Tableau V.3 : Valeurs des fréquences et périodes obtenues par ANSYS	87
Tableau V.4 : Comparaison sommaire des valeurs de fréquences et périodes des trois cas étudiés.....	89

Liste des abréviations et notations

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

Introduction générale

Le béton est actuellement l'un des matériaux de construction les plus utilisés à travers le monde. La simplicité de sa fabrication et de sa mise en place, son faible prix et les performances mécaniques et de durabilité qu'il assure ont légitimé son utilisation pour réaliser des ouvrages les plus divers. Certains ouvrages demeurent en excellent état après plus d'un siècle d'exploitation sous des conditions climatiques particulièrement rigoureuses et sévères.

Dans tous les cas, il est impérativement indispensable de procéder par des méthodes, soit de renforcement, soit de réparation, et cela suite à une inspection d'analyse et de méthodologie d'un bon diagnostic. Car il est beaucoup moins onéreux de renforcer certains éléments structuraux que d'effectuer une reconstruction complète de l'ouvrage. Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service (vie) d'une construction pour en permettre l'utilisation dans des conditions non prévues à l'origine ou de lui procurer une protection suffisante contre des sollicitations dont il n'a pas été tenu compte dans les calculs initiaux.

La réparation est une opération de remise en état d'un élément ou d'un ouvrage dégradé et lui restituant un niveau de service perdu par des travaux appropriés. Depuis une dizaine d'année, une méthode est adoptée, il s'agit de la réparation ou le renforcement des structures par des matériaux composites, qui ont une facilité de mise en place directement sur les éléments de l'ouvrage. Ces matériaux ont toutefois un inconvénient, à savoir leurs prix élevés.

L'objectif de notre travail, est d'évaluer le cas d'un ouvrage en béton armé détérioré, consistant à nous familiariser avec les causes du problème, d'établir une étude comparative des techniques de renforcement et de réparation de cet élément. Enfin, présenter les avantages et les inconvénients de ces techniques, mais aussi les avantages économiques des matériaux utilisés.

Notre mémoire va se présenter comme suit :

Une introduction générale.

Chapitre 1 : dans ce chapitre seront présentés la pathologie et les causes des dégradations du béton, ainsi que les méthodes du diagnostic, pour localiser ces dégradations et pour trouver des solutions à ces problèmes en définissant les différentes techniques traditionnels et nouvelles de réparation/renforcement.

Chapitre 2 : ce chapitre permet une familiarisation avec les matériaux composites qui sont les matériaux essentiellement utilisés dans les nouvelles méthodes de renforcement.

Chapitre 3 : dans ce chapitre sera évoqué le choix du logiciel pour la modélisation de notre cas ainsi que les analyses faites avec ce même logiciel, avec une introduction à la méthode MEF.

Chapitre 4 : dans ce chapitre sera présenté le cas d'étude avec modélisation de la structure, sans renforcement, avec confortement par chemisage, et renforcée avec les matériaux composites, avec l'analyse modale des cas cités.

Chapitre 5 : sera réservé à la présentation des résultats du logiciel ANSYS et la discussion de ces résultats, ainsi que la comparaison des périodes entre les deux méthodes.

Et enfin une conclusion générale qui résumera les résultats et les constatations de notre mémoire.

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

I.1- Introduction :

L'analyse du comportement pathologique des ouvrages permet d'exposer des désordres et des comportements particuliers qui sont le résultat de dégradation des matériaux utilisés dans la construction (corrosion des aciers, vieillissement des bétons, réaction alcali,...), qui peuvent aussi s'expliquer par des erreurs de conception (erreurs de calcul, défauts d'exécution), ou par des sollicitations accidentelles (séisme, choc, impact).

L'intégrité des structures en service dépend essentiellement de la variation de leurs résistances au cours d'exploitation. Dans le secteur du génie civil ou de travaux publics, la cause principale des défaillances et des dégradations sont les fissures causées par des sollicitations dynamiques ou statiques. Il est donc nécessaire d'effectuer un contrôle régulier des structures, de les protéger, de les réparer et parfois de les renforcer.

Réparer une construction est une opération qui consiste à lui restituer un niveau de service perdu. La renforcer, consiste à augmenter son niveau de service, en particulier, augmenter sa ductilité et de sa résistance pour en permettre l'utilisation dans des conditions non prévues à l'origine. [1]

Les matériaux composites sont définis comme étant l'association d'au moins deux matériaux, la matrice et le renfort. L'association de ces deux derniers permet de conjuguer leurs performances physiques et mécaniques et de donner un matériau dont les caractéristiques sont beaucoup plus élevées. Ils peuvent remplacer ou concurrencer les matériaux traditionnels, en vue des performances mécaniques très élevées (faible poids, résistance élevée,...etc.). L'intérêt d'utilisation des matériaux composites réside dans leur souplesse, leur facilité de mise en œuvre et leur capacité à rigidifier les structures endommagées [1].

météorologiques, 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. [2]

I.2- Pathologie des structures en béton armé :

I.3.1- Introduction :

L'étude du comportement pathologique des ouvrages d'art et des bâtiments en béton armé, met en évidence des phénomènes de dégradation des matériaux, des erreurs de conception, de mise en œuvre et des désordres dus aux sollicitations accidentels (choc, séismes).

L'état des infrastructures en béton est un sujet grandement discuté dans la littérature et les conférences scientifiques. En effet, un nombre important de structures est âgé et nécessite des interventions à court terme. La détérioration dans le temps de ces structures est principalement dû aux conditions d'exploitation et à l'environnement agressif.

N'importe quelle structure peut se trouver confrontée durant sa vie à des agressions chimiques, physiques, mécaniques ou thermiques. Ces agressions se traduisent, dans la plupart des cas, par une diminution des propriétés mécaniques des matériaux utilisés et, par conséquent, par une diminution de la durée de vie de la structure dans laquelle ils sont incorporés.

I.3.2- Définition de pathologie :

Etude des désordres affectant un bâtiment ou un matériau en œuvre, elle comprend :

- L'observation et l'analyse des symptômes et des conditions de mise en œuvre.
- L'établissement d'un diagnostic sur les causes probables.
- La recherche de remèdes ou traitements curatifs à envisager.

I.3.3- Dégradations mécaniques :

Les désordres mécaniques se manifestent par l'apparition de fissures, éventuellement aggravées par une déformation importante de la structure. Lorsque des contraintes brusques, comme un impact ou une explosion, provoquent une dislocation plus ou moins importante du béton, le lien entre les dégâts et leur cause est généralement évident. Avant d'effectuer des réparations, on s'assurera toutefois que d'autres mécanismes de dégradation actifs ne doivent pas être traités au cours des travaux. [6]

Des désordres résultant d'une faible surcharge permanente ou d'un tassement des appuis sont plus lents à se manifester, notamment en raison du fluage du béton. Une étude de stabilité sera nécessaire afin d'évaluer l'action d'une surcharge éventuelle en plus d'une inspection in situ.

I.3.3.1- Déplacements des coffrages :

Les coffrages sont dimensionnés pour résister au poids du béton frais, mais ils sont toujours déformables. Cette déformation peut entraîner, l'apparition de fissures importantes.

Pour empêcher l'apparition de telles fissures il faut :

- Vérification de la bonne conception des coffrages.

-
- Revêtir la surface du bois utilisé pour le coffrage afin d'empêcher l'absorption qui induit à un gonflement du bois.
 - Vérifier périodiquement les montages et l'exécution pendant le coulage.

I.3.3.2- Dégradation des matériaux :

Les propriétés physiques et plus particulièrement le comportement mécanique du béton et des aciers sont susceptibles de se dégrader en fonction des conditions environnementales. Les principales causes de vieillissement sont liées aux phénomènes suivants :

- Chocs, érosion, abrasion : principalement sur les ouvrages se situant en milieu maritime.
- Action des cycles gel-dégel : dans les régions à climat froid.
- Altération physico-chimique du béton : dans les milieux agressifs.
- Retrait du béton : principalement dans les environnements chauds et secs.
- Corrosion des armatures métalliques. [16]

I.3.3.3- Décoffrage prématuré :

Actuellement la vitesse et l'économie sont visées dans la construction. Cela a pour conséquence que le coffrage soit retiré avant que le béton ait acquis une résistance suffisante. Le décoffrage prématuré d'un béton peut entraîner : [17]

- Des déformations excessives de pièces minces fléchies.
- Une fissuration des parties tendues.
- Une microfissuration préjudiciable au niveau de la durabilité de la structure.

I.3.3.4- Désordres dus aux erreurs de conception ou d'exécution :

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

Parmi les conditions particulièrement mal évaluées, il est possible de faire état de l'action des gradients de température sur un ouvrage, de la mauvaise estimation des efforts de précontrainte mais aussi à des données erronées sur la relaxation des câbles, et sur leurs interactions avec la structure. Un mauvais dimensionnement des cadres et de leur espacement pour reprendre les efforts tranchants en béton armé est à l'origine de fissurations des ouvrages qui nécessitent une réhabilitation immédiate. [16]

Des enquêtes statistiques menées par le bureau Sécurité de la SOCOTEC en France sur 2979 dossiers de structures en béton ont montré que le nombre total de sinistres dus à des erreurs de conception ou d'exécution est comme suit : [18]

- **Erreurs de conception :**
 - Erreurs dans le bon choix du matériau constituant l'ouvrage.
 - Erreurs dans le pré dimensionnement des éléments.
 - Négligence totale de la sismicité de la zone.
 - Mauvais choix de la meilleure variante.
 - Absence de l'étude comparative technico-économique.
 - Structure instable.
 - Un tassement.
 - Un manque d'armatures.
 - Une surcharge dont la structure ne peut pas résister.
 - Un manque de joints.

- **Erreurs de calcul (étude) :**
 - Erreurs dans les hypothèses de calcul.
 - Erreurs dans l'introduction des données dans un calcul automatique.
 - Absence d'études.
 - Mauvaise utilisation des règlements.
 - Non vérification des états de service (déformations).
 - Dessins incomplet ou insuffisant.
- **Erreurs d'exécution et de réalisation :**
 - Dispositions défectueuses (notamment dispositions d'armatures) dans certains éléments ou dans la transmission des efforts (environ 2.5%).
 - Désordres résultants de déformations excessives (soit 19.7%)
 - Fautes d'exécution, surtout la confection des éléments en béton armé (15.5%) : Coffrage 2%, Bétonnage 4%, Ferrailage 7%, Décoffrage 0.5%, Causes multiples (généralement bétonnage et ferrailage défectueux) 1.5%.
 - Fausses mains d'œuvre 1.5%.
 - Désordres résultant des effets des variations dimensionnelles 43.7%.
 - Mauvaise qualité du béton (une porosité très élevée) ce qui facilite la circulation des agents agressifs et l'eau.
 - La ségrégation du béton due à la condition de transport du béton frais.

I.3.3.5- Modification des conditions d'exploitation ou d'utilisation des ouvrages :

Il est possible de justifier la nécessité de renforcer ou d'améliorer la portance d'un ouvrage. Les ponts et bâtiments sont appelés à être mis en conformité vis-à-vis des sollicitations sismiques ou vis-à-vis de sollicitations accidentelles telles que l'impact de véhicules.

I.3.4- Dégradations Chimiques :

I.3.4.1- Réactions Alcalis-Granulats (RAG) :

La réaction alcalis-granulats résulte d'une interaction entre les alcalis du béton (provenant du ciment, des additions, des adjuvants, ...) et des granulats potentiellement réactifs (c'est-à-dire sensibles aux alcalis) qui contiennent de la silice réactive (acide silicique) se présentant sous forme d'opale, de calcédoine, de cristobalite, de tridymite et de quartz cryptocristallin. C'est la raison pour laquelle on parle également de réaction alcalis-silice. La RAG entraîne la formation de produits expansifs et notamment d'un gel d'alcalis-silice capable d'attirer l'eau et donc de gonfler. Cela provoquera des contraintes de traction internes au béton qui provoquent une fissuration de ce dernier et, parfois, à la rupture des armatures. [6]

Pour qu'une réaction alcalis-granulats se produise, les conditions suivantes doivent être réunies :

1. Présence de granulats potentiellement réactifs.
 2. Humidification permanente ou régulière de la structure, teneur élevée du béton en alcalis.
- Dans un béton non armé, la RAG se manifeste par un faciès de fissuration plutôt aléatoire. Dans un béton armé ou précontraint, les armatures empêchent la libre dilatation du béton dans le sens des barres d'acier, de sorte que le tracé des fissures épouse celui des armatures sous-jacentes. [7]



Figure I.3 : Dégradations du béton dû à la réaction alcalis-granulats

I.3.4.2- Attaques de sulfates :

Les sulfates en provenance de l'environnement (terres, milieu aqueux) peuvent réagir avec le béton pour former de l'ettringite (sel de Candlot). Une expansion se produit aussi bien durant la phase plastique du durcissement qu'après le durcissement.

Seule l'ettringite secondaire est préjudiciable au béton, les contraintes internes causées par l'expansion entraînant la fissuration et la ruine de la structure. Toutefois, même en l'absence de source extérieure de sulfates, un échauffement excessif du béton en cours de durcissement peut également donner lieu à la formation d'ettringite, notamment lors d'un traitement thermique (destiné à accélérer le développement de la résistance du béton) ou lors du dégagement de la chaleur d'hydratation dans le béton de masse. C'est la raison pour laquelle la température maximale est généralement limitée à quelque 65 °C durant la phase de durcissement. [7]

En décalcifiant les composés primaires de la prise présents dans le ciment durci (C-S-H), les sulfates peuvent aussi altérer la résistance mécanique du béton et donc affecter la stabilité de l'ouvrage.



Figure I.4 : Attaques de sulfates sur le béton

I.3.4.3- Attaques des acides :

Le béton présente un caractère basique élevé induit par les composés hydratés de la pâte de ciment. Il peut donc présenter une certaine réactivité vis-à-vis des solutions acides telles que les pluies acides, les eaux naturelles chargées en dioxyde de carbone, les eaux résiduaires, les eaux des industries agroalimentaires ou industrielles contenant des acides organiques, les eaux chargées en acides minéraux, mais aussi les eaux pures. [7]



Figure I.5 : Attaques des acides

Le fait qu'il soit basique il réagit suivant la réaction : $\text{Base} + \text{acide} = \text{sel} + \text{eau}$.

La nocivité d'un acide dépend de la solubilité du sel qu'il forme lors de la réaction avec les hydrates du ciment.

Les attaques acides se font principalement suivant un mécanisme de dissolution. Ce mécanisme peut être accompagné de la précipitation du sel formé lors de la réaction de base+acide si le sel est peu soluble. Ce sel peut avoir un effet colmatant et ralentir les réactions de dissolution. [8]

Le produit final de dégradation par un acide peut être un gel de silice résultant de la décalcification totale des C-S-H qui, selon Grube et al. [8], peut avoir un rôle protecteur à la surface du béton et ralentir les réactions.

I.3.4.4- Lixiviation :

Dans une structure en béton exposée à l'air ambiant, l'eau ne s'évapore que sur une épaisseur limitée à quelques centimètres.

Lorsque le béton est en contact de manière prolongée avec l'eau, les pores sont saturés. Dans la phase liquide interstitielle du béton, des ions en provenance du milieu extérieur peuvent transiter. En fonction de la nature des éléments chimiques qui pénètrent dans le matériau, il peut en résulter des réactions chimiques de dissolution/précipitation et donc une lixiviation progressive des hydrates.

Malgré la complexité des réactions chimiques générées par les eaux agressives, l'application de quelques principes de prévention élémentaires respectés au niveau de la formulation du béton (formulation adaptée, dosage en ciment adéquat, E/C faible, béton compact et peu perméable), de la conception de l'ouvrage et lors de sa réalisation (vibration, cure) permettent d'obtenir des bétons résistants durablement dans les milieux agressifs. [7]



Figure I.6 : lixiviation

I.3.5- Dégradations physiques :

I.3.5.1- Cycles de gel-dégel :

En l'absence de mesures appropriées, le bétonnage en période hivernale peut donner lieu à des dégâts de gel. La formation de glace conduit en effet à la dilatation de l'eau présente dans le béton frais.

Dans un béton encore plastique, ce gonflement s'opère librement, une fois durci, le béton ne présentera aucun dégât apparent, mais sera de mauvaise qualité. Dans un béton jeune déjà durci, le gonflement est entravé et des tensions internes apparaissent.

Un béton durci peut, lui aussi, être endommagé par l'action du gel, en se dilatant, l'eau présente dans les pores et les fissures provoquent des tensions susceptibles de provoquer ou d'aggraver des fissures. La sensibilité au gel du béton durci dépend dans une large mesure de sa structure poreuse et des dimensions des fissures. Le risque de dégâts de gel est plus important sur des dalles ou des plans horizontaux que sur des surfaces verticales, les pores étant davantage saturés en eau. [9]

I.3.5.2- Sels de déverglage :

Les sels de déverglage employés pour faire fondre la glace provoquent une réaction endothermique, c'est-à-dire, une réaction au cours de laquelle le milieu environnant cède une partie de sa chaleur. En l'occurrence, la chaleur est prélevée dans la couche superficielle du béton qui, en raison de la chute brutale de température, subit un choc thermique et s'expose ainsi à un risque d'écaillage. Le risque de dégradation par le gel est encore accru lorsque des précipitations neigeuses prolongées alternent avec des épandages de sels et que la couche superficielle du béton peut se trouver saturée en eau. La nature des sels de déneigement peut également avoir une incidence sur le processus de dégradation observé

Par ailleurs, les ions chlore des sels de déverglage peuvent engendrer un risque de corrosion pour les armatures. [9]



Figure I.7: dégradation due aux sels de déverglage

I.3.5.3- Dégradations liées à la corrosion des armatures :

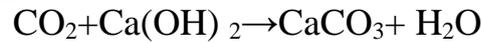
I.3.5.3.1- La carbonatation :

La carbonatation du béton est un phénomène indissociable de ce matériau de construction. Pendant la durée de vie de l'ouvrage, le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère pénètre dans le béton à partir de la surface du matériau. Il peut alors réagir avec les produits résultant de l'hydratation du ciment. La carbonatation modifie progressivement la composition chimique et la microstructure interne du béton. Durant la vie de l'ouvrage, le béton piège ainsi

du dioxyde de carbone à hauteur de 10 à 15 % émis lors de la décarbonatation du calcaire nécessaire à la fabrication du ciment.

Les ingénieurs ont, au cours du vingtième siècle, appris à maîtriser certaines conséquences problématiques du phénomène de carbonatation.

Des résultats récents montrent qu'il est alors possible de recapter jusqu'à 50 à 60 % de CO₂ supplémentaire. Par ailleurs, cette carbonatation est particulièrement favorable à une amélioration de la qualité du granulat recyclé issu du béton de démolition, facilitant ainsi sa réutilisation. [10]



Les paramètres qui influent sur la cinétique de carbonatation sont :

- La porosité du béton qui conditionne la résistance du matériau à la diffusion du CO₂.
- La teneur en hydrates carbonatables : plus elle est élevée, plus le béton est capable de freiner la pénétration du front de carbonatation.
- La microstructure du matériau qui conditionnera la cinétique de pénétration du phénomène. C'est alors essentiellement la perméabilité à l'eau liquide du matériau qui sera un indicateur de durabilité pertinent. [7]

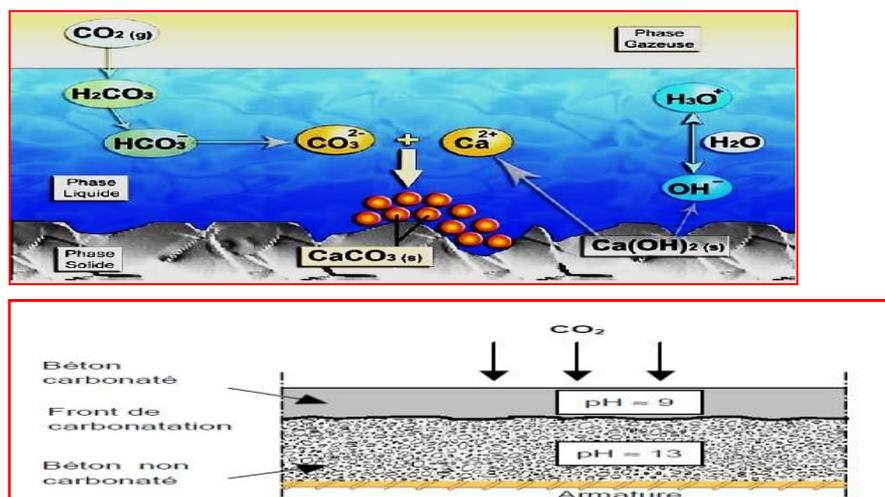


Figure I.8 : Phénomène de carbonatation

I.3.5.3.2- La corrosion :

❖ Aspect physico-chimique de la corrosion :

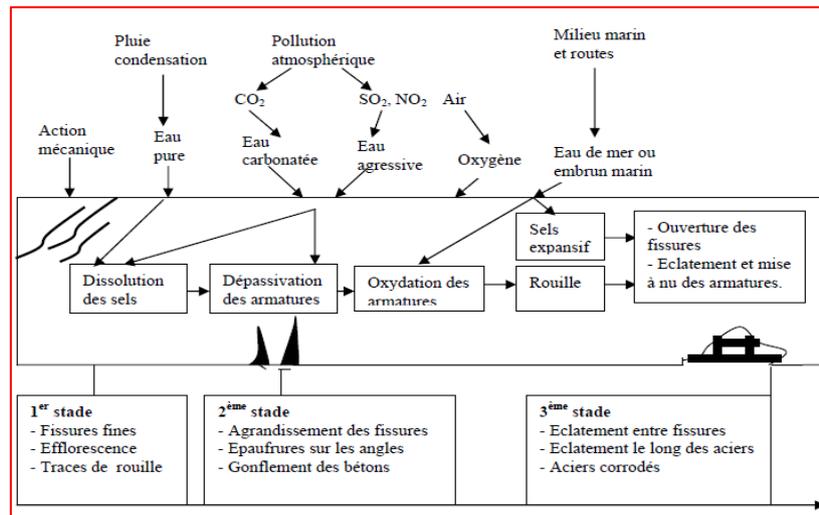


Figure I.9 : Aspect physico-chimique de la corrosion

Avant d'être placée dans le coffrage, une armature en acier est rouillée, parce qu'elle a d'abord été exposée à l'atmosphère. Lorsque le béton frais est mis en place autour de cet acier, l'eau de gâchage pénètre à travers les pores de la rouille. Cette eau réagit avec l'acier et forme sur celui-ci une fine couche d'hydroxydes de fer $\text{Fe}(\text{OH})_2$ et de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Tous ces produits au voisinage de l'acier donnent à la solution interstitielle du béton un PH élevé, de l'ordre de 13 qui permet d'assurer la protection de l'acier par passivation. Une telle protection disparaît si la teneur en chlorure dépasse un certain seuil ou si la profondeur de carbonatation dépasse l'enrobage.



Figure I.10 : phénomène de corrosion des armatures d'un béton armé

❖ Phases de la corrosion :

La durée de vie d'un ouvrage en béton armé vis-à-vis de la corrosion des aciers est souvent décrite à travers les étapes suivantes :

- Phase d'initiation : c'est le stade durant lequel les agents agressifs, tels que le dioxyde de carbone ou les chlorures, présents dans le milieu environnant, pénètrent dans le béton.
- Phase de propagation : cette phase commence lorsque ces agents agressifs se trouvent à des concentrations fortes au niveau des armatures. Cette phase correspond à la croissance de la rouille, qui peut ensuite faire éclater le béton d'enrobage.

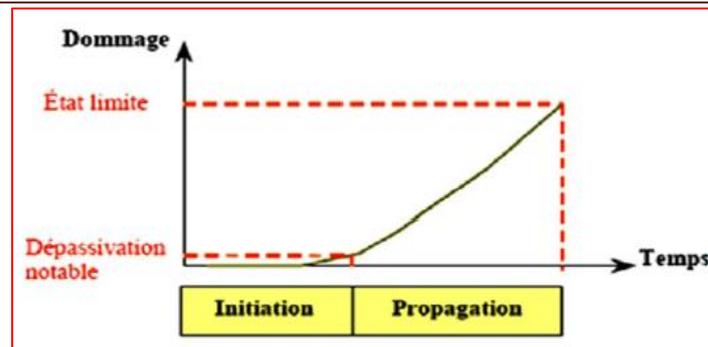


Figure I.11 : graphe représentant les étapes de corrosion d'un ouvrage en béton armé

❖ Causes de la corrosion :

On distingue principalement deux facteurs favorisant l'apparition de la corrosion dans le béton armé. Tout d'abord, il y a la carbonatation du béton, lorsque le pH du béton descend en dessous de 9 les armatures ne sont plus passivées. Ce phénomène est occasionné par la réaction entre les hydrates de la pâte de ciment et le CO₂ atmosphérique. L'autre facteur est la teneur en chlorures, lorsqu'elle dépasse un certain seuil il y a dépassivation.

❖ Conséquences de la corrosion sur les ouvrages :

Les conséquences sur les ouvrages touchés par la corrosion :

- Simples salissures de rouilles sur les surfaces.
- Piqures plus ou moins fournies et plus ou moins profondes.
- Fissures plus ou moins ouvertes le long des traces des armatures.
- Décollement de béton de surface.
- Consommation de l'acier plus ou moins intenses. [11]

I.3.5.4- Les fissures :

La fissure est une fente visible affectant la surface d'une maçonnerie, d'un dallage, d'un appareil sanitaire, etc.

Par convention, la fissure a entre 0.2 et 2mm de largeur, au-dessous de cette valeur il s'agit d'un faïençage, au-dessus, la fissure est une lézarde.

Dans leur majorité, les fissures n'ont qu'un inconvénient esthétique. Elles sont graves si elles portent atteinte à l'imperméabilité des parois, si un affaissement des fondations se produit, ou des mouvements du sol. Il est important de souligner qu'il est impossible aujourd'hui d'éviter la fissuration du béton armé, que ce soit lors de la mise en œuvre, due par exemple au retrait de dessiccation ou sur le béton durci, due au vieillissement du matériau.[12]



Figure I.12 : représentation de fissures visibles sur la surface d'un béton

❖ Types de fissures :

Parmi les différents types de fissures, on distingue principalement trois catégories :

- Le faïençage : c'est un réseau de microfissures affectant la couche superficielle du béton.
- Les microfissures : ce sont des fissures très fines dont la largeur est inférieure à 0,2 mm.
- Les fissures : ce sont des ouvertures linéaires au tracé plus ou moins régulier dont la largeur est d'au moins 0,2 mm.

❖ Classement des fissures :

Il est possible de classer les fissures en trois catégories selon leur évolution :

- Les fissures passives ou mortes.
- Les fissures actives.
- Les fissures évolutives.

❖ Causes des fissures :

Les causes des fissures sont nombreuses, mais peuvent être répertoriées en quatre catégories :

- 1- Les causes dues aux propriétés des matériaux.
- 2- Les causes externes directes, avec les déformations excessives sous l'action des charges, des déformations sous l'action des variations de température ou sous l'action de l'humidité.
- 3- Les causes externes indirectes, tels que les tassements différentiels des fondations.
- 4- Les causes dues à un phénomène de corrosion des armatures. [12]

I.3.5.5- Retrait du béton :

Le retrait du béton est la traction d'un matériau provoquée par l'élimination de l'eau de gâchage excédentaire dans la formulation, pour assurer des conditions d'ouvrabilité acceptables qui se traduit par des variations dimensionnelles du béton mettant en jeu des phénomènes physiques avant, pendant ou après la prise des bétons.

Les tensions internes provoquées par les retraits ont pour effet soit de réduire les dimensions extérieures des matériaux, soit de les déformer, soit de provoquer leur rupture.

Le retrait des bétons et mortiers de ciment commence par un retrait plastique, puis intervient le retrait hydraulique.

Lorsque la concentration du ciment est importante, le retrait du béton ou du mortier est d'autant plus important.

Les types de retrait sont : [13]

- **Le retrait plastique** : en relation avec des déformations par tassement général du béton frais, déformations qui peuvent être gênantes et créer une fissuration de surface.
- **Le retrait de dessiccation** : est lié au séchage qui se manifeste avant, pendant et après la prise du béton. La fissuration qui en résulte est due à la dépression capillaire qui se produit lorsque des ménisques d'eau se forment dans les pores capillaires du béton frais.
- **Le retrait thermique** : est lié au retour à température ambiante des pièces en béton, ayant subi une augmentation de température causée par les réactions exothermiques de déshydratation du ciment. Ce type de retrait, qui ne concerne que des pièces d'épaisseur supérieur à 60 à 80 cm, se manifeste de quelques dizaines d'heures après la mise en œuvre.
- **Le retrait d'auto-dessiccation** : est lié à la contraction du béton en cours d'hydratation. Le phénomène conduisant à la contraction, est dû à des forces de traction capillaires internes, similaires à celles responsables du retrait plastique. Ce dernier type de retrait concerne plus particulièrement les bétons à hautes performances

(BHP) ou à très hautes performances (BTHP). Il devient négligeable pour les bétons ordinaires.

I.3.5.6- Epaufrure :

L'épaufrure est un défaut de surface généré par les ondes de choc ou les intempéries, elles correspondent à un éclatement du béton avec chute de fragment, laissant souvent les armatures apparentes, elles sont généralement la suite logique d'un écaillage. [14]



Figure I.13 : Epaufrures causées par le choc dans la construction

I.3.5.7- La ségrégation :

Phénomène de séparation des constituants d'un béton frais, qui peut être provoqué par un malaxage insuffisant ou par une vibration excessive. [14]



Figure I.14 : dommages sur le béton engendrés par la ségrégation

I.3.5.8- Le ressuage :

Le ressuage est un type spécial de ségrégation, où les particules solides ont un mouvement général inverse à celui du liquide. L'eau est chassée vers le haut dans le cas des coffrages imperméables. Que le ressuage se présente sous sa forme normale ou localisée, une pellicule d'eau claire apparaît à la surface du matériau. Cette pellicule d'eau a des conséquences sur la qualité du béton, qui peuvent être positives ou négatives selon la caractéristique considérée.

Les raisons du ressuage des bétons sont : [15]

Pratiquement, tout béton fraîchement mis en place ressuie. Les bétons avec une teneur en eau élevée sont davantage sujets au ressuage que les bétons dont le rapport E/C bas.

Pour que le béton puisse être aussi dense que possible, les particules fines du mélange doivent migrer dans les vides, se trouvant entre les particules plus grosses. Ce processus est déclenché par le malaxage, la vibration ou une autre méthode de compactage.



Figure I.15 : Effet du Ressuage sur le béton

I.3.5.9- Altération d'origine sismique :

Les séismes sont les résultats de rupture des sols et des mouvements vibratoires qui font exciter les structures par le déplacement des fondations. Ces mouvements, variables dans le temps, ont une durée courte, et soumettent les structures à des champs d'accélération et à des déplacements imposés.

I.3.5.10- Les chocs et les incendies (accidentels) :

Les incendies provoquent des dégradations et des endommagements significatifs pour les armatures et le béton. La température du béton augmente à cause de l'incendie (une température supérieure à 700° C). Par ailleurs, les transformations irréversibles sont dues aux constituants du béton. Cela conduit à des fissurations et des éclatements dans le béton du a la vaporisation brutale de l'eau qui provoque des contraintes importantes étant donné que le béton est peu perméable. [19]



Figure I.16 : Eclatement de l'enrobage du a un incendie et au choc

I.3- Méthodologie du diagnostic :

I.4.1- Introduction :

La première étape à franchir pour intervenir efficacement sur un ouvrage en béton consiste à déterminer les causes des dommages existants. Si, un phénomène qui provoque la détérioration du béton n'est pas contrôlé, ou si son diagnostic est incorrect, il est fort probable

qu'il affecte aussi le béton de réparation. Une identification incorrecte de la source du problème se traduit alors par des interventions coûteuses, infructueuses et récurrentes, ce qui n'est certainement pas intéressant du point de vue de la durabilité des travaux et des budgets, parfois limités.

Il est donc important de mettre en place un diagnostic afin de préciser convenablement dans un délai adéquat l'origine de ces endommagements et les opérations nécessaires d'entretien. Ceci permettra d'avoir un diagnostic général qui va nous tenir à jour d'une connaissance suffisante de l'état de dégradation, et par conséquent, de faciliter le choix postérieur des actions et des matériaux requis lors de l'intervention sur la structure.

I.4.2- Définition du diagnostic :

Le diagnostic d'un ouvrage c'est l'ensemble des investigations nécessaires pour définir son état de santé et ses conséquences, ainsi que l'origine et l'étendue des désordres constatés.

Il permet de vérifier le respect des conditions de sécurité et d'utilisation, qui sont définies par la réglementation.

En général une analyse diagnostic reste une approximation d'une précision plus ou moins exact où il est rarement dans le cas d'obtenir un ensemble des données exhaustif. [20]

I.4.3- Choix de l'investigation :

Le choix des investigations dépend de : [20]

- Type de mission à réaliser : Diagnostic de maintenance en vue d'éventuelles réparations.
- Nature des matériaux : Le matériel et les techniques utilisés pour réaliser le diagnostic ne sont pas les mêmes si l'on a 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.

I.4.4- Les étapes du diagnostic :

Les étapes d'un diagnostic sont :

I.4.4.1- Examen visuel :

L'examen visuel est une investigation qui est plus économique et plus simple. Il faut utiliser avec prudence les informations recueillies qu'important leurs origines, et ne pas les considérer comme une base pour la manière du diagnostic. Elles sont obtenues par : [21]

- La localisation et l'identification des zones fortement sollicitées.
- une prise des photos.
- La localisation des fissures.
- Une observation sur les zones critiques : appuis, joints, etc...

I.4.4.2- Mesures sur site :

Une détermination des caractéristiques des structures doit être faite sur place pour savoir le niveau d'existence, la résistance et la dureté du béton, la position des armatures et le degré de corrosion. Les différentes mesures dans le site sont : [24]

a) Mesures sur le béton :

- Le scléromètre :

Cet instrument permet de mesurer la dureté superficielle et l'homogénéité de la résistance du béton. Il n'est pas très pratique car il faut faire une quinzaine d'essais pour chaque zone testée afin d'obtenir une valeur moyenne représentative. La surface de mesure doit être nette, et ne doit pas présenter des écaillages, des nids de gravier ou des textures grossières.



Figure I.17 : le scléromètre

- Carottage :

Le carottage est le prélèvement d'une carotte du béton pour l'analyser en laboratoire. Le carottage peut être fait au sec ou à la présence de l'eau. Cette analyse aide pour :

- L'identification et la détérioration des agrégats.
- L'homogénéité du béton.
- La réparation des fissures.
- La résistance à la compression et la module d'élasticité.
- La profondeur d'une éventuelle carbonatation.



Figure I.18 : Prélèvement de carottes

- Détecteur des fissures :

- Fissuromètre : Permet de suivre l'évolution d'une fissure sur un plan ou dans un angle.



Figure I.19 : Fissuromètre

- Extensomètre : Permet de mesurer la déformation linéaire d'un élément de structure.



Figure I.20 : Extensomètre

- Hygromètre : Permet d'évaluer l'humidité, en surface et en profondeur sur les parois de béton. L'hygromètre permet de mesurer le taux d'humidité en profondeur de façon non destructive par une méthode basé sur la radiofréquence.



Figure I.21 : hygromètre

- L'auscultation par ultrasons : Cette méthode permet d'estimer la résistance d'un béton ou de détecter la présence de microfissures interne, c'est une corrélation entre la résistance, la vitesse du son VL, la compression Rc, et le module d'élasticité.



Figure I.22 : Appareil à ultrasons

b) Mesure sur les armatures :

Les détecteurs d'armatures :

Ces appareils permettent de détecter la présence d'armatures, leur position et leur diamètre. Ils fonctionnent par effets magnétiques ou électromagnétiques mais la profondeur d'investigation reste limitée à une dizaine de centimètres. Il y a trois types de détecteurs :

- Le pachomètre et le profomètre : Utilisé pour la détermination précise de la position et du diamètre des armatures dans le béton.
- Le corrosimètre : Détecteur de corrosion d'armatures des ouvrages avant l'apparition de dommages visibles, en mesurant le potentiel de surface du béton.

- La radiographie : Ce procédé permet de réaliser des clichés radiographiques du béton, son coût est relativement élevé compte tenu du matériel nécessaire (source radioactive) et surtout des mesures de protection à mettre en place, la gammagraphie fournit des information multiple et très précises sur les armatures et les défauts internes du béton :

I.4.4.3- L'analyse technique des éléments recueillis :

L'analyse des informations et les données collectées, doit permettre d'interpréter les constats effectués en vue de formuler des conclusions. [22]

Les modes d'analyse font appel à plusieurs types d'opérations :

- **Le calcul** : Il permet notamment de déterminer la capacité portante des structures ainsi que les zones critiques au niveau des éléments structuraux.
- **Le recoupement** : C'est la recherche de la cohérence ou de l'incompatibilité entre les données ou les informations portant sur un même aspect, mais provenant de sources différentes. Cela permet de consolider la validité de certaines hypothèses et d'en écarter d'autres.
- **La comparaison** : Il s'agit de repérer les ressemblances et les écarts permettant souvent, d'extrapoler ou d'exclure des résultats de données ou d'informations. Cela permet de hiérarchiser les différentes constatations.
- **L'évaluation et la vérification** : C'est une estimation qualitative. Elle s'appuie sur des recoupements, des calculs ou des comparaisons. Les étapes de l'évaluation peuvent être conduits par : «un examen du dossier d'ouvrage et un examen pour l'état actuel de l'ouvrage ».

I.4.4.4- La formulation de recommandation :

Après que l'évaluation de la structure soit faite, les observations visuelles et autres données de support sont utilisées pour déterminer le ou les mécanismes à l'origine du problème. Depuis que de nombreuses lacunes sont causées par plus d'un mécanisme, une compréhension de base des causes de détérioration du béton est nécessaire pour déterminer ce qui s'est réellement passé.

Cette évaluation est cruciale et est souvent le facteur décisif entre le succès ou l'échec d'une réparation. [22]

I.4- Réparation et renforcement des structures :

I.5.1- Introduction :

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

I.5.2- Définitions :

I.5.2.1- Réparation :

La réparation d'une structure est une opération qui consiste à lui restituer, par des travaux appropriés, un niveau de service perdu, la baisse du niveau de service peut résulter de toutes sortes de causes, les plus fréquentes sont la dégradation progressive des matériaux (agressions atmosphériques, modification des propriétés des matériaux), l'utilisation intensive voir abusive, les accidents et sinistres (incendies, choc, séisme, ...). [23][24]

I.5.2.2- Renforcement :

Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service et en particulier l'augmentation de la ductilité et de la résistance d'un élément de structure pour en permettre l'utilisation dans des conditions non prévues à l'avance pendant la phase de conception et de calcul. [23][24]

Parmi les nombreuses techniques de renforcement, les plus courantes sont l'incorporation de profils en acier, collage d'éléments préfabriqués, adjonction de platines en acier (Azizinamini A. et al. 1992), adjonction de lamelles ou bandes de matériaux composites (Khalifa A. et al. 2001) [25], renforcement par la technique NSMR.

Un renforcement peut être associé à une réparation.

I.5.2.3- Réhabilitation

C'est apporter le confort des normes d'aujourd'hui, en employant les techniques et les matériaux actuels. Les changements d'aspect extérieur et les changements de destination nécessitent des autorisations d'urbanisme (renseignement en mairie).

Contrairement au neuf, en réhabilitation, il faut composer avec l'existant et parfois savoir revoir le programme. [21]

I.5.3- Caractéristiques des produits de renforcement :

Les produits de renforcement utilisés doivent posséder les qualités suivantes : [26]

- a) Présenter une compatibilité avec le support béton à savoir :
 - Un retrait limité pour des liants hydrauliques employés.
 - Une adhérence au béton support et une résistance au moins égale à la résistance du béton renforcé.
 - Une adhérence aux armatures métalliques initiales ou rajoutées.
 - Des résistances mécaniques à la compression, à la traction, similaire ou supérieures à celles du béton de support.
 - Un coefficient de dilatation le plus proche possible de celui du béton support.
- b) Présenter une durabilité par rapport aux conditions environnementales. Et prendre en compte les principaux agents agressifs participant au phénomène de corrosion des armatures (chlorures, sulfates, gaz carbonique, oxygène)

I.5.4- Méthodes de renforcement/réparation :**I.5.4.1- Méthodes classiques :**

I.5.4.1.1- Chemisage :

L'utilisation des gaines convient particulièrement à la réparation des poteaux, des piles et des pieux détériorés. Cette technique consiste à reconstituer la section d'un élément en service en le gainant de béton. Il n'est pas nécessaire que l'élément d'origine soit lui-même en béton, il est possible de gainer des sections en acier ou en maçonnerie.

Les travaux de préparation des surfaces avant l'opération ont une importance primordiale. Le coffrage de la gaine doit être muni de cales d'espacement destinées à prévoir un vide entre le coffrage même et la surface du béton ou matériau initial. Ce coffrage peut être temporaire ou permanent. Il peut être en bois, en acier ou en béton préfabriqué, selon sa destination et les conditions d'exploitation. [27]

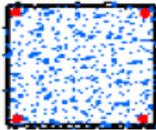
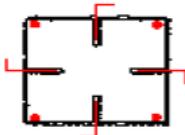


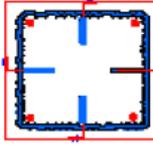
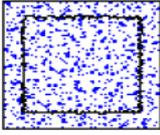
Figure I.23 : mise en place des armatures de renforcement avec augmentation de la rugosité du poteau

Le chemisage en béton armé exige une préparation d'interface pour obtenir un bon lien entre la nouvelle colonne et l'ancienne, ce qui donne un effet monolithique.

Alors une augmentation de la rugosité de la surface est demandée, suivie de l'application d'agent de liaison. Plusieurs méthodes sont utilisées pour augmenter la rugosité de l'interface : sablage, « electrichammering », etc.

Tableau I.1 : Etapes de chemisage en béton armé

Etapes de chemisage en béton armé	Schémas
1) Nettoyage et sablage du support initial de béton du poteau.	
2) Enclavage et scellement de chevilles pour fixer les armatures additionnelles.	

3) Fixation des armatures additionnelles sur les tiges d'ancrage.	
4) Etalage d'une couche époxy sur la surface du béton primitif.	
5) Coulage de l'enveloppe en béton.	

I.5.4.1.2- Injection :

C'est une opération qui consiste à faire pénétrer dans des fissures un produit susceptible de créer une liaison mécanique et/ou une étanchéité entre les parties disjointes. [28]

Les éléments en béton armé endommagés dont les fissures sont stables et qui ont une largeur comprise entre 0,2mm et 2mm peuvent être réparés par la technique d'injection de résine. Il est bien entendu que le béton des zones fissurées n'est ni disloqué ni écrasé.

Les éléments dont les fissures dépassent 2mm de largeur peuvent être réparés par injection de mortier époxydique.



Figure I.24 : Méthode d'injection

I.5.4.1.3- Adjonction d'armatures complémentaires :

Des armatures complémentaires sont à prévoir lorsqu'il s'agit de remplacer des aciers corrodés ou coupés accidentellement. Cette solution peut également être envisagée lorsqu'il s'agit de renforcer une structure. Les armatures existantes conservées doivent faire l'objet de soins de manière à éviter la poursuite de leur dégradation.

Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration, et participer à la résistance des sections renforcées. Elles peuvent s'inscrire dans la géométrie de l'élément. La protection des armatures en surépaisseur est assurée par un béton coulé ou projeté.

Dans tous les cas, un enrobage minimal égal au diamètre des barres est nécessaire. [29]

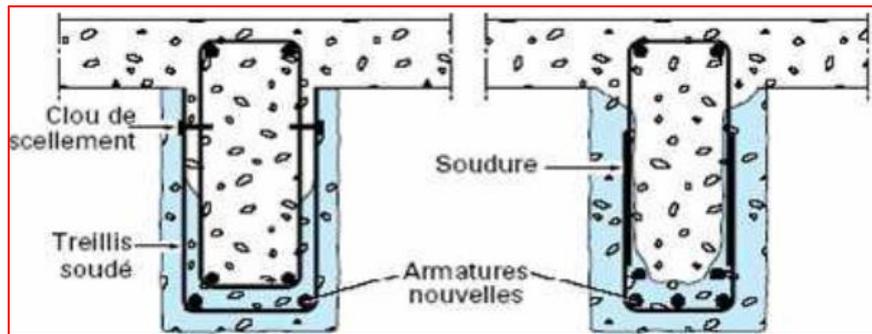


Figure I.25 : Adjonction d'armatures complémentaires

I.5.4.1.4- Béton projeté :

Cette technique très utilisée tant pour le renforcement de structures insuffisantes ou défaillantes que pour la réparation d'ouvrages endommagés, exige pour sa mise en œuvre un personnel spécialisé. Le béton projeté peut être combiné avec l'adjonction d'armatures complémentaires. [16]

La projection est réalisée soit par voie sèche, soit par voie mouillée.

Après durcissement, le béton projeté possède les propriétés d'un béton coulé puis vibré. La projection est possible dans toutes les directions et, en particulier, en plafond.

❖ Projection par voie sèche :

La vitesse des éléments du mélange à la sortie de la lance est de l'ordre de 100m/s. elle décroît plus rapidement pour les éléments de faible masse que pour les gros granulats. Il se forme alors sur la surface d'application une fine couche de pâte formée par l'eau et le ciment, qui retient instantanément les granulats fins, mais sur laquelle les gros granulats commencent par rebondir, au fur et à mesure de son épaissement, cette couche est « martelée » par les gros granulats qu'elle finit par retenir, ce qui donne:

- Un serrage énergétique dû à la grande vitesse de projection.
- Une bonne adhérence due à la richesse en ciment dans la zone au contact de la surface d'application.

Du fait de l'enrichissement en ciment au voisinage de la surface, le dosage initial en ciment peut être limité.

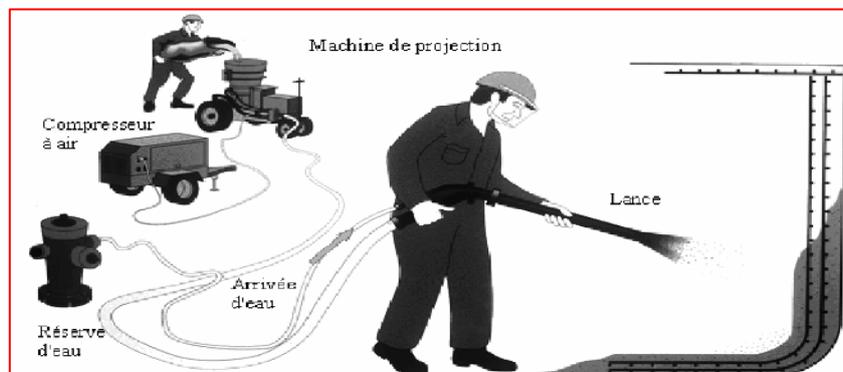


Figure I.26 : technique de projection par voie sèche

❖ Projection par voie mouillée :

La vitesse de transport et de projection est inférieure à 1m/s, nettement plus faible que dans le cas d'une projection à voie sèche. Le mélange ayant sa composition définitive au passage de la lance, il n'y a pas de surdosage dans la zone de contact avec la surface d'application.

Pour obtenir des performances mécaniques équivalentes à celles d'un béton projeté par voie sèche, il est nécessaire d'augmenter le dosage en ciment. L'emploi d'adjuvants permet d'obtenir la maniabilité désirée, avec un dosage en eau aussi faible que possible, une telle consistance du béton exigera un affaissement au cône correspondant, de l'ordre de 12 cm. [29]

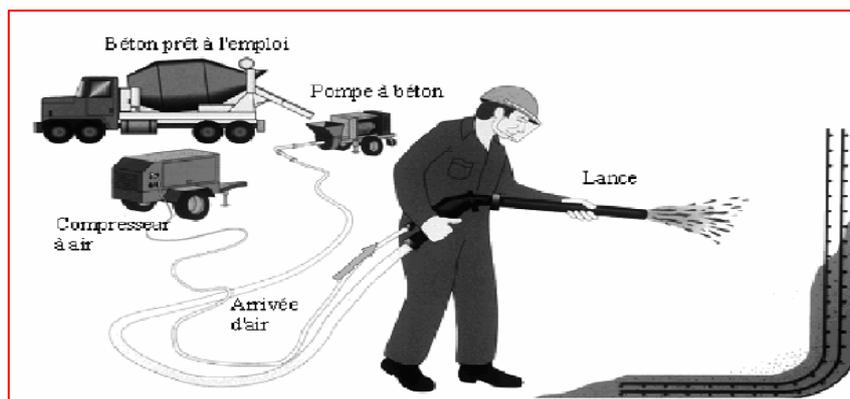


Figure I.27 : technique de projection par voie mouillée

❖ Avantages des deux méthodes :

a) Par voie sèche :

- possibilité d'utiliser des granulats de grande dimension (15 à 20 mm)
- Un dosage relativement faible en ciment.
- Un faible rapport E/C.
- Un compactage énergique
- Une bonne adhérence sur le support.
- Une pénétration en grande profondeur dans les pores.
- Une éventuelle projection en plafond sans accélérateur de prise

b) Par voie mouillée :

- Composition uniforme de la couche projetée
- Pas de rebondissement violent.
- Pas de production de poussières. [33]

❖ Inconvénients des deux méthodes :

a) Par voie sèche :

- Pertes de volume du béton projeté importantes par rebondissement.
- Production de poussières.

b) Par voie mouillée :

- Dosage en eau et en ciment plus élevé pour assurer une plasticité nécessaire.
- Compactage faible.
- Nécessité d'accélérateurs de prise. [33]

I.5.4.1.5- Tôles collées :

Ce procédé est un apport d'armatures extérieures, soit pour consolider un élément dont les dégradations mettent en péril sa résistance, soit pour remplacer des aciers oubliés, ou mal positionnés. C'est une technique économique qui modifie peu l'aspect et les dimensions de la

structure à réparer. La préparation des surfaces, la mise en œuvre des colles et la réalisation du placage, doivent impérativement être confiées à des entreprises spécialisées.

Le nombre de réparations de ce type est assez faible. En effet, d'une part il faut que le béton soit de qualité pour que les efforts puissent passer convenablement du béton aux tôles. [30]

I.5.4.1.6- Précontrainte additionnelle :

Une insuffisance de résistance vis-à-vis de la flexion, ou l'effort tranchant d'une structure en béton armé peut être compensée par une précontrainte additionnelle. Ainsi, les sections, soumises au départ à une sollicitation de flexion simple, sont amenées à supporter une sollicitation de flexion composée.

Cette technique consiste à renforcer une structure à l'aide de câbles de précontrainte ou de torons gainés 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, que doit supporter la structure suite à des modifications des conditions de chargement ou d'utilisation. [29]



Figure I.28 : technique de précontrainte additionnelle

❖ Avantage :

- Une compensation partielle ou complète des actions de charges.
- Une économie appréciable des matériaux.
- Les grands portés sont réparables.
- Une réduction des risques de corrosion. [23]

❖ Inconvénients :

- La nécessité de matériaux spécifiques (comme les vérins).
- La nécessité de main d'œuvre qualifiée.
- La nécessité d'équipements particuliers.
- Risque de rupture à vide par excès de compression.

Un calcul relativement complexe. [23]

I.5.4.2- Méthodes nouvelles :

I.5.4.2.1- Techniques de renforcement par matériaux composites :

Les matériaux composites utilisés pour le renforcement se présentent sous la forme de tissus ou de plaques stratifiées. Les comportements observés avec ce type de renforcement, sont plus performants, que le renforcement en tôles d'acier. Les expériences menées jusqu'à présent, montrent l'utilisation des matériaux composites en fibres de verre, de carbone ou d'aramide.

Ainsi, l'amélioration de la durée de vie de l'ouvrage est due aux propriétés des composites : la rigidité, la résistance mécanique, la résistance à la corrosion. De plus, ces matériaux permettent une conception du renfort plus adaptée au besoin de la structure grâce à des procédés qui se prêtent bien à la notion de réparation. La plupart des activités de recherche utilise le FRP pour le renforcement de poutres en béton armé pour augmenter leur capacité de flexion. Vis-à-vis des renforcements au cisaillement, les recherches récentes sont très largement conduites sur des poutres de section en T par la méthode de collage externe. On peut effectuer avec les PRF un renforcement en flexion en collant les bandes sur la surface inférieure de la poutre. Un renforcement en cisaillement peut être apporté par le collage des bandes sur les joues de ces mêmes poutres. [31]

❖ Définition de PRF :

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

Les matrices utilisées sont généralement d'origine pétrolière, on peut citer notamment les résines polyester therm durcissable, les résines époxydes, les résines vinylester ou encore les résines thermoplastiques (polyamides...).

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

❖ Avantage :

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

❖ Inconvénients :

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

I.5.4.2.2- Méthode de renforcement par bar NSM « Near-surface mounted » :

Dans le cas de la méthode de collage externe, la ruine des poutres apparaît par le décollement du composite dans la plupart des tests. Le problème est que la surface de connexion entre béton et composite est insuffisante. Pour éviter le problème du décollement du FRP dans la méthode EB, la méthode NSM a été développée. Des rainures sont créées sur la surface de

renforcement de la poutre, des bandes ou barres FRP sont mises dans les rainures et sont collées au béton par une résine époxy.

Avec cette méthode, le FRP est lié avec le béton sur deux faces, donc la liaison entre le FRP et le béton est grand et le décollement du FRP est limité.

Le décollement du composite est limité dans la méthode NSM, mais les expérimentations ont montré une séparation de la couche du béton de protection sur la zone renforcée, dans le mode de rupture des poutres renforcées. Le processus de renforcement au cisaillement de poutres en béton armé par la méthode NSM est réalisé par les étapes suivantes : [32]

- La position des entailles est définie sur la surface de renforcement, les entailles sont coupées à l'aide d'une tronçonneuse avec la profondeur qui correspond à la conception.

Cette étape est réalisée soigneusement pour ne pas couper les armatures longitudinales.

- Les entailles sont nettoyées à l'air comprimé, pour enlever toutes les poussières et assurer la bonne adhérence entre béton et résine époxy.

- Les entailles sont remplies à 2/3 de la profondeur par de la résine époxy.

- Les bandes de renforcement FRP sont insérées dans les entailles remplies, et enfoncées avec une pression suffisante pour assurer qu'elles soient bien en place, et qu'il n'y ait pas de vides autour des plaques.

- La résine époxy est ajoutée pour remplir complètement les entailles.

I.5.4.2.3- Renforcement des éléments structuraux : [29]

a) 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, en plus de l'augmentation de la ductilité comparé à la colonne sans composites.

b) Renforcement des poutres :

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

c) Renforcement des dalles :

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

d) Renforcement des murs

Seulement quelques cas d'application de matériaux composites destinés au renforcement de murs ont été publiés. Le plus documenté d'entre eux concerne un immeuble à appartement de six étages à Zurich, en Suisse (Steiner, 1996). Étant donné que le bâtiment a été construit en 1930 et converti en bâtiment à bureau avec certaines modifications au niveau de son système de résistance latérale, le système structural a donc été réévalué. L'utilisation des matériaux composites s'avérait donc très utile. Avec les composites, la ductilité du mur a été augmentée à un coût relativement faible et dans des délais très raisonnables.

I.5- Conclusion :

Le présent chapitre porte sur la pathologie du béton et les différents types de désordres affectant les structures en béton armé ainsi que leurs causes. Une connaissance aussi précise que possible des mécanismes des dégradations des matériaux, et perte de performance ou de comportement, sont dus à plusieurs facteurs qu'on ne peut maîtriser. Ainsi la notion de la

structure parfaitement durable est une notion irréalisable. Cette vulnérabilité des structures nous exige le recours à une bonne technique de diagnostic et d'auscultation à travers le cycle de la vie de l'ouvrage.

A cet effet la compréhension des mécanismes de dégradation nécessite la maîtrise des méthodes de surveillance, de détection des causes et des pathologies.

Par ailleurs, cette synthèse nous a aussi permis de nous intéresser aux méthodes de réparation et de renforcement. L'utilisation de matériaux composites connaît un essor remarquable, suite à leurs performances mécaniques, plusieurs techniques de renforcement de structures en génie civil utilisent ces matériaux et sont ainsi proposées et développées.

CHAPITRE II : Matériaux composites

II.1- Généralités :

II.1.1- Introduction :

Les matériaux composites disposent d'atouts importants en comparaison avec les matériaux de constructions traditionnels.

L'avantage des matériaux composites sont : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de forme. Leurs propriétés permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements. 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 domaines 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, que d'industrialisation, ils permettent d'étendre les possibilités techniques et de mieux satisfaire des besoins parfois contradictoires (poids, fonction...) auxquels les matériaux homogènes classiques répondent difficilement.

II.1.2- Définitions :

C'est l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes, qui se complètent et permettent d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. [34]

Des exemples de matériaux composites pris au sens large sont donnés au tableau (II.1). 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 combinent, ce qui introduit la notion d'un agent de liaison.

Contrairement aux matériaux classiques dont on connaît 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.

Les principaux constituants des matériaux composites reçoivent des additifs ou charges pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice, ils permettent également de modifier l'aspect ou les caractéristiques de la matière à laquelle ils sont ajoutés.

La matrice est elle-même composée d'une résine et de charges, dont le but est d'améliorer les caractéristiques de cette résine, tout en diminuant le coût de production.

Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques élevées, alors que la matrice transmet aux fibres protège les fibres des agressions extérieures. [35]

Tableau II.1 : les différents types de composites

Types de composites	Constituants	Domaine d'application
1/Composites matrice organique - papier - carton -panneaux de fibres toiles enduites -matériaux d'étanchéité et pneumatiques	-Résine/fibre cellulosique -Résine /copeaux -Résine / tissus -Elastomère -Caoutchouc/ acier	-Imprimerie -bâtiment -toitures -Automobile
2/composites à matrice minérale -bidon -Composite –carbone-	Ciment /sable /granulats Carbone / fibres	-Génie civil -aviation -espace
3/ Composites à matrice métallique	Aluminium /fibres de bore Aluminium /fibres de carbone	-aérospatial

II.1.3- Les caractéristiques générales :

Un matériau composite consiste dans le cas général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée " la matrice ", la phase discontinue est appelée "le renfort " (figure II.1). [36]

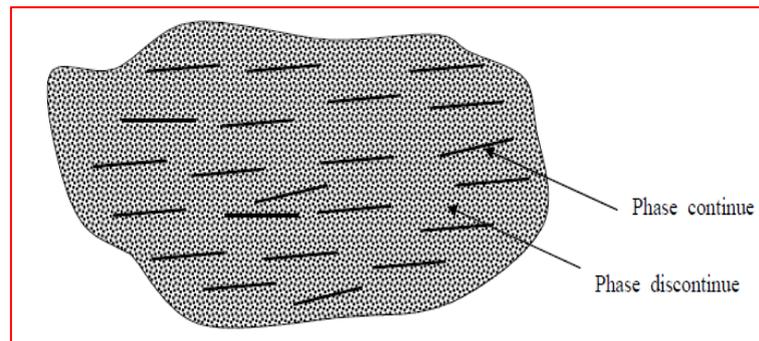


Figure II.1 : les différents types de composites

Les propriétés des matériaux composites résultent en :

- ✓ les propriétés des matériaux constituants.
- ✓ leurs distributions géométriques.
- ✓ leurs interactions.

Ainsi, pour accéder à la description d'un matériau composite, il sera nécessaire de spécifier :

- ✓ la nature des constituants et leurs propriétés.
- ✓ la géométrie du renfort, et sa distribution.
- ✓ la nature de l'interface : matrice-renfort.

La concentration du renfort est mesurée par la fraction volumique ou par la fraction massique, c'est un paramètre déterminant des propriétés mécaniques du matériau composite.

Pour une concentration donnée, la distribution du renfort dans le volume du composite est également un paramètre important, une distribution uniforme assurera une homogénéité.

Dans le cas d'une distribution non uniforme du renfort, la rupture du matériau sera initiée dans des zones pauvres en renfort, diminuant ainsi la résistance du composite.

Cet aspect constitue une des caractéristiques fondamentales des composites, c'est la possibilité de contrôler l'anisotropie du produit fini par une conception et une fabrication adaptée aux propriétés souhaitées. [37]

II.2- Les matrices :

II.2.1- Introduction :

Du fait de leurs faibles sections (des diamètres aux environs de 10 à 20 μm), les fibres ne pouvant toutefois être utilisées directement dans une application mécanique d'où l'idée de les incorporer dans une matrice polymère pour constituer un composite à fibres.

La matrice a ainsi diverses fonctions : lier les fibres entre elles, transférer les charges mécaniques aux fibres, protéger les fibres de l'environnement extérieur, ainsi ce nouveau matériau modulable, présente des caractéristiques mécaniques spécifiques assez élevées.

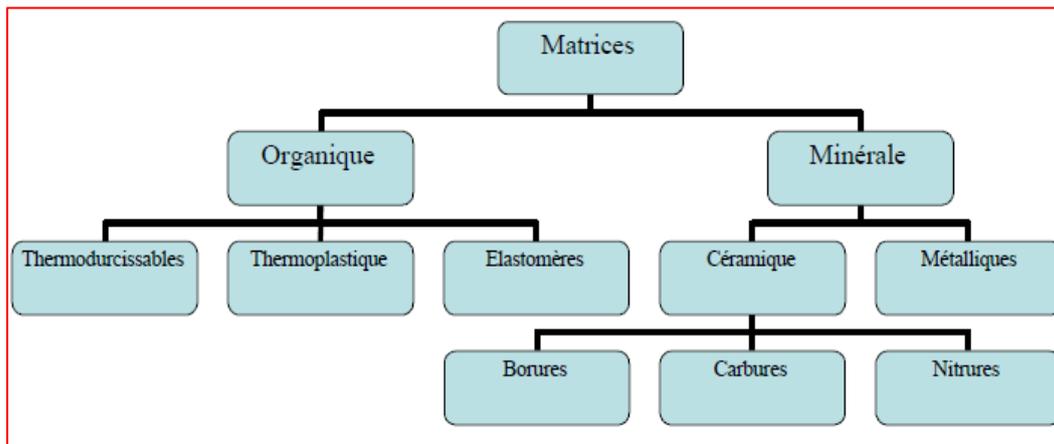


Figure II.2 : Organigramme des différentes familles de matrice

Les matrices utilisées dans la fabrication des composites peuvent être minérales ou organiques, actuellement 99% des matrices utilisées sont des matrices organiques.

II.2.2- Définitions :

La matrice composée d'une résine 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 protéger les fibres des agressions extérieures. [38]

II.2.3- Les résines :

Les résines sont des polymères modifiés par différents adjuvants et additifs. Elles 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.

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 présenter une bonne compatibilité avec les fibres. En outre, elles doivent avoir une masse volumique, et des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées.

Ces deux types de résines possèdent, la faculté de pouvoir être moulés ou mises en forme pour donner un produit dont la forme peut être modifiée. [39]

II.2.3.1- Les résines thermodurcissables (TD) :

Elles sont associées à des fibres longues, leur structure à la forme d'un réseau tridimensionnel qui se pontent pour durcir en forme, de façon définitive lors d'un chauffage. 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 très élevées.

Du fait, grâce à 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 : [41]

a) Les résines polyesters non saturées : C'est la résine la plus utilisée dans les composites, elle passe successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible.

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

Les résines 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.

b) Les époxydes : Ce sont les plus utilisés après les résines polyesters. Leurs bonnes caractéristiques mécaniques, permet leur utilisation sans charges ou additifs, ce sont des matrices à haute performance.

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

Leurs 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.

Leurs inconvénients sont :

- ✓ Coût élevé.
- ✓ Temps de polymérisation long.
- ✓ Vieillesse sous température.
- ✓ Sensibilité à l'humidité et au rayon ultra-violet.
- ✓ Nécessite de prendre des précautions lors de la mise en œuvre.

c) Les résines vinylisters : Considérées comme des variantes des polyesters, faites d'acides acryliques, elles possèdent une bonne résistance à la fatigue et un excellent comportement à la corrosion, mais demeurent combustibles.

d) 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.

e) **Les résines polyuréthannes et polyuréées:** Dans la fabrication des pièces composites, on utilise des formules dont la faible viscosité permet un bon remplissage du moule, les constituants sont livrés à l'état de pré polymères liquides.

f) **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.

g) **Bismaléimides :** C'est 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 cirants imprimés.

II.2.3.2- 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 mis 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 à la forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme et les refroidir pour les fixer. [41]

Les principales résines thermoplastiques utilisées sont les suivants :

- ✓ Polyamide : une tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures.
- ✓ Polytéraphalate éthylénique et butylique : bonne rigidité.
- ✓ Polycarbonate : 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.

II.2.3.3- Comparaison entre ces deux types de résines : [40]

Tableau II.2 : Comparaison entre les deux types de résines

Thermoplastiques	Thermodurcissables
Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser
Illimité	Réduit

Difficile	Aisée
Chauffage + refroidissement	Chauffage continue
Court	Long (polymérisation)
Assez bonne	Limitée
Réduite	Meilleure
Recyclables	Perdus ou utilisés en charges
Propreté	Emanations de solvants

II.3- Les fibres :

II.3.1- Introduction et définitions :

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites, et se présentent sous forme filamentaire, ils sont caractérisés par : [42]

- ✓ La nature de la fibre : minérale ou organique.
- ✓ L'architecture de renfort : unidirectionnelle ou bidirectionnelle.
- ✓ Principaux matériaux de renfort.

Ces renforts sont constitués par plusieurs centaines ou milliers de filaments, de diamètre compris entre 5 et 15 micromètres.

Il existe deux types de fibres :

- ✓ Fibres courtes : quelque centimètre ou fraction de millimètre, les feutres, les mats et les fibres courtes impactées utilisées en moulage
- ✓ Fibres longues : coupées au moment de la fabrication du matériau composite, utilisée telles quelles ou bien tissés.

Ces différents types de fibres sont classés selon la nature de leurs composants :

- Des renforts à base de fibres unidirectionnelles : orientés suivant une même direction.
- Des renforts à base de fibres bidimensionnelles : surfaces tissées (tissus).
- Des renforts à base de fibres tridimensionnelles : faits de fibres orientées.

II.3.2- Les fibres de carbone :

II.3.2.1- Elaboration des fibres de carbone :

Les fibres de carbone sont faites à partir d'un polymère de base appelé précurseur, se présentant lui mêmes sous forme de fibres orientées.

Actuellement, les fibres utilisées sont des fibres acryliques faites à partir du poly-acrylonitrile, la qualité des fibres de carbone dépend des qualités du précurseur. Le principe d'élaboration est de faire aux fibres acryliques une décomposition thermique, sans fusion thermique, aboutissant à une graphitisation dans laquelle on retrouve la structure initiale des fibres.

Les procédés actuels utilisent des mèches de filaments acryliques assemblés sans torsion et leur font subir quatre traitements successifs : une oxydation, une carbonisation, une graphitisation et un traitement de surface. [43]

Tableau II.3 : caractéristiques mécaniques des fibres de carbone

Caractéristique	Carbone HM	Carbone HR
Masse volumique (Kg/m ²)	1800	1750
Module de Young E_f (N/mm ²)	390 000	230 000
Contrainte à la rupture (N/mm ²)	2 500	3 200
Allongement à la rupture (%)	0.6	1.3

a) L'oxydation :

Les fibres acryliques sont fusibles, la phase d'oxydation a pour but de supprimer artificiellement le pont de fusion. Cette opération est effectuée en chauffant les fibres à environ 300°C. Il se produit alors une oxydation à une réticulation des chaînes moléculaires.

b) La carbonisation :

Cette deuxième phase consiste à chauffer progressivement les fibres réticulées à 300°C jusqu'à 1100°C environ. Il y a alors une élimination d'eau et d'acide cyanhydrique, seuls les carbones sont conservés dans la chaîne.

Les fibres ainsi obtenues ont de bonnes caractéristiques mécaniques et peuvent être utilisées après traitement de surface.

Les fibres sont dénommées : fibres à haute résistance (HR) ou à haute ténacité (HT).

c) La graphitisation :

La phase de graphitisation est utilisée lorsqu'on souhaite obtenir des fibres à module d'Young élevé. Cette phase consiste à effectuer à la suite de la carbonisation, une pyrolyse des fibres, en atmosphère inerte, jusqu'à une température de l'ordre de 2600°C.

La graphitisation provoque une réorientation des réseaux de carbone suivant l'axe des fibres, ce qui aboutit à une augmentation du module d'Young. Suivant le taux de graphitisation, on obtient des fibres à haut module (HM) ou des fibres à très haut module.

d) Le traitement de surface :

La dernière phase consiste en un traitement de surface, par oxydation ménagée en milieu acide. Cette phase a pour objet d'accroître la rugosité des filaments ainsi que la nature des liaisons chimiques afin d'améliorer la liaison fibre-résine.

II.3.2.2- Les caractéristiques mécaniques des fibres de carbone :

Les fibres de carbone possèdent de très bonnes caractéristiques mécaniques, d'autant plus que leur masse volumique est faible. En outre, il faut noter que les fibres de carbone ont une excellente tenue à haute température. En effet leurs caractéristiques mécaniques sont maintenues jusqu'à 1500°C environ. Cette propriété a conduit à développer des composites : fibres de carbone/matrice de carbone, à haute tenue thermique, utilisés dans les tuyères de fusées, les éléments de fours, etc. Ces matériaux revêtus d'une couche protectrice anti-oxydante, trouvent également des applications en atmosphère oxydante dans le domaine spatial. [44]

II.3.3- Les fibres de verre :

II.3.3.1- L'élaboration des fibres de verre :

Elles sont élaborées par fibrage du verre fondu à travers des filières chauffées (1250°C). A cette température, la viscosité du verre permet un écoulement par gravitation à travers les orifices, sous forme de fibres de quelques dixièmes de millimètres. A la sortie de la filière, le verre en phase plastique est étiré à grande vitesse et refroidi, cela permet d'obtenir, soit des filaments continus, soit des fibres discontinues.

Il existe deux procédés d'étirage : l'un mécanique et l'autre pneumatique. [45]

a) Etirage mécanique :

A la sortie de la filière, les fibres sont étirées par un procédé mécanique. Les monofilaments sont assemblés parallèlement sans torsion, sous forme de fils de base dénommés "silionnes". Ces fils de base sont les plus utilisés comme renforts de verre dans les matériaux composites.

b) Etirage pneumatique :

Dans ce procédé, les fibres de verre sont étirées par un système d'aspiration à travers un tambour perforé. Les fibres obtenues, discontinues et de longueur allant de 5 à 80 mm, sont ensuite assemblées parallèlement en un ruban appelé "verranne". Les fibres verranne se distinguent des fibres silionne par un aspect pelucheux.

II.3.3.2- Les propriétés mécaniques :

A la suite du fibrage, les filaments de verre sont soumis à divers sollicitations mécaniques et chimiques qui réduisent leurs caractéristiques initiales.

Le tableau (II.4) donne les valeurs de la contrainte à la rupture, mesurées sur fils de base ayant subi un ensimage. Ces valeurs indiquent une chute des caractéristiques lorsque le nombre de filaments augmente. Dans les matériaux composites, la liaison verre-résine par l'intermédiaire de l'ensimage assure une répartition assez homogène de la charge.

Enfin, il est intéressant de noter, que les fibres de verre conservent leurs caractéristiques mécaniques jusqu'à des températures élevées. Ces fibres sont donc bien adaptées pour le renforcement des résines à tenue thermique élevée. [46]

Tableau II.4 : caractéristiques mécaniques des verres type E et R mesurées sur filament

Caractéristique	Verre type E	Verre type R
Masse volumique (Kg/m ²)	2600	2550
Module d'Young Ef (N/mm ²)	74000	86000
Contrainte à la rupture (N/mm ²)	3400	4400
Allongement à la rupture (%)	44	52

II.3.4- Les fibres d'aramides :

II.3.4.1- Elaboration des fibres d'aramides :

Les fibres aramides à caractéristiques mécaniques élevées sont généralement connues sous le nom de "Kevlar", nom commercial de la fibre mise au point par Dupont de Nemours [47].

L'élaboration des fibres d'aramide est effectuée à basse température (-10°C), puis par filage. Les fibres sont étirées et traitées thermiquement afin d'augmenter leur module d'élasticité.

II.3.4.2- Les caractéristiques et utilisation industrielle des fibres d'aramides :

Les caractéristiques mécaniques des fibres aramides sont reportées dans le (tableau II.5). Néanmoins, leur utilisation est limitée par diverses faiblesses des matériaux composites à fibres d'aramides (résistance faible à la compression, à la flexion, au flambement. Et une sensibilité au cisaillement).

Ces faiblesses sont généralement attribuées à une mauvaise adhérence fibre-matrice. Compte tenu de leur légèreté et de leur bonne résistance au choc, à l'impact et à l'abrasion, les fibres aramides sont utilisées pour la fabrication de blindages et de produit de friction et de joints. [44]

Tableau II.5 : caractéristiques mécaniques des fibres d'aramide

Caractéristique	Kevlar 29	Kevlar 49
Masse volumique (kg/m ²)	1440	1450
Module d'Young E_f (N/mm ²)	60000	120000
Contrainte à la rupture (N/mm ²)	3000	3000
Allongement à la rupture (%)	36	19

II.3.5- Les fibres de bore :

Un filament de tungstène sert de catalyseur à la réaction de chlorure de bore et d'hydrogène à 1200°C , les fibres de bore obtenues ont un diamètre d'environ $100\ \mu\text{m}$. Elles ont un haut module et sont insensibles à l'oxydation à hautes températures.

II.3.6- Les fibres de silice (ou de quartz) :

Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée.

II.3.7- Les fibres de polyéthylène de haut module :

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

II.3.8- Les Caractéristiques des fibres et renforts : [42]

Tableau II.6 : Les Caractéristiques des fibres et renforts

Renforts	Diamètre du filament (μm)	Masser volumique (kg)	Module d'élasticité longitudinal (N/mm ²)	Module de cisaillement (N/mm ²)	Coefficient de poisson	Contrainte de rupture (traction) (N/mm ²)	Allongement à la rupture (%)	Coefficient de dilatation thermique
	D	Mv	E	G	K	G	A	u
Verre E	16	2600	74 000	30000	0.25	2500	3.5	0.5°10
Verre R	10	2500	86 000		0.2	3200	4	0.3°10
Carbonne HM	6.5	1800	390 000	20000	0.35	2500	0.6	0.08°10
Carbone HR	7	1750	230 000	50000	0.3	3200	1.3	0.02°10
Kevlar 49	12	1450	130 000	12000	0.4	2900	2.3	0.2°10
Bore	100	2600	400000			3400	0.8	0.4°10
Silicate d'alumine	10	2600	200000			3000		
Polyéthylène		960	100000			3000		

II.3.9- Architecture des fibres :

Afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques des structures en composites, il est nécessaire de jouer sur la texture des renforts, pour créer une charpente résistante adaptée aux contraintes mécaniques. Les renforts se présentent généralement comme suit : [48]

- a) **Formes linéiques :** Une fibre trop petite pour être utilisée seule. On trouve en général, des fils ou mèches qui sont assemblés à partir de plusieurs fibres. L'unité de masse linéique est le tex (1 tex = 1 g/km).
- b) **Formes surfaciques :**
 - Tissus et rubans : Un tissu (ou ruban) est un ensemble surfacique de fils, de mèches,... etc., réalisé sur un métier à tisser. Il est constitué de chaîne et d'une trame. Ce sont des nappes de fibres continues, disposées dans un plan suivant une direction bien déterminée.

- **Mats** : Les mats sont des nappes de fils continus ou discontinus, disposés dans un plan sans aucune orientation préférentielle. Ils sont maintenus ensemble par un liant. L'absence d'orientation préférentielle des fibres conduit à une isotropie des propriétés mécaniques du mat dans son plan.
- **Stratifiés** : Les structures composites stratifiées sont constituées de couches successives de renfort (fils, stratifils, mats, tissus etc...) imprégnées de résine. Chaque pli est caractérisé par le type et l'orientation du renfort.

Tableau II.7 : Performances comparées des différents types d'architecture

Architecture des fibres	Comportement mécanique recherché	Orientation de la tenue mécanique	Taux maximal de renfort	Type de fibres
Fibres coupées et broyées	Moyen	Quelconque	30%	Verre
Mats fibres coupées	Moyen	Quelconque	30%	Verre ou carbone
Fibres continues	Intermédiaire	Unidirectionnelle	50 à 70%	Toutes
Tissu	Fort	Bi ou tri directionnelle	30 à 70%	Toutes
Nappe	Très fort	Unidirectionnelle (Bidirectionnelle si superposition)	50 à 85%	Toutes

Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait ...etc.

Le choix de l'association matrice-particules dépend des propriétés souhaitées par exemple, des incursions de plomb dans des alliages de cuivre, augmentera leur facilité d'usinage.

II.4- Revue des travaux antérieurs sur la réparation ou le renforcement des poutres par les matériaux composites PRF :

- **Ritchie et al. (1991) :**

Ils ont été parmi les premiers à utiliser les matériaux composites en utilisant la méthode de renforcement par collage de plaques. Leurs essais ont consisté à tester seize poutres en béton armé (150 mm x 300 mm x 2450 mm, $f_b = 40$ MPa, $A_s = 2$ HA10, $f_e = 400$ MPa, $s = 60$ mm),

en changeant les propriétés et la nature de la plaque de composite utilisée. La longueur du renforcement variait entre 1.7m et 2.4m tandis que la largeur était fixée à 150 mm, l'épaisseur variait entre 1 et 8 mm. Les matériaux utilisés étaient les suivants : fibres de verre ($E_p = 11700$ à 30400 MPa, $f_{pu} = 160$ à 590 MPa), fibres de carbone ($E_p = 54500$ MPa à 118000

MPa, $f_{pu} = 590$ à 1500 MPa) et fibres d'aramide ($E_p = 72500$ MPa, $f_{pu} = 1180$ MPa). Pour neuf des poutres testées, l'arrachement du béton fut la cause de la rupture. En guise d'ancrages, les auteurs ont soit collé des cornières en L sur les faces verticales de la poutre, aux extrémités de la plaque, soit prolongé la plaque jusqu'aux appuis. [49]

- **Al-Sulaimani et al. (1994) :**

Leurs travaux consistaient à coller des plaques de renfort en fibres de verre, sur les faces verticales des poutres en béton armé. Leur étude se basait sur trois méthodes de renforcement : S (renforcement par bandes), W (renforcement par plaques), J (renforcement en U).

Les principales conclusions sont que le renforcement à l'effort tranchant, qu'il soit du type S, W ou J, augmente la rigidité des poutres. Et que l'augmentation de la résistance à l'effort tranchant est semblable pour le renforcement par bandes (S) et (W). Le mode de rupture observé dans ce cas est un décollement des plaques de renfort à leurs extrémités, donc une rupture hale. [50]

Finalement, le renforcement en U est selon eux le meilleur parce qu'il permet une plus grande augmentation de la résistance à l'effort tranchant et qu'il n'y a pas de décollement de l'extrémité inférieure des plaques parce que celles-ci sont mieux ancrées. La rupture est alors ductile.

- **M.Abdessamed et S. Kenai (2003) :**

Les auteurs ont permis l'introduction de la technique de renforcement par matériaux composites en Algérie par une investigation expérimentale sur neuf poutres de dimensions réduites en béton armé. Les poutres ont une longueur de 170 cm, et 110 cm de portée et de section 16×18 cm². Les armatures sont de trois barres d'acier HA12 dans la partie tendue et de deux barres HA10 dans la partie comprimée, tandis que les cadres sont des aciers doux lisse de diamètre 8 mm, espaces de 20 cm. Ces spécimens d'essai se distinguent essentiellement par le type du composite collé et les manières et les localisations du collage appliqué. Les deux premières sont des poutres test, elles ne sont pas renforcées, les sept autres sont réparties en deux catégories. La première est celle des poutres renforcées avant chargement par collage de trois composites différents : TFC Freyssinet, SikaCarbodur lamelle et SikaWrap alors que la deuxième catégorie est celle de quatre poutres réparées par injection et placage des composites après le chargement et l'apparition des fissures (Tableau II.9). [51]

Tableau II.8 : Désignation des poutres renforcées avant et après endommagement et mode de collage des différents composites

Nomination Poutre	Schéma de renforcement et réparation	Détail du renforcement	Mode d'essai
Poutres de référence	P1 et P2	-	Chargement jusqu'à rupture (sans renforcement)
Poutres réparées	P2	S.Wrap (30*(18+16+18) et S.carbodur (100° 8)	Chargement jusqu'à fissuration puis injection et réparation et chargement jusqu'à rupture
	P3	Lamelle Sika carbodur (100° 8)	
	P4	1couche Sika Wrap (100° 30)	
	P5	Fissures injectées par résine et colmaté	
Poutres renforcées	P6	1couche TFC (100° 8)	Renforcement à vide puis chargement jusqu'à rupture
	P7	Lamelle Sika Carbodur (100° 8)	
	P8	Sika.Wrap (30*(18+16+18)) et Sika.carbodur (100° 8)	
	P9	1couche Sika Wrap (100° 30)	

Ils ont obtenu d'importants résultats notamment en termes de gain de capacité portante, de réduction d'apparition et d'ouverture de fissures ainsi que les flèches. La figure II.9 présente les résultats pour le cas de renforcement avec un récapitulatif des résultats pour le cas de réparation. [51]

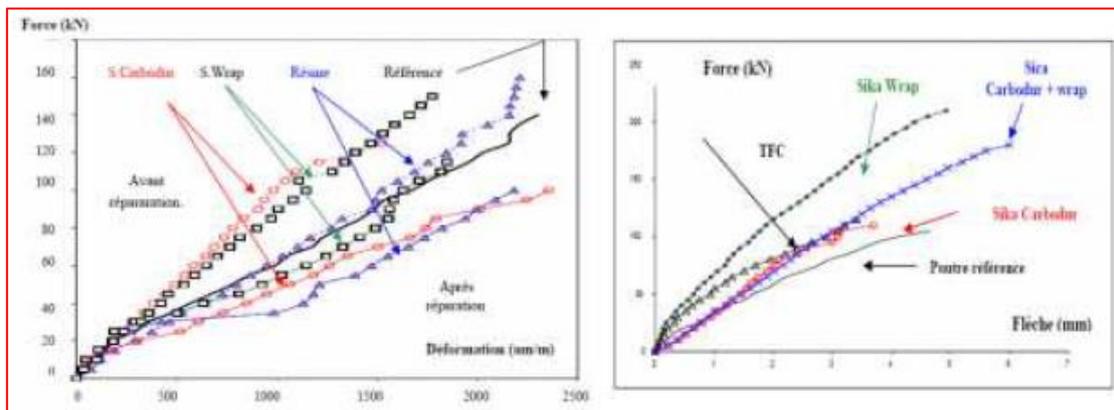


Figure II.3 : Courbes force–déformation des aciers pour poutres réparées et renforcées. [51]

II.5- Renforcement des poutres par matériaux composite de fibre de carbone :

II.5.1- Généralité :

La fibre de carbone est obtenue par pyrolyse d'une fibre organique qu'on appelle précurseur. Elle offre deux possibilités d'utilisation : la première en tant que carbone pour les propriétés de cet élément, la seconde en tant que fibre flexible et qui convient à toutes les formes de produits finis. Les propriétés caractéristiques du carbone sont liées à sa structure de type

graphite : faible coefficient de frottement, bonne résistance à l'usure, faible coefficient de dilatation linéique, haute tenue en température en service continu, bonne conductivité électrique, très grande résistance aux produits chimiques et à la corrosion.

II.5.2- Comparaison avec les autres fibres de renforcement :

L'avantage des fibres de carbone sur les autres fibres résulte de leurs propriétés mécaniques. Cet avantage est conservé dans les matériaux composites.

Tableau II.9 : comparaison qualitative entre fibres

Critères	Fibres de carbone	Fibres d'aramide	Fibres de verre
Résistance à la traction	Très bonne	Très bonne	Fibres de verre
Résistance à la compression	Très bonne	Inadéquate	Bonne
Module d'élasticité	Très bon	Bon	Adéquat
Comportement à long terme	Très bon	Bon	Adéquat
Comportement à la fatigue	Excellent	Bon	Adéquat
Densité	Bonne	Excellente	Adéquate
Résistance alcaline	Très bonne	Bonne	Inadéquate
Prix	Adéquat	Adéquat	Très bon

II.5.3- Comparaison avec les matériaux métalliques :

Le choix entre métal et matériaux composites doit tenir compte de la condition d'utilisation qui peut être, par exemple dans l'aéronautique :

- Les conditions d'équilibre hygrothermique.
- L'endommagement par première rupture d'une couche, en général à 90 (first plyfailure).
- L'endommagement consécutif à un choc.

II.6- Conclusion :

Les matériaux composites présentent des avantages tels que :

- Résistance mécanique : pour une même section d'acier, la résistance des fibres de composites est plus élevée.

- Poids : la densité des matériaux composites représente 20% de celle des platines d'acier, pour une même résistance ultime le poids de PRFC (Polymère Renforcé en Fibre de Carbone) est inférieure de 10% au poids des platines d'aciers.
- Maniabilité : les bandes des matériaux composites présentent une large flexibilité qui facilite la mise en œuvre et son application dans les zones confinées.
- les PRFC sont beaucoup plus facile à transporter et assembler.
- Facilité de préparation de surfaces
- La non nécessité d'une fixation mécanique : comparativement aux platines d'acier, cependant le collage des matériaux composites doit être minutieux.
- La durabilité du système de renfort.
- Tenue au feu : la conductivité thermique des matériaux composites est inférieure à celle des platines d'acier.
- Réduction du risque « gel- dégel ».
- La maintenance et entretien : le système de renforcement de matériaux composites n'exige pas d'entretien.
- L'aptitude de précontrainte dans les matériaux composites.

Le processus de l'introduction des matériaux composites à base de fibres (PRF) a été accéléré par la mise au point de méthodes techniquement fiables et compétitives comparativement aux anciens procédés de renforcement à base d'acier. Les fibres de carbone ou de verre présentent en effet divers avantages : faible densité, absence de corrosion, excellentes propriétés mécaniques, très bonne tenue à la fatigue et facilité de manipulation. Un des grands avantages de ce procédé de réparation est la possibilité de renforcer la structure sans interrompre l'exploitation de l'ouvrage.

CHAPITRE III : Choix du logiciel et MEF

III.1. Logiciel de modélisation et de calcul ANSYS :

III.1.1- Introduction :

Toutes descriptions de phénomènes physiques fait largement appel au langage et aux concepts des mathématiques tels que les équations différentielles ou plus généralement les équations aux dérivées partielles. La résolution de ces dernières occupe une place importante en ingénierie et en mathématiques appliquées. Chacune de ces disciplines apporte une contribution différente mais complémentaire à la compréhension et à la résolution de tels problèmes.

Il existe plusieurs techniques permettant de résoudre les équations aux dérivées partielles. On pense par exemple à la méthode des éléments finis qui est la plus répandue.

Cette popularité n'est pas sans fondement. La méthode des éléments finis est très générale et possède une base mathématique rigoureuse qui est fort utile, même sur le plan pratique.

En effet, cette base mathématique permet de prévoir jusqu'à un certain point la précision de notre approximation et même d'améliorer cette précision, via les méthodes adaptatives.

Dans ce chapitre nous présentons d'une manière générale le concept de base de la méthode des éléments finis pour l'analyse des structures. [52]

III.1.2- Présentation du logiciel :

ANSYS est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique. L'entreprise a son siège à Canonsburg en Pennsylvanie (États-Unis). Ses produits majeurs sont des logiciels qui mettent en œuvre la méthode des éléments finis, afin de résoudre des modèles préalablement discrétisés.

La fiabilité des résultats résulte de la variété des modèles de matériaux disponibles, de la qualité de la bibliothèque d'éléments, de la robustesse des algorithmes de résolution et de la possibilité de modéliser n'importe quel type de produit.

Le confort et la facilité d'utilisation du logiciel permet de se concentrer sur la partie la plus importante du processus de simulation, c'est à dire l'interprétation des résultats.

Les outils intégrés au logiciel permettent de résoudre les problèmes de validations produits de manière efficace. Ils permettent d'optimiser le processus de conception (gain de temps énorme) et donc de proposer des produits plus innovants (intégration d'une pré-analyse dans le cycle de conception), de qualité plus élevée tout en minimisant les coûts. [52]

En effet, intégrer l'Analyse de conception, c'est permettre de décupler ses capacités d'innovation et de prendre une réelle avance technologique. L'outil de simulation se présente sous plusieurs niveaux de licences.

Les logiciels de calculs par éléments finis sont généralement peu accessibles car ils nécessitent des connaissances dans le calcul. L'interface WORKBENCH qui encapsule les différents niveaux de l'outil de simulation et ses modules a été conçue pour être utilisée sans avoir une formation basée sur les éléments finis. L'interface est très intuitive, elle permet une

prise en main très rapide du logiciel. Les difficultés des calculs par éléments finis sont ici gommées, notamment par l'automatisation de la reconnaissance des zones de contacts et la génération du maillage. [53]

III.1.3- Principaux produits et capacités : [54]

- ✓ **ANSYS Structural** : Ce produit permet d'effectuer des simulations mécaniques en calculant les structures. Ses principales capacités sont : (1) l'analyse statique, (2) l'analyse modale, (3) l'analyse harmonique (réponse forcée), (4) l'analyse temporelle ou transitoire, (5) la gestion de différentes situations non linéaires (contacts, plasticité des matériaux, grands déplacements ou grandes déformations).
- ✓ **ANSYS Mechanical** : Ce produit dispose les mêmes capacités qu'ANSYS structural, en y ajoutant notamment une solution thermique, avec modélisation du rayonnement.
- ✓ **ANSYS CFX et Fluent** : Ces deux logiciels permettent d'effectuer des simulations en matière de la mécanique des fluides. Ils portent le nom des compagnies qui les ont développés, rachetés par ANSYS.Inc respectivement en février 2003 et en février 2006.
- ✓ **ANSYS AUTODYN et ANSYS LS-DYNA** : Ces logiciels possèdent des solutions utilisant les formulations explicites des équations à résoudre, contrairement aux produits précédemment cités. Leur domaine d'application est réservé aux modélisations mettant en jeu des situations mécaniques aux très larges déformations.
- ✓ **ANSYS Electromagnetics**: Ce produit permet de résoudre des modélisations mettant en jeu des phénomènes électromagnétiques.
- ✓ **ANSYS Multiphysics**: Ce produit rassemble l'ensemble des capacités d'ANSYS en matière de simulation numérique implicite.

III.1.4- Plateformes ou environnements du logiciel :

Deux environnements permettent de mettre en œuvre le code ANSYS : [54]

- ✓ **ANSYS classique** : Chronologiquement, c'est la première solution de ce logiciel qui est développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques. À partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en se basant sur les commandes disponibles dans le code ANSYS. Il est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.
- ✓ **ANSYS Workbench**: Cette plateforme propose une approche différente dans la construction d'un modèle, en réutilisant le code ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièce) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul. Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. La plateforme est donc chargée de convertir les requêtes entrées par l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer la résolution. Le modèle éléments finis généré reste néanmoins manipulable en insérant des commandes propres au code ANSYS.

III.1.5- Organisation de logiciel ANSYS :

Il y a deux niveaux primaires dans le programme d'ANSYS : [55]

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

III.1.6- AnsysMechanical APDL :

III.1.6.1- 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. [56]

III.1.6.2- L'avantage de choisir APDL :

Naviguez confortablement dans l'interface utilisateur Mechanical APDL et appliquez un flux de travail éprouvé pour créer, résoudre et post-traiter des modèles d'éléments finis 2D et 3D. Les avantages d'utiliser le produit APDL par rapport à autre produit comme Workbench sont les suivants :

- 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.
- Comprenez le concept d'attributs d'élément et l'appliquez 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. [57]

III.2. Présentation générale de la Méthode des éléments finis :

III.2.1. Introduction :

Pour analyser un phénomène naturel en générale ou un problème d'ingénierie en particulier, on est souvent amené à développer un modèle mathématique pouvant décrire d'une manière aussi fiable que possible le problème en question.

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

La méthode des éléments finis est l'une des techniques numériques les plus puissantes. L'un des avantages majeurs de cette méthode est le fait qu'elle offre la possibilité de développer un programme permettant de résoudre des problèmes. En particulier, toute forme complexe d'un domaine géométrique où un problème bien posé avec toutes les conditions aux limites, peut être facilement traité par la méthode des éléments finis.

Cette méthode consiste à diviser le domaine physique à traiter en plusieurs sous domaines appelés éléments finis à dimensions non infinitésimales. La solution recherchée est remplacée dans chaque élément par une approximation avec des polynômes simples et le domaine peut ensuite être reconstitué avec l'assemblage ou sommation de tous les éléments. [57]

III.2.2. Bref historique (Méthode Des Éléments Finis) :

L'idée fondamentale derrière la méthode des éléments finis remonte loin en arrière. Les grecs par exemple avaient reconnu que l'on peut approcher la solution d'un problème complexe en le divisant en problèmes plus simples. On peut par exemple approcher le périmètre d'un cercle en calculant le périmètre d'un polygone à n côtés, pourvu que n soit suffisamment grand. Il suffit alors de connaître la longueur d'un segment de droite, problème beaucoup plus simple que celui de la longueur d'un arc de cercle. Et donc l'appellation éléments finis vient de la décomposition du domaine d'étude en éléments qui sont souvent représentés par un maillage.

L'application de la solution des équations aux dérivées partielles est évidemment plus récente, Robert Courant [58] a introduit le concept de formulation variationnelle en 1943, avec des fonctions de base à support locaux ouvrant la voie à une division d'un domaine considéré en 'élément', qui est à la base de toute méthode d'éléments finis.

Pour la méthode de Ritz [59], on part d'un problème posé dans un espace de dimension infinie. On approche ensuite la solution du problème initial en cherchant une solution dans une suite croissante de sous-espaces de dimensions finies.

Ces problèmes sont en général beaucoup plus faciles à résoudre. On peut de plus espérer que la solution du problème en dimension infinie peut être obtenue par un passage à la limite. Le choix des fonctions de base constituant ces espaces de dimension finie est délicat et initialement on les construisait globalement sur le domaine. C'est Courant qui eut l'idée d'introduire des fonctions à support local qui simplifient grandement leur construction.

Cependant ce n'est qu'avec le développement des ordinateurs que ces travaux trouvent leurs applications avec les travaux pionniers de Zienkiewicz et Argyris qui définiront la méthode en 1960.

Par la suite, l'apport du calcul matriciel amène le succès de la méthode et sa puissance. La méthode connaît un développement fulgurant accompagné par les progrès de l'informatique. La méthode des éléments finis est basée sur une théorie mathématique rigoureuse.

III.2.3. Généralités :

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

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

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

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

Il ne faut pas perdre de vue que l'analyse des résultats nécessite une bonne compréhension des différentes étapes mathématiques utilisées lorsqu'on effectue une approximation, pour pouvoir estimer l'erreur du modèle numérique.

Sans oublier que le modèle numérique ne peut fournir que de résultats relatifs aux informations contenues dans le modèle mathématique qui découle des hypothèses de modélisation. Nous nous limiterons à la présentation de modèles élémentaires utilisés dans le cadre des théories linéaires. Bien que simples ces modèles permettent déjà de traiter un grand nombre applications liées aux problèmes de l'ingénieur. [57]

III.2.4. Secteurs d'utilisation de la MEF :

- ✓ Génie mécanique.
- ✓ Génie civil.
- ✓ Transport.
- ✓ Aéronautique.
- ✓ Spatial.
- ✓ Nucléaire.
- ✓ Energétique.
- ✓ Militaire.

III.2.5. Problèmes d'équilibre (Système discret) :

Pour un système discret (système de ressorts, réseaux électriques, réseaux hydrauliques,...), les équations de comportement peuvent en général s'écrire sous la forme matricielle suivante :

[60]

$$[K] \{U\} = \{F\}$$

[K] -Matrice caractérisant le système

{U} -Variables inconnues du problème

DDL - Degré De Liberté

{F} -solllicitations connues (second membre).

III.2.6. Principes de la MEF :

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

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

La MEF utilise des approximations simples des variables pour transformer les équations aux dérivées équations algébriques. Les nœuds et les éléments sont basés sur des considérations de précision de l'approximation. [52]

III.2.7. Étapes logiques du calcul par MEF :

1. Définir les nœuds et les éléments (Créer le maillage).
2. Pour chaque élément, établir la matrice de rigidité élémentaire $[K]$ reliant les degrés de libertés (déplacements) nodaux $\{u\}$ et les forces $\{f\}$ appliquées aux nœuds : $[k_e] \{u_e\} = \{f_e\}$
3. Assembler les matrices et les vecteurs élémentaires en un système global $[K] \{U\} = \{F\}$ de manière à satisfaire les conditions d'équilibre aux nœuds.
4. Modifier le système global en tenant compte des conditions aux limites
5. Résoudre le système $[K] \{U\} = \{F\}$ et obtenir les déplacements $\{U\}$ aux nœuds.
6. Calculer les gradients (flux de chaleur, déformations et contraintes) dans les éléments et les réactions aux nœuds sur lesquels les conditions aux limites sont imposées. [52]

III.2.8. Caractéristique d'un élément fini

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

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

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

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

- Degrés de liberté : la fonction d'approximation choisie (en général le champ des déplacements) est exprimé en fonction des valeurs particulières qu'elles prennent aux nœuds communs des différents éléments adjacents, permet de reconstituer la solution complète (assemblage) tout veillant à respecter certains règles, dites critère de convergence.

- Forces nodales : à travers les nœuds transitent des forces associées aux degrés de liberté.

Ces paramètres d'identification permettent d'identifier les deux caractéristique clés d'un élément fini qui sont sa matrice de rigidité et son vecteur force. [52]

III.2.9. Etapes pratiques du calcul par MEF :

Organisation générale d'un code de calcul : [52]

- Pré- processeur

- Solveur
- Post-processeur

Pré- processeur :

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

Solveur :

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

Post-processeur :

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

III.3. Conclusion :

Le problème du choix de la schématisation doit permettre, au moyen de calculs mathématiques, de comprendre les phénomènes observés et de prévoir ceux à venir. La finesse de la modélisation à retenir dépend des moyens que l'on est capable, mais aussi disposé, à mettre en œuvre pour effectuer les mesures expérimentales qui seront comparées aux résultats théoriques obtenus par les calculs. La modélisation mathématique du comportement mécanique d'un matériau ou d'une structure peut servir à expliquer certains mécanismes caractéristiques de ruine comme le flambage ou le cisaillement (en liaison avec ses propriétés mécaniques). La modélisation peut également permettre de déterminer, par exemple, les zones de concentrations de contraintes ou de déformation et par là, d'étudier le phénomène de ruine du matériau étudié.

Cette présentation de la MEF nous facilite la modélisation numérique des plaques. En même temps l'utilisation d'un élément finis rectangulaire, nous a permis d'estimer la matrice de rigidité élémentaire ainsi que la matrice des forces.

CHAPITRE IV : Analyse Numérique et Cas d'Etude

IV.1- Introduction :

Dans cette étude trois différents modèles ont été réalisés afin d'étudier le comportement d'un bâtiment en béton armé, réparé en procédant à un chemisage et renforcé par des matériaux composites :

- a) Modélisation d'un bâtiment sans renforcement.
- b) Modélisation d'un bâtiment renforcé avec méthode de chemisage.
- c) Modélisation d'un bâtiment renforcé avec matériaux composites.

La modélisation des éléments en béton renforcé est exécutée dans le code commercial d'analyse par éléments finis avec le logiciel ANSYS. Pour développer un modèle d'analyse par éléments finis un processus typique est mis en œuvre. Il faut définir tous les paramètres qui sont exigés pour exécuter l'analyse. En premier lieu la géométrie et les propriétés des matériaux constituant les modèles sont présentés. Ensuite, on procède à un maillage du modèle. Enfin, le modèle est soumis au type d'analyse approprié tel qu'une analyse modale avec le calcul des fréquences et des périodes.

IV.2- Présentation de l'ouvrage :

Le projet est situé dans la wilaya d'Alger, classée selon le RPA 99 version 2003 comme une zone de forte sismicité (Zone III), réalisé en 2009. Il s'agit d'un ouvrage dont les travaux de réalisation sont à l'arrêt, non achevés, constitué d'un sous-sol et de trois étages (R+3).

La structure porteuse du bâtiment est conçue en poteaux et poutres en béton armé supportant des planchers de type corps creux implantée dans un site meuble (type S3).

Le projet est constitué de blocs qui feront usage de bureaux alors qu'ils étaient prévu pour usage d'habitation, et des étages vont être ajoutés. Nous ferons l'étude que d'un seul bloc, qui est un bâtiment de trois étages qui présente quelques désordres et anomalies d'exécution.

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

- Sens transversal (x-x) : 12.30 m
- Sens longitudinal (y-y) : 11.75 m
- Les sections des poteaux : (30x30) cm²
- Les sections des poutres principales : (30x40) cm²
- Les sections des poutres secondaires : (30x40) cm²
- Les planchers sont de types corps creux (16+5) cm.

IV.4- Modélisation de la structure :

La modélisation de la structure se fera à l'aide du logiciel ANSYS :

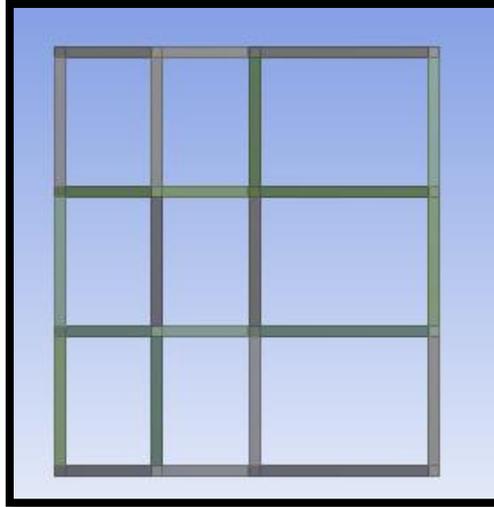


Figure IV.2 : Vue plan XY de la structure a l'aide du logiciel ANSYS

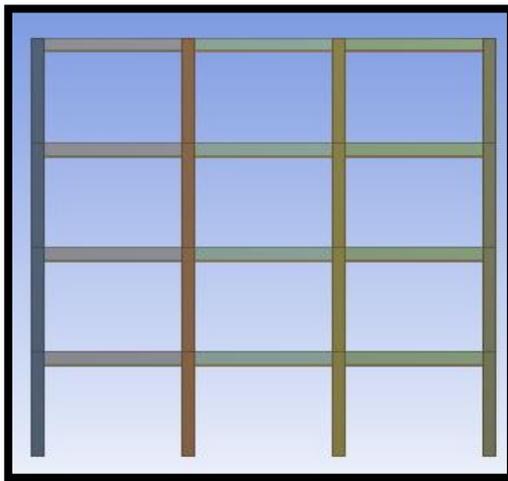


Figure IV.3 : Vue plan YZ de la structure

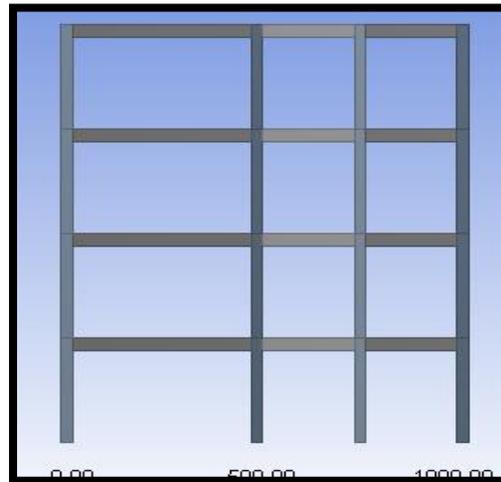


Figure IV.4 : Vue plan XZ de la structure

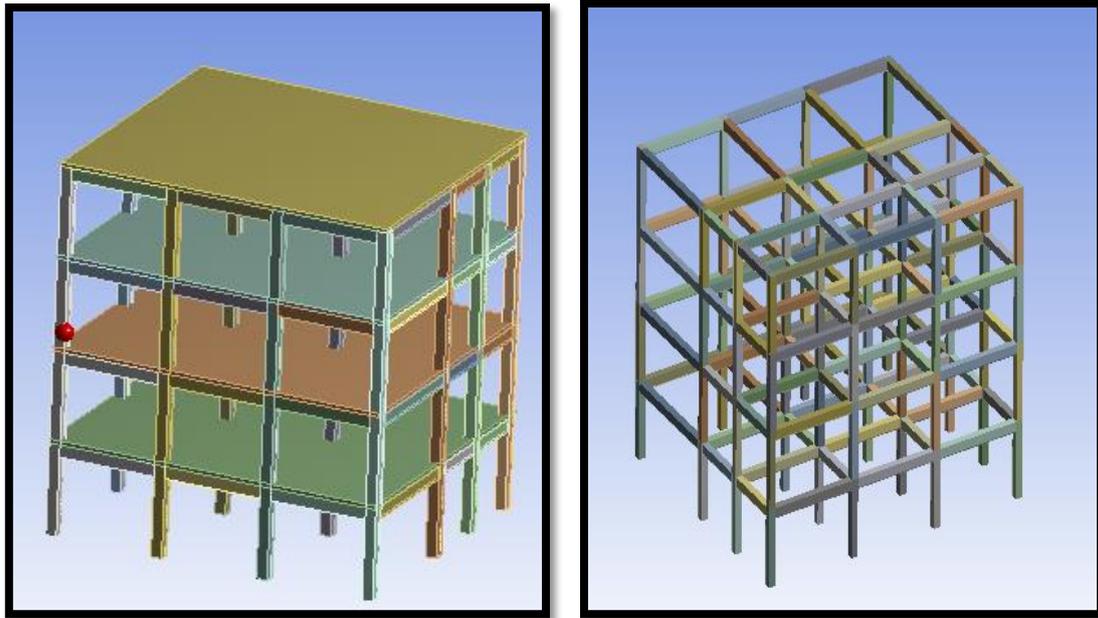


Figure IV.5 : Modélisation en 3D de la structure a l'aide du logiciel ANSYS

IV.5- Diagnostic des dégradations :

- ✓ Les investigations menées sur les éléments constructifs ont mis en relief des désordres et des anomalies d'exécution.
- ✓ Quelque trace de mauvaise mise en œuvre au niveau des poteaux et poutres.
- ✓ Enrobage insuffisant des armatures, zones de ségrégation superficielles et profondes.
- ✓ Ségrégation du béton et corrosion des armatures par endroit caractérisée par une faible cohésion des granulats, localisée sur certains poteaux, poutres et poutrelles.
- ✓ Différentes colorations du béton mis en place due à la reprise du bétonnage constaté sur quelques poteaux et poutres.
- ✓ Quelques poutres décalées des poteaux.
- ✓ Défaut d'exécution caractérisé par une fissuration et mauvaise mise en œuvre du béton localisée sur une poutre.
- ✓ Fissuration des murs de façade.



Figure IV.6 : Différentes colorations du béton mis en place



Figure IV.7 : Fissuration et mauvaise mise en œuvre due à un défaut d'exécution



Figure IV.8 : ségrégation profonde et superficielle repérée sur les poteaux



Figure IV.9 : Armatures apparentes par endroit



Figure IV.10 : Poutre décalée du poteau



Figure IV.11 : Ségrégation avec corrosion des armatures



Figure IV.12 : Déformation et corrosion des armatures

IV.6- Causes probables des désordres :

Les désordres sont liés à des anomalies et des défauts d'exécution des travaux de réalisation, identifiés notamment par la ségrégation du béton mis en place associée à l'insuffisance du béton d'enrobage par endroits, et la corrosion du ferrailage.

IV.7- Techniques à adopter :

Les techniques de réparation à adopter pour la remise à niveau de la structure en tenant compte de sa nouvelle destination les enjeux techniques et économiques :

- ✓ Concernant la ségrégation du béton : les éléments présentant des zones de ségrégation doivent faire l'objet de travaux de réparation appropriés.
- ✓ Concernant la reprise de bétonnage : une technique sera utilisée selon le cas et l'ampleur de la dégradation, tout en assurant une épaisseur suffisante de l'enrobage ainsi que l'adhérence de la surface de l'ancien béton avec celle du nouveau béton, par l'emploi d'une résine de reprise du bétonnage.
- ✓ Concernant les armatures : traitement de toutes les surfaces d'armatures corrodées par un inhibiteur de corrosion.
- ✓ Les armatures apparentes seront recouvertes par un béton de réparation ainsi que les ségrégations superficielles du béton.
- ✓ Chemisage des éléments de structure (poteaux et poutres) afin d'augmenter la capacité portante et parer ainsi au déficit de résistance.
- ✓ Réparation des éléments de structure de béton abimé par la ségrégation de béton et la corrosion d'armatures.
- ✓ Utilisation de matériaux composites pour la réparation des mêmes éléments.

IV.8- Propriétés des matériaux :

IV.8.1- 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. [61]

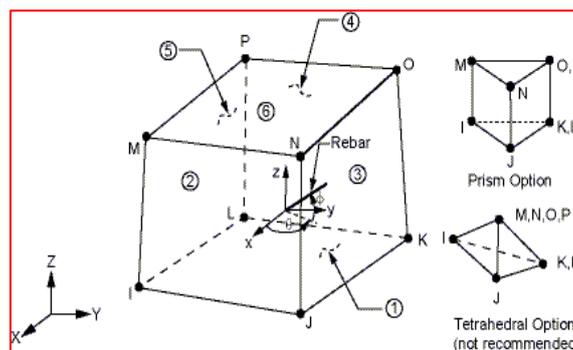


Figure IV.13: Solid 65 à 3D [61]

Les analyses modales faites à l'aide d'ANSYS requièrent la connaissance des propriétés thermomécaniques suivantes des matériaux :

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

Pour les trois modèles (modélisation d'un bâtiment sans renforcement, modélisation d'un bâtiment renforcé par chemisage, modélisation d'un bâtiment renforcé avec des matériaux composites) les propriétés du béton sont identiques et sont les suivantes :

Tableau IV.1 : Propriétés du béton armé utilisé dans la modélisation

Module d'élasticité (E_c)	32000Mpa
Coefficient de poisson (ν)	0,3
Densité (δ)	2500 Kg/m ³

IV.8.2- Les composites :

L'élément "**Solid 185**", est un élément solide utilisé pour modéliser le comportement des matériaux composites. L'élément peut avoir plusieurs couches pour différentes orientations avec ses propriétés ortho-tropiques dans chaque couche, trois degrés de libertés pour chaque nœud et un déplacement pour chacune des trois directions. [62]

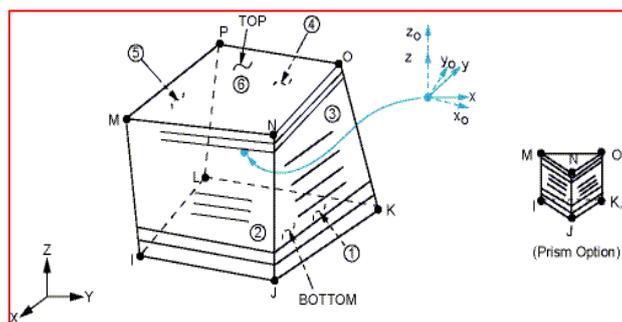


Figure IV.14 : Solid 185 à 3D [62]

Pour le modèle (modélisation de la structure renforcée par matériaux composites), les propriétés des renforts sont identiques mais la différence est dans la résine époxydique. Ces propriétés sont représentées comme suit :

IV.8.2.1- Renforcement par lamelle :

Le renforcement en flexion d'éléments d'ouvrages par PRFC est réalisé en collant des lamelles SikaCarboDur en surface des zones tendues du béton armé [63], c'est pour ça dans notre cas nous utilisant lamelle SikaCarboDur aux dessous des poutres de rive du bâtiment.

a) Lamelles SikaCarboDur S1512 :

Les lamelles SikaCarboDur sont des PRFC (Polymères Renforcés de Fibres de Carbone) fabriqués selon le procédé de pultrusion en usine. Contrairement aux tissus que l'on imprègne sur chantier, les conditions de fabrication des lamelles sont strictement contrôlées ce qui permet de garantir les caractéristiques du renfort PRFC. Contrôle de production : chaque lot de produits finis (env. 3000 m) est contrôlé, en ce qui concerne le module d'élasticité, la résistance en traction, l'allongement à rupture. La largeur et l'épaisseur des lamelles sont contrôlées sur chaque rouleau de 250 m. [63]

Tableau IV.2 : Propriétés de CarboDur S1512

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

b) Colle époxydique Sikadur-30 :

Le Sikadur-30 est une colle époxydique à deux composants A et B sans solvant, thixotrope, de couleur gris clair, utilisée pour le collage des lamelles SikaCarboDur. [63]

Matériaux composites traditionnels :

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

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

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

IV.8.2.2- Renforcement par tissu :

Les tissus de la gamme SikaWrap sont principalement utilisés en tant que renfort d'éléments de structures travaillant à l'effort tranchant (poutres), à la compression (confinement de poteau). Ils peuvent aussi être utilisés en tant que renfort d'éléments de structures travaillant en flexion (dalles, poutres) [76], c'est pour ça que dans notre cas nous utiliserons les tissus SikaWrap pour le renforcement des poteaux de rive de la structure.

a) Les tissus SikaWrap -600 C :

Le renfort composite PRFC, fabriqué in situ, est réalisé en associant un tissu SikaWrap marouflé dans une résine Sikadur bien définie. Chaque tissu doit donc être utilisé avec la résine spécifiée, le système ainsi formé ne peut faire l'objet d'aucune modification car les performances du PRFC dépendent à la fois du tissu et de la résine d'imprégnation.

Le tissu dit « lourd » SikaWrap-600 C est un tissu unidirectionnel de fibres de carbone assemblées par couture, applicable après imprégnation du support et du tissu. Cette application se fait « par voie humide ». [63]

Tableau IV.4 : Propriétés de SikaWrap -600 C

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

b) Colle époxydique Sikadur-300 :

Le Sikadur-300 est la résine d'imprégnation du tissu SikaWrap-600 C et le primaire pour le support. [63]

Matériaux composites traditionnels

Les propriétés de la colle époxydique Sikadur-300 pour le cas de la modélisation du bâtiment par matériaux composites traditionnels sont les suivantes [63] :

Tableau IV.5 : Propriétés de la résine Sikadur-300

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

IV.9- Maillage :

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

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

Le maillage est une méthode pour diviser l'élément en question en particules élémentaires ayant les mêmes propriétés, et examiner chaque particule séparément. L'assemblage des particules élémentaires nous ramène à l'élément initial.

Dans ce modèle on a utilisé pour le maillage (discrétisation de l'élément), le 'MeshTool', qui a été choisi dans l'étape de création des mailles (éléments finis).

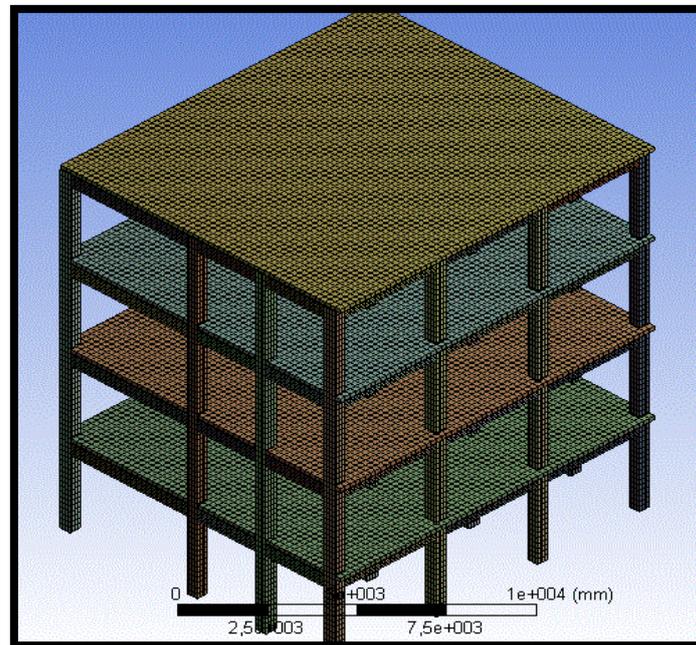


Figure IV.15 : Modélisation du maillage de la structure à l'aide du logiciel ANSYS

On a procédé à former un maillage sur certaines lignes choisies (longueur, largeur et hauteur) de la structure et gérer ainsi la densité du maillage dans les différentes régions de l'ouvrage. Pour l'élément solid65, la maille a été mise en place afin de permettre la création d'éléments rectangulaires. Les divisions choisies des lignes sont notées et le modèle adopté a été maillé en utilisant des éléments en ligne.

Ce maillage adopté a donné un certain nombre de nœuds dont le nombre total est comme suit :

Tableau IV.6 : Nombre des nœuds du bâtiment

Le cas de la modélisation	Béton armé	Les renforts	Résine époxydique	Nombre total
Sans renforcement	255355	/	/	255355
Par chemisage	255355	154225	/	409580
Par matériaux composites	255355	210070	45900	511325

Le modèle produit a été maillé en utilisant des éléments cubiques. Le maillage aide à augmenter la précision des calculs en commandant le nombre d'éléments. Plus le maillage est raffiné plus l'exactitude de la simulation augmente.

IV.10- Condition aux limites :

Dans cette modélisation nous avons l'axe x du système des coordonnées qui coïncide avec l'axe longitudinal de la structure, l'axe y coïncide avec l'axe vertical, et l'axe z représente l'axe transversal du bâtiment étudié.

Les conditions aux limites choisies pour les trois cas de modélisations du bâtiment (avant renforcement, conforté par chemisage, renforcé avec les matériaux composites) sont identiques, et présentent des encastresments aux niveaux des fondations dans laquelle les déplacements été bloqués suivants les trois directions (ox, oy, oz).

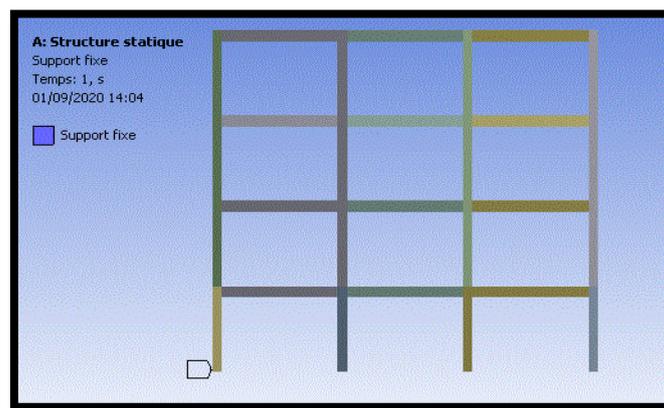


Figure IV.16: Conditions aux limites

IV.11- Analyse de la structure confortée par chemisage :

IV.11.1- Introduction :

L'analyse de la structure confortée est une étape délicate, elle a pour but d'examiner l'ouvrage et ainsi de prendre la décision d'arrêter ou de continuer de le renforcer.

L'existence de certains logiciels d'analyse des structures apporte une aide considérable pour l'ingénieur, ils lui permettent la modélisation de ces conceptions surtout les ouvrages neufs, mais dans le cas de la conception des ouvrages confortés avec des éléments résistants composés de deux bétons différents, il est préférable de trouver un support simplifié qui pourra prédire le plus correctement possible le comportement probable de la structure.

IV.11.2- Confortement de la structure :

Il est possible d'augmenter la capacité résistante aux forces sismiques d'une structure existante en ajoutant des éléments pour résister partiellement ou totalement à ces efforts, et soulager l'ancienne structure en lui laissant reprendre la part dont elle est capable.

C'est en fonction des particularités de la structure existante et du plan de fonctionnement de l'ouvrage, qu'on choisit le type, le nombre et les dimensions des nouveaux éléments.

Des efforts horizontaux entre les éléments résistants Alors il est très important de réunir les conditions suivantes :

- Positionner les éléments de renforcement de la structure d'une manière à éviter la concentration des forces dans les éléments de faible résistance et/ou de faible ductilité.
- En améliorant la distribution de l'effort horizontal en réduisant les effets de torsion et des irrégularités.
- Accorder aux éléments de structure et à la structure entière, une résistance, une rigidité et une ductilité suffisantes.
- Donner une bonne résistance aux liaisons entre la structure existante et les nouveaux éléments introduits.

Vu la faible résistance du béton dans les poteaux et poutres, il a été décidé de chemiser ces derniers. Pour une bonne exécution, le chemisage en béton armé doit avoir une épaisseur de préférence 15cm pour le cas des poteaux de rive, le nôtre sera de 11cm, et de 5cm pour le cas des poutres de rive.

Les poteaux chemisés constitués de deux bétons, peuvent être modélisés, en négligeant l'ancien béton en termes de masse et de résistance.

IV.12- Modélisation du cas de chemisage :

Dans notre cas nous modéliserons les poteaux et poutres de rive renforcés avec technique de chemisage. On procède à cette technique comme suit :

- Piquage des poteaux jusqu'à atteindre les armatures existantes.
- Dénuder le béton au niveau des poutres à l'endroit des armatures afin de chemiser le poteau.
- Assurer une surface rugueuse pour l'ensemble de surface à chemiser ou à conforter.
- Mise en place de ferrailage selon les plans d'exécutions avec la mise en place des cales en béton pour assure l'enrobage
- Confection d'un coffrage étanche et résistant qui évite toute fuite de laitance lors de vibration.
- Coulage du béton pour une résistance minimale de 28 jours à 25 MPa avec l'utilisation d'une résine de reprise de bétonnage et avec une vibration optimale.
- Le décoffrage devrait se faire une fois qu'une bonne résistance du béton soit atteinte et avec un aspect de béton qui répond aux exigences de bonne mise en œuvre.
- La préparation et le coulage des poteaux et poutres chemisés, devraient se faire par phasage et en alternance.
- Soufflage et lavage « grand jet d'eau ».



Figure IV.17 : Réalisation du coffrage des poteaux à chemiser

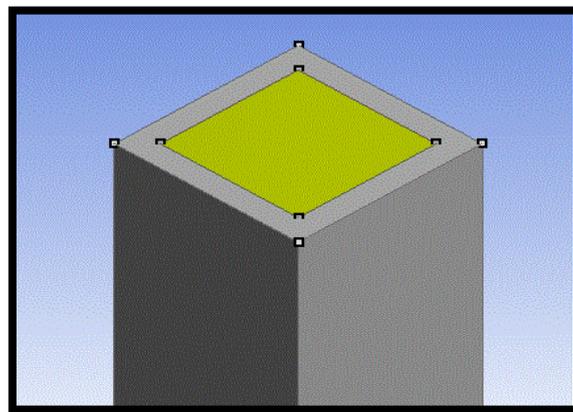


Figure IV.18 : Modélisation à l'aide d'ANSYS du poteau dans le cas du chemisage

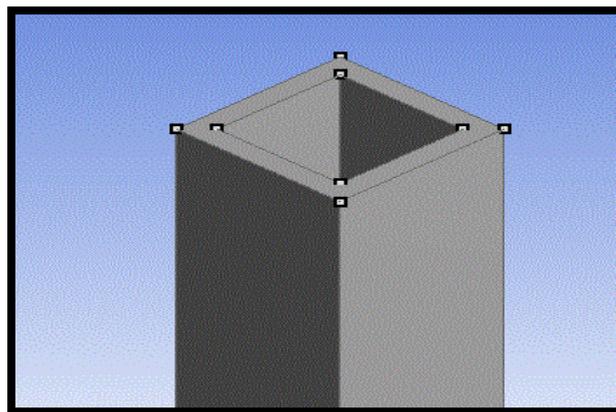


Figure IV.19: Modélisation du béton de chemisage autours du poteau

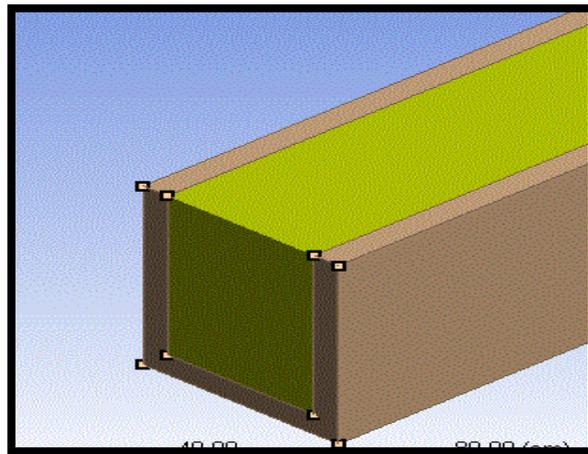


Figure IV.20: Modélisation de la poutre chemisée à l'aide d'ANSYS

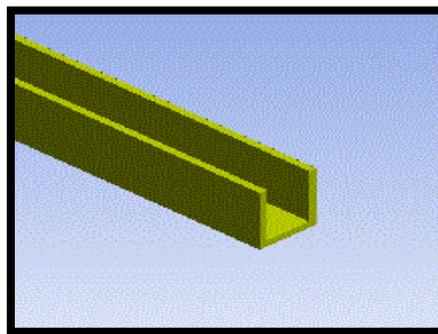


Figure IV.21: Modélisation du béton de chemisage autours de la poutre

IV.13- Modélisation du cas des composites :

Les dimensions et les distances aux bords des lamelles et des tissus avec leurs résines époxydiques doivent être modélisés selon les prescriptions de mise en œuvre particulières au procédé SikaCarboDur et SikaWrap mentionnés dans le document technique fourni par la société Sika, qui est agréée par la commission chargée de formuler des Avis Techniques et Documents Techniques d'Application.

IV.13.1- Pose de la lamelle SikaCarboDur :

- a) Appliquer la colle Sikadur-30 par double encollage : une couche sur le support béton (1mm environ) et une couche sur la lamelle SikaCarboDur (1 à 1,5 mm).
- b) Sur les bords de poutre à renforcer, il faut respecter une distance entre la lamelle et l'arête de la poutre. La lamelle doit être positionnée à une distance de l'enrobage des armatures internes du béton armé. Cela évite de renforcer une zone non armée sujette à fissuration.

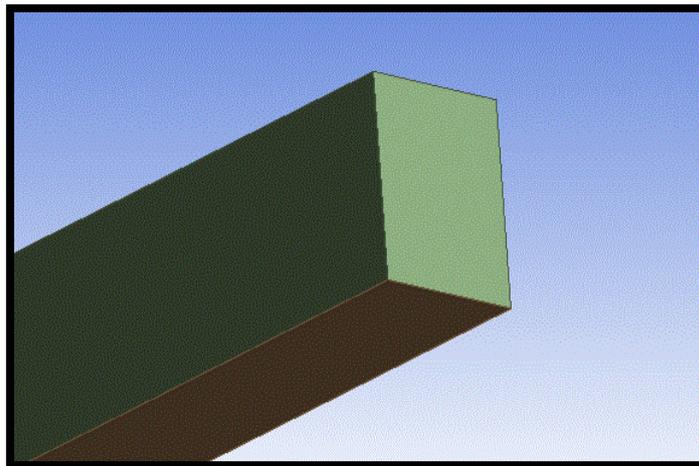


Figure IV.22: Pose de la SikaCarbodur sur la face inferieure de la poutre

L'encollage de la lamelle se fait généralement sur un plan de travail propre et protégé par un film plastique. L'application de la colle sur la lamelle est réalisée à l'aide d'une spatule ou d'une truelle langue de chat pour les faibles linéaires de lamelle ou à l'aide d'un dispositif d'encollage adapté pour les linéaires plus importants.

IV.13.2- Application du tissu SikaWrap-600 C :

Etape A :

Application du primaire sur le support. Le choix du primaire Sikadur-300 ou -330 doit se faire en fonction du profil de la surface du support, des irrégularités, de la texture et du nombre de couches de tissu à mettre en œuvre :

a) Cas général :

Support lisse, peu de rugosité, absence de bullage, appliquer le Sikadur-300. Consommation $\approx 200 \text{ g/m}^2$. L'application se fait à l'aide d'un rouleau.

b) Cas particuliers :

Si la surface du support présente une rugosité moyenne à importante, s'il y a un bullage important le primaire Sikadur-330 doit être utilisé. Consommation ≈ 250 à 500 g/m^2 . L'application se fait à l'aide d'un rouleau, d'une taloche crantée, d'une brosse, d'une truelle.

Etape B :

Imprégnation du tissu SikaWrap-600 C sur plan de travail

a) Sur le plan de travail revêtu d'une feuille de plastique propre, répartir les 2/3 de la quantité prévue de résine Sikadur-300, soit environ $0,7$ à 1 kg/m^2 ,

b) Placer le tissu SikaWrap-600 C prédécoupé sur la feuille plastique enduite de résine Sikadur-300.

c) Imprégner le tissu dans la résine à l'aide d'un rouleau laine ou plastique ou raclette caoutchouc dans la direction longitudinale des fibres jusqu'à ce que la résine pénètre et sature le tissu.

d) Répartir ensuite le 1/3 restant ($0,3$ à $0,5 \text{ kg/m}^2$) de résine Sikadur300 sur le tissu, puis enduire uniformément à l'aide du rouleau pour saturer complètement le tissu.

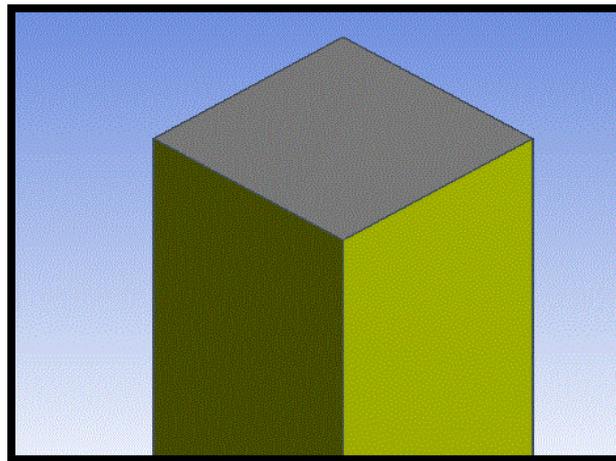


Figure IV.23: Pose de la Sika Wrap sur toutes les surfaces du poteau

IV.14- Géométrie des composites :

Les géomètres de lamelle et le tissu avec leurs résines époxydiques sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau IV.7 : Géométrie des composites

	Longueur (m)	Largeur (m)	Epaisseur (mm)
SikaCarboDur S	69	1.1	1.2
CarboDur 30	69	1.1	3
SikaWrap-600 C	69	0.9	0.33
Sikadur-300	69	0.9	1.5

IV.15- Connectivité des éléments :

Dans les modèles en éléments finis, les couches d'éléments solides (Solid185) ont été employées pour modéliser les matériaux composites. Les nœuds des couches d'éléments solides, solid46, où les matériaux composites ont été reliés à ceux des éléments solides, solid65, béton adjacent afin de satisfaire la condition de connexion parfaite. Le schéma ci-dessous illustre la connectivité d'éléments.

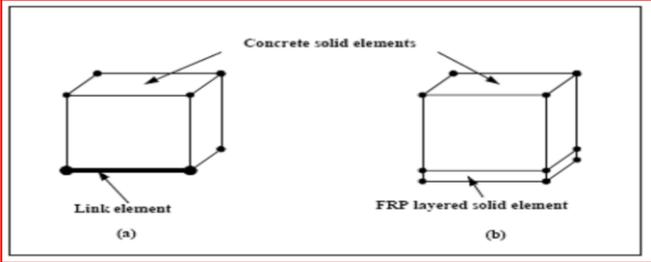


Figure IV.24: Connectivité des éléments : (a) élément solide65 (béton), (b) élément solide65 (béton) et les couches du matériau composite éléments solide185.

CHAPITRE V : Résultats et discussions

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. Lors d'une analyse modale, on calcule les fréquences naturelles circulaires ω_i et les formes des modes propres de vibrations φ_i à partir de l'équation :

$([K] - \omega_i^2 [M]) \{\varphi_i\} = 0$ avec $[K]$ et $[M]$ les matrices de rigidité et de masse de la structure.

Ces deux matrices sont assumées être constantes, c'est-à-dire que l'on considère :

- un comportement linéaire élastique des matériaux.
- la théorie des faibles déformations, sans non-linéarité.

On en déduit les fréquences propres de vibration de la structure $f_i = \omega_i / 2\pi$ (en Hz, c'est-à-dire en cycles/s).

V.2- Différences entre analyse modale et analyse statique :

Une analyse de vibrations propres 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 affectés 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 requière que l'on renseigne le module d'élasticité, le coefficient de Poisson et la masse volumique du ou des matériaux considérés.

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 considérer 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...

Cela permet tout de même de visualiser les zones de la structure qui concentrent les contraintes lorsque la structure est soumise à des vibrations. Par défaut, ANSYS calcule les résultats des 6 premiers modes de vibrations du modèle considéré, nombre que l'on peut modifier. De plus, on peut préciser au logiciel de déterminer les modes de vibrations associés à une certaine gamme de fréquence (par défaut, ANSYS considère un intervalle de 0 Hz à 10 Hz).

Les résultats peuvent être présentés sous forme de tableaux ou de graphes de type barre. Par ailleurs, la visualisation des différents modes de vibrations calculés peut être animée. De plus, toujours par défauts, les contraintes et les déformations de la structure causées par ses vibrations propres ne sont pas calculées. On peut cependant demander à les évaluer, tout en prenant en compte que les contraintes sont données sous forme d'une distribution relative des contraintes sur la structure, et non de leurs valeurs réelles.

Par ailleurs, outre les fréquences et les modes de vibrations propres de la structure, une analyse modale permet d'accéder aux facteurs de participation de chacun des modes de vibration.

V.4- Résultats numériques du cas choisi :

On présentera les résultats obtenus à partir de la modélisation faite de la structure du bâtiment prise dans notre cas d'étude et ce, avant réparation, chemisée, et renforcée avec des matériaux composites.

V.4.1- Modélisation du bâtiment sans renforcement :

L'analyse modale nous a permis d'obtenir des paramètres modaux de la structure étudiée. Les fréquences modales de l'analyse par la méthode des éléments finis fournies par ANSYS sont données dans le tableau V.2, avec les formes des modes correspondantes illustrées dans les figures suivantes. Ainsi que la courbe des fréquences et des périodes du cas étudié.

V.4.1.1- Analyse modale :

- MODE 1 :

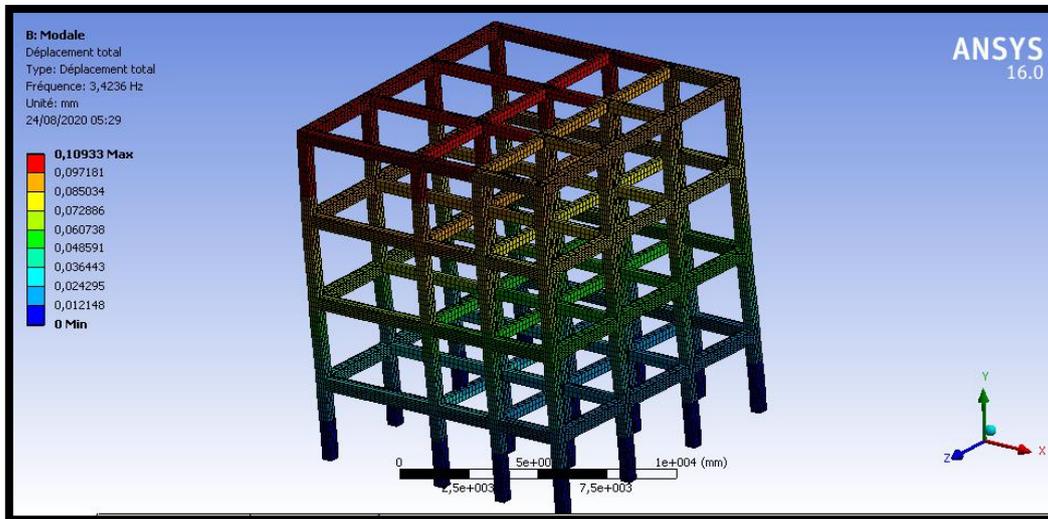


Figure V.1 : Modélisation de l’analyse modale (MODE 1) du bâtiment avant renforcement

- MODE 2 :

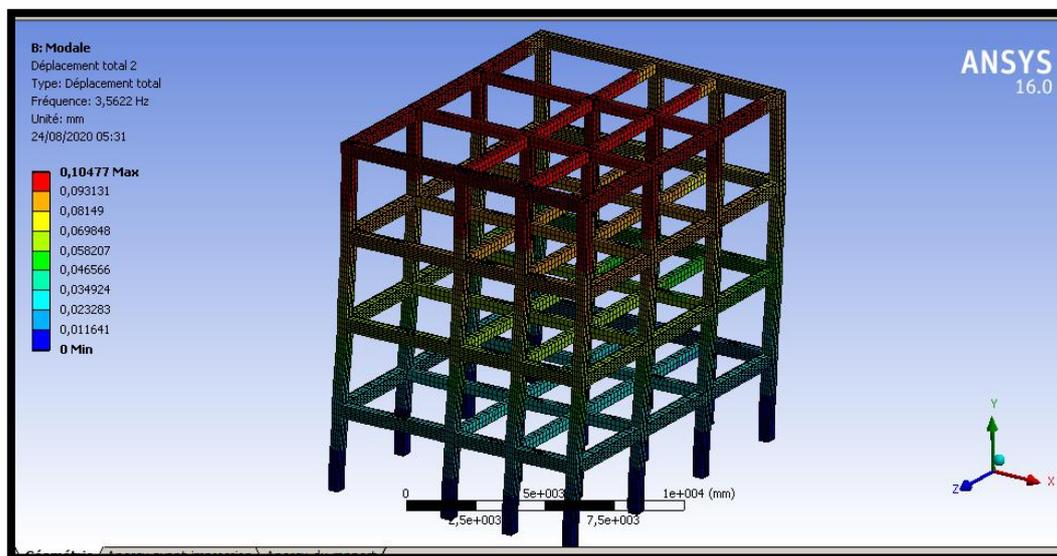


Figure V.2 : Modélisation de l’analyse modale (MODE 2) du bâtiment avant renforcement

- MODE 3 :

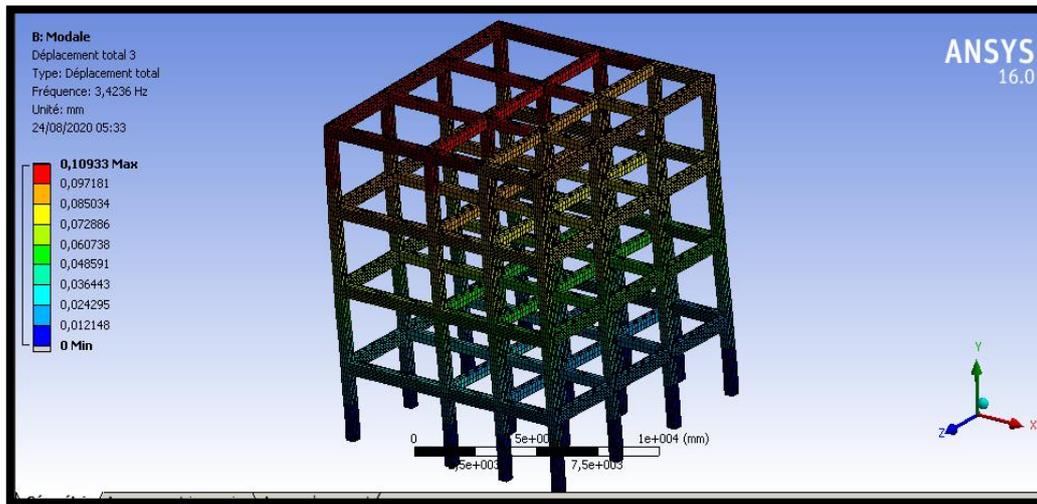


Figure V.3 : Modélisation de l’analyse modale (MODE 3) du bâtiment avant renforcement

- MODE 4 :

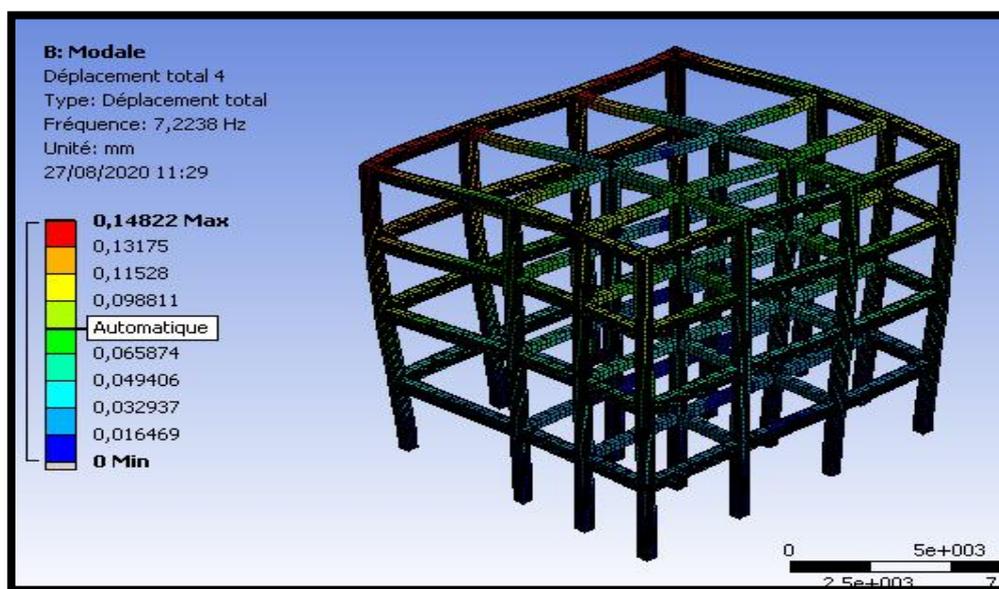


Figure V.4 : Modélisation de l’analyse modale (MODE 4) du bâtiment avant renforcement

- MODE 5 :

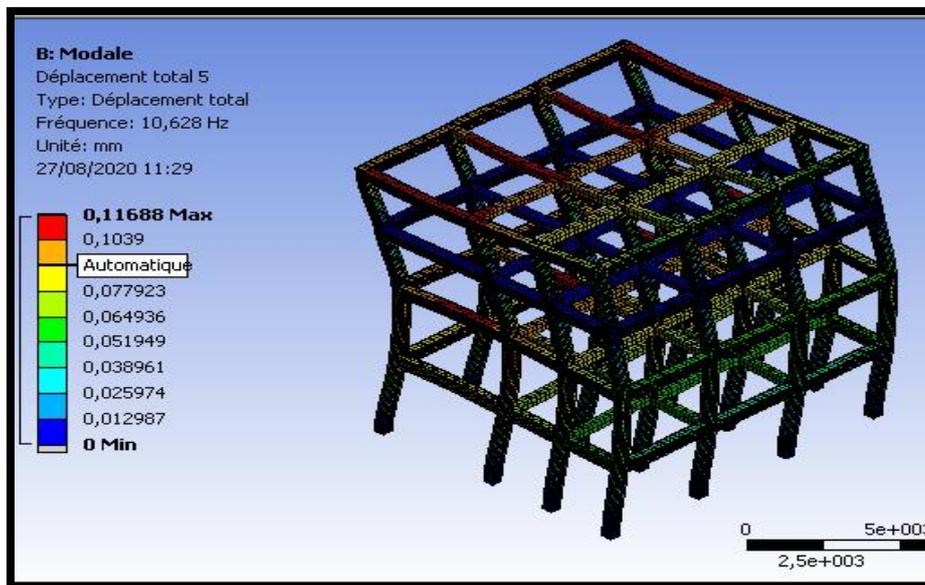


Figure V.5 : Modélisation de l'analyse modale (MODE 5) du bâtiment avant renforcement

- MODE 6 :

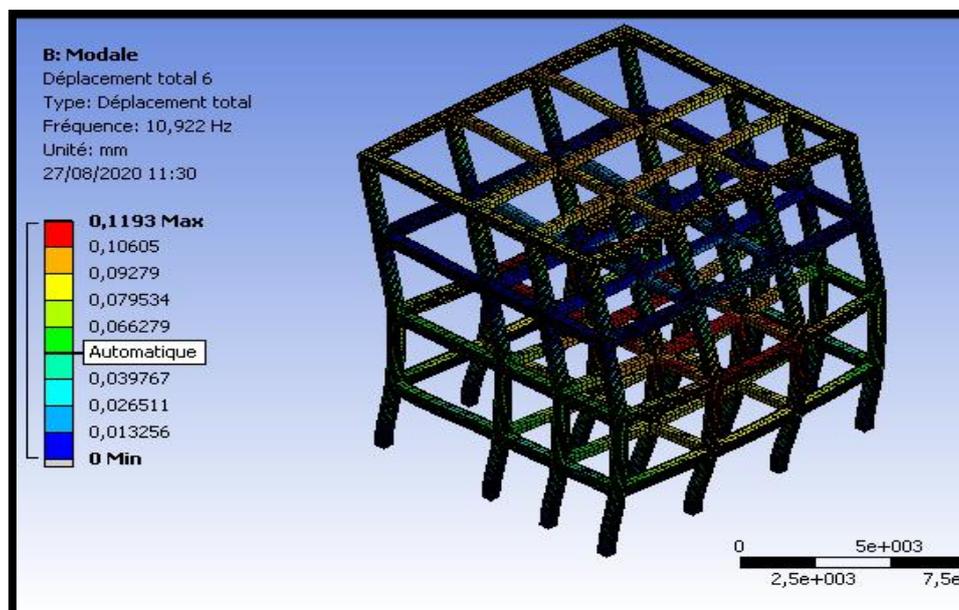
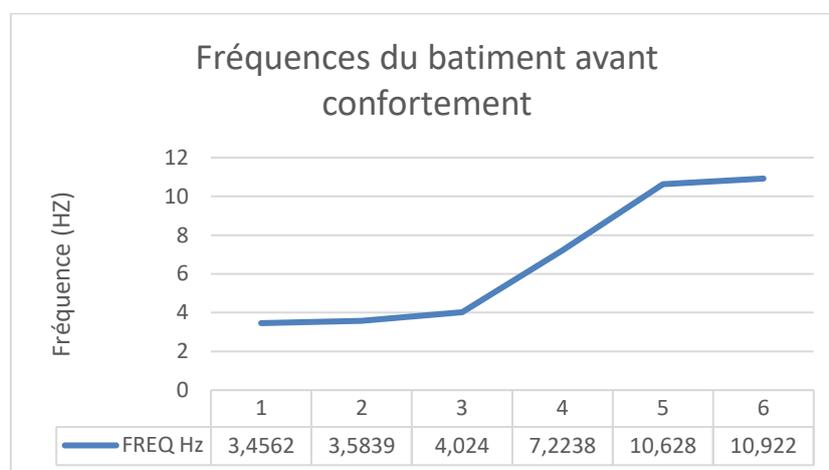
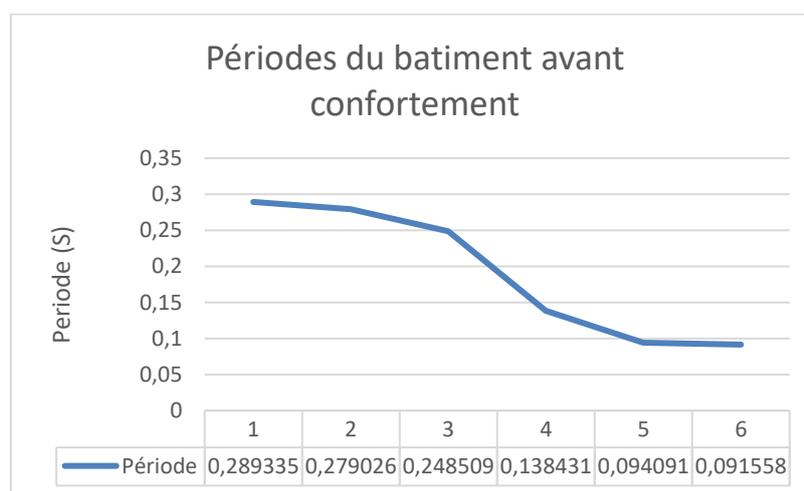


Figure V.6 : Modélisation de l'analyse modale (MODE 6) du bâtiment avant renforcement

Tableau V.1 : Valeurs des fréquences et des périodes donnés par ANSYS pour chaque mode

MODE	FREQ (Hz)	Période(S)	LOAD	STEP	SUBSTEP
1	3,4562	0,2893351	1	1	1
2	3,5839	0,27902564	1	2	2
3	4,024	0,24850894	1	3	3
4	7,2238	0,13843129	1	4	4
5	10,628	0,09409108	1	5	5
6	10,922	0,09155832	1	6	6

**Figure V.7** : Courbe des fréquences du bâtiment sans renforcement**Figure V.8** : Courbe des périodes du bâtiment sans renforcement

V.4.1.2- Analyse statique :

- Déplacement vertical :

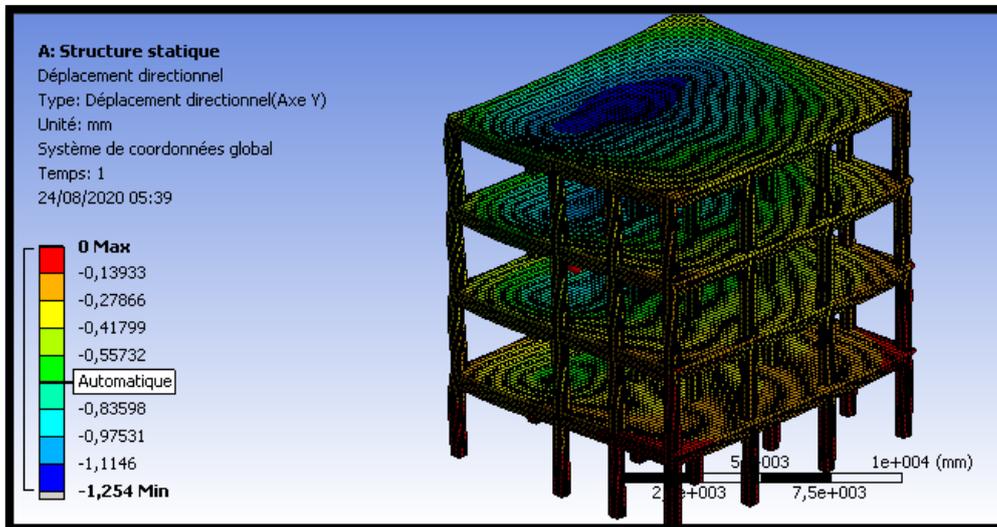


Figure V.9 : Modélisation du déplacement directionnel du bâtiment

- Contraintes normales :

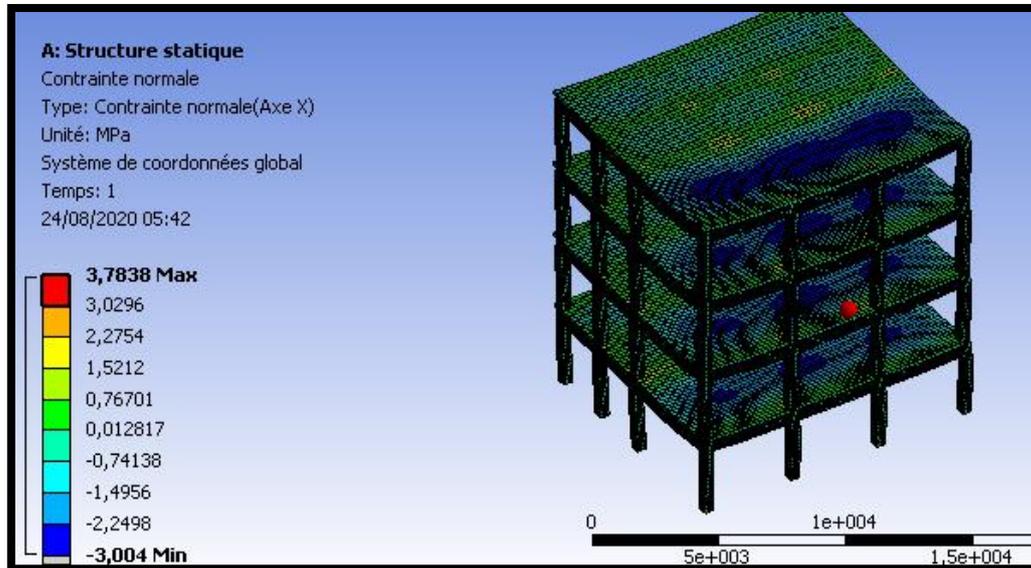


Figure V.10 : Modélisation de la contrainte normale du bâtiment

V.4.2- Modélisation du bâtiment dans le cas du chemisage :

L'analyse modale du bâtiment, dans le cas du chemisage des poteaux et poutres de rive, nous a donné des fréquences modales, calculées par la méthode des éléments finis fournie par

ANSYS, les résultats sont représentés dans le tableau V.4. Avec modélisation de chaque mode, ainsi que la courbe des fréquences et des périodes du bâtiment renforcé par la méthode de chemisage.

V.4.2.1- Analyse modale :

- MODE 1 :

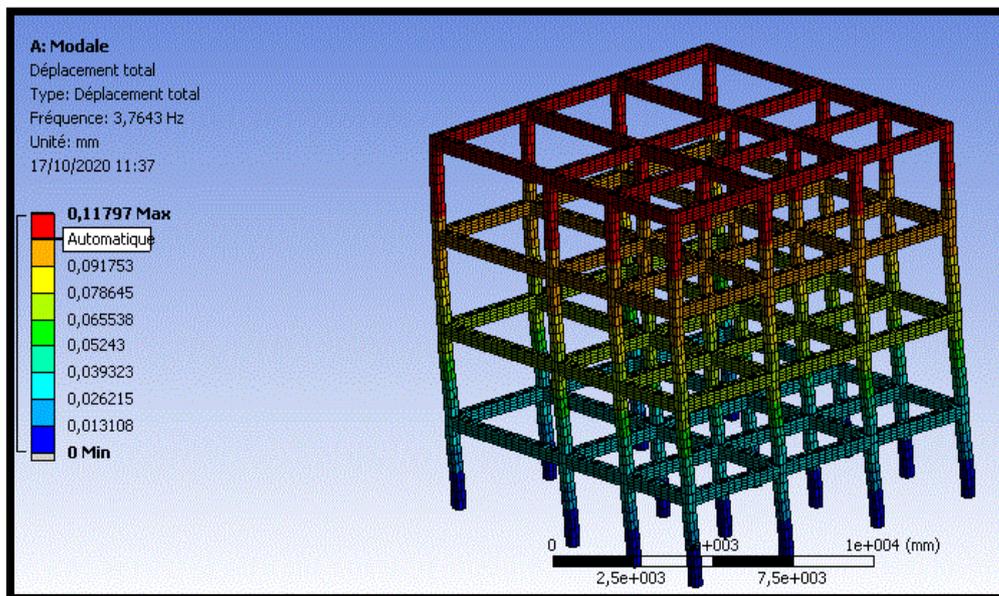


Figure V.11 : Modélisation de l'analyse modale (MODE 1) du bâtiment dans le cas du chemisage

- MODE 2

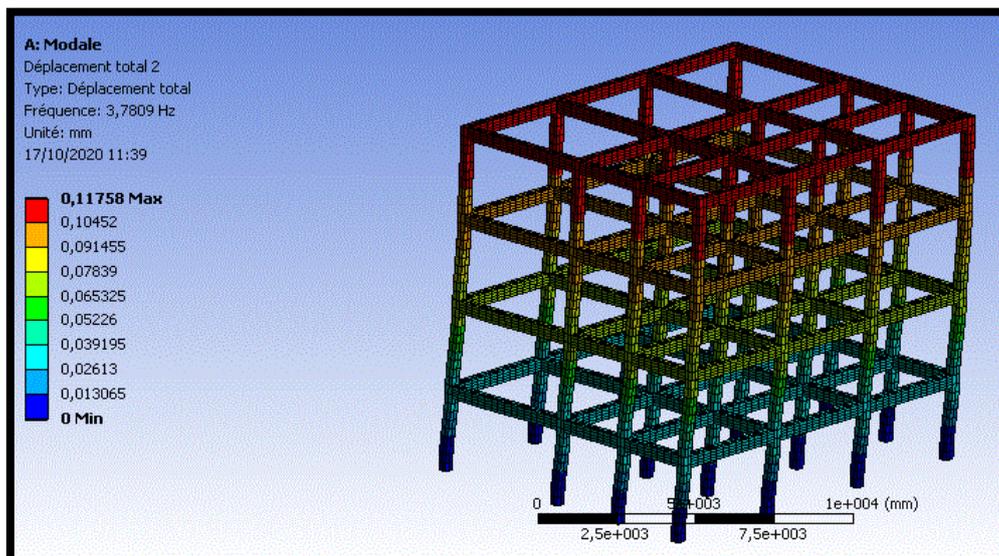


Figure V.12 : Modélisation de l'analyse modale (MODE 2) du bâtiment dans le cas du chemisage

- MODE 3 :

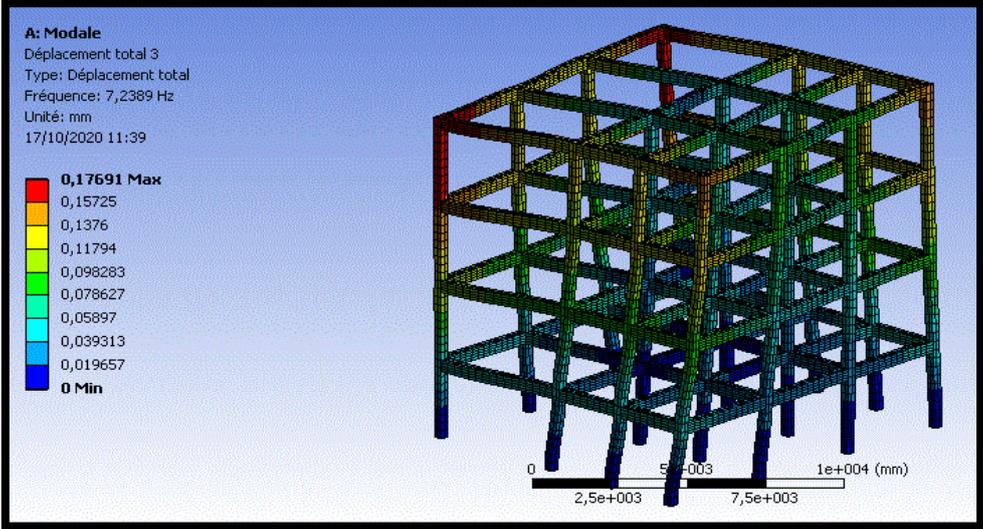


Figure V.13 : Modélisation de l’analyse modale (MODE 3) du bâtiment dans le cas du chemisage

- MODE 4 :

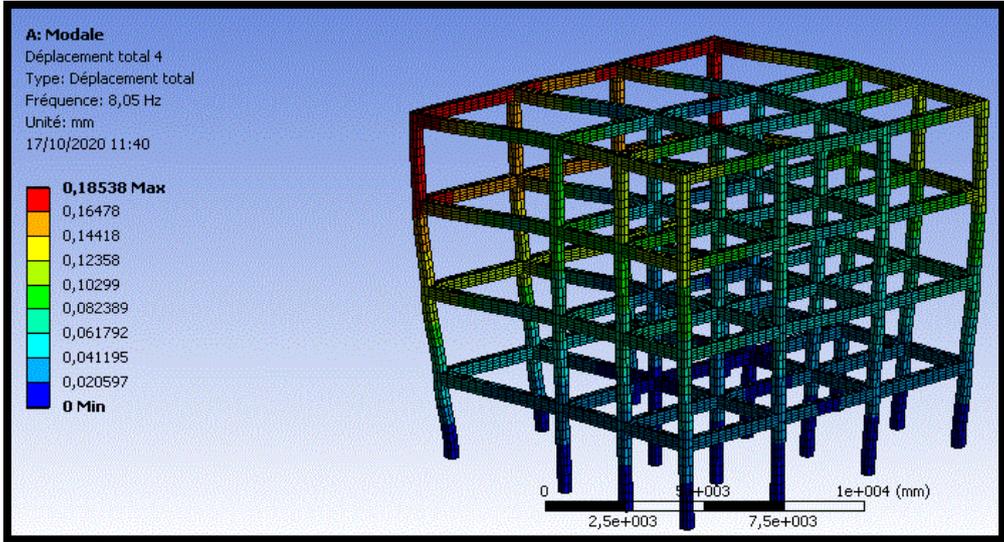


Figure V.14 :Modélisation de l’analyse modale (MODE 4) du bâtiment dans le cas du chemisage

- MODE 5 :

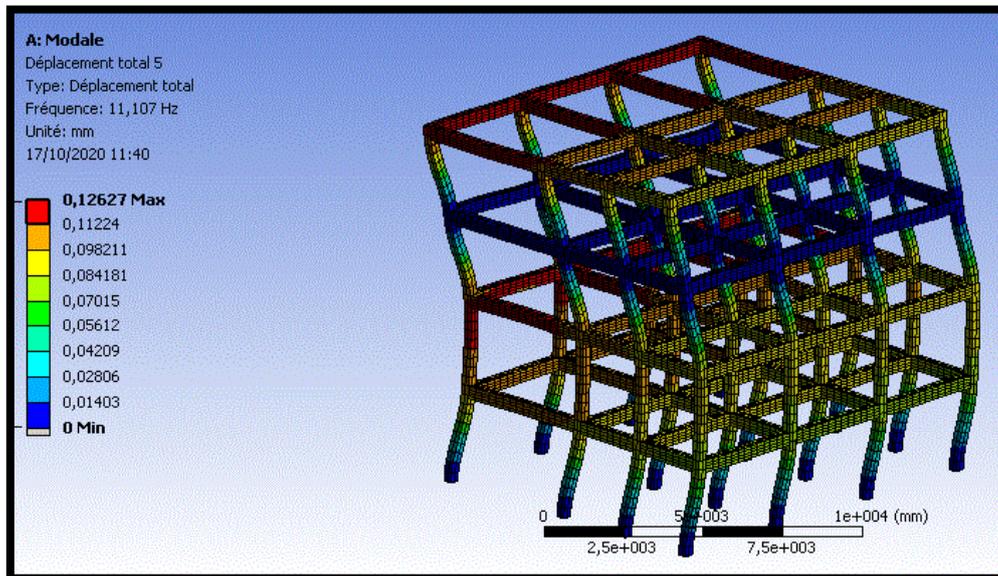


Figure V.15 :Modélisation de l'analyse modale (MODE 5) du bâtiment dans le cas du chemisage

- MODE 6 :

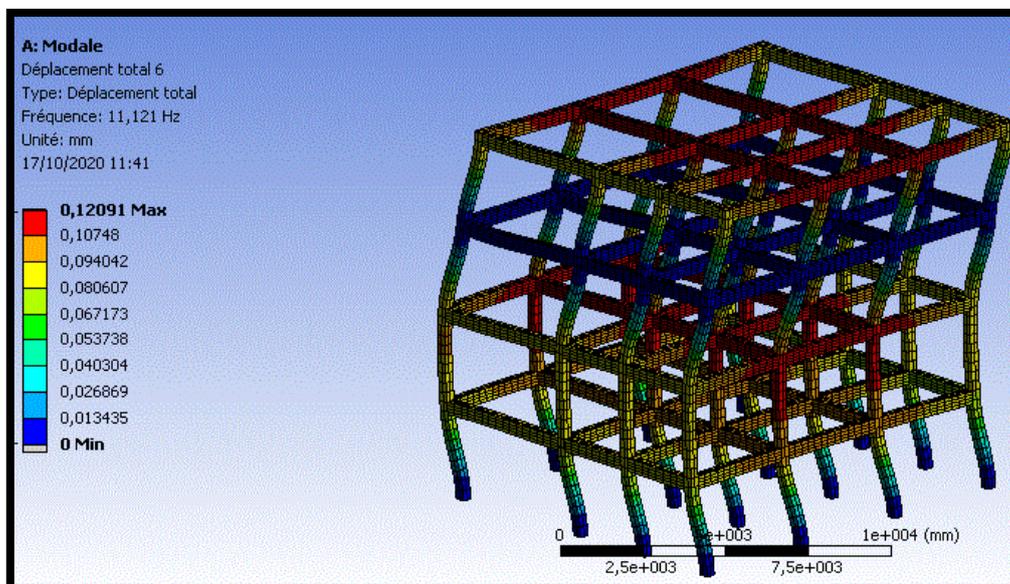


Figure V.16 :Modélisation de l'analyse modale (MODE 6) du bâtiment dans le cas du chemisage

Tableau V.2 : Valeurs des fréquences et périodes du cas du bâtiment chemisé obtenues par ANSYS

MODE	FREQ (HZ)	Période (S)	LOAD	STEP	SUBSTEP
1	3,7643	0,26565364	1	1	1
2	3,7809	0,26448729	1	2	2
3	7,2389	0,13814254	1	3	3
4	8,05	0,1242236	1	4	4
5	11,107	0,09003331	1	5	5
6	11,121	0,08991997	1	6	6

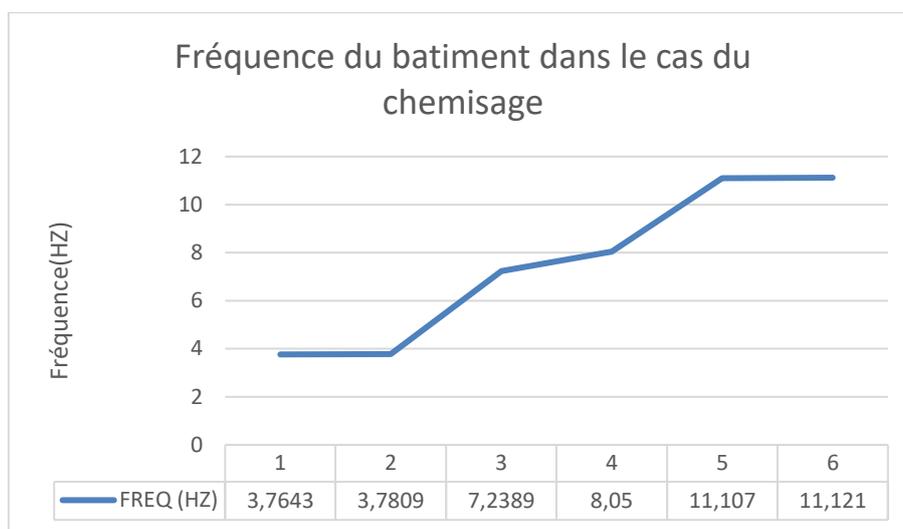


Figure V.17 : Courbe des fréquences du bâtiment dans le cas du chemisage

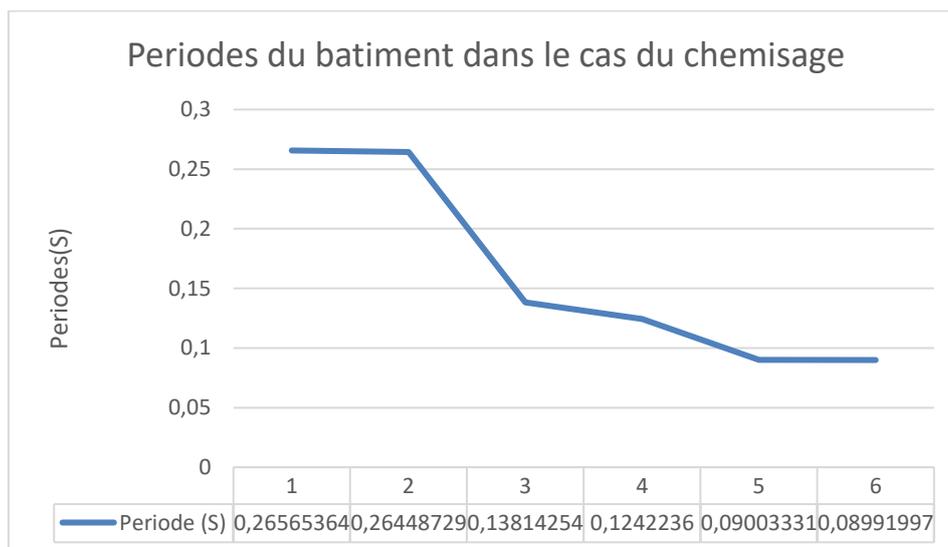


Figure V.18 : Courbe de la période du bâtiment dans le cas du chemisage

V.4.2.2- Analyse statique :

- Déplacement vertical :

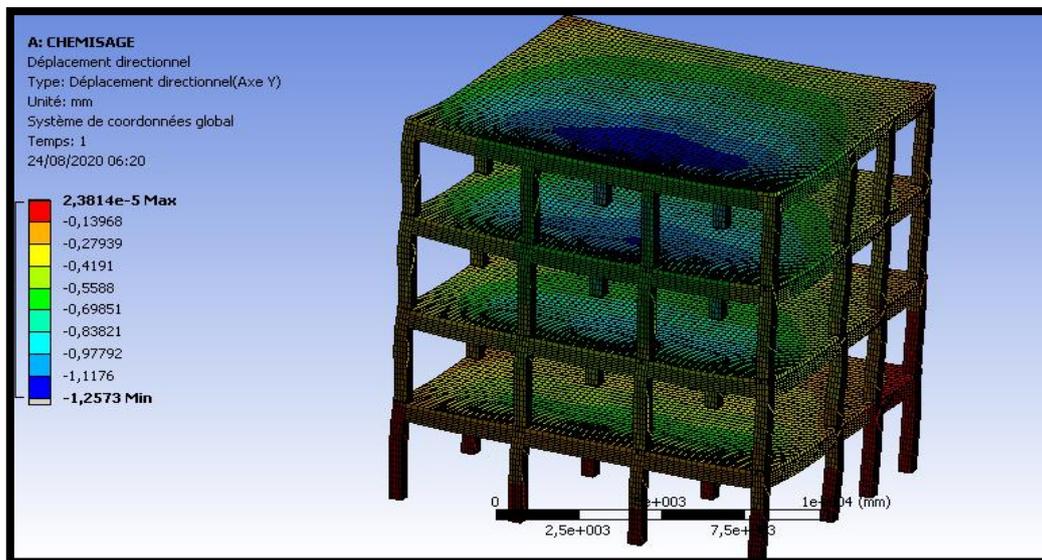


Figure V.19 : Modélisation du déplacement vertical du bâtiment dans le cas du chemisage

- Contrainte normale :

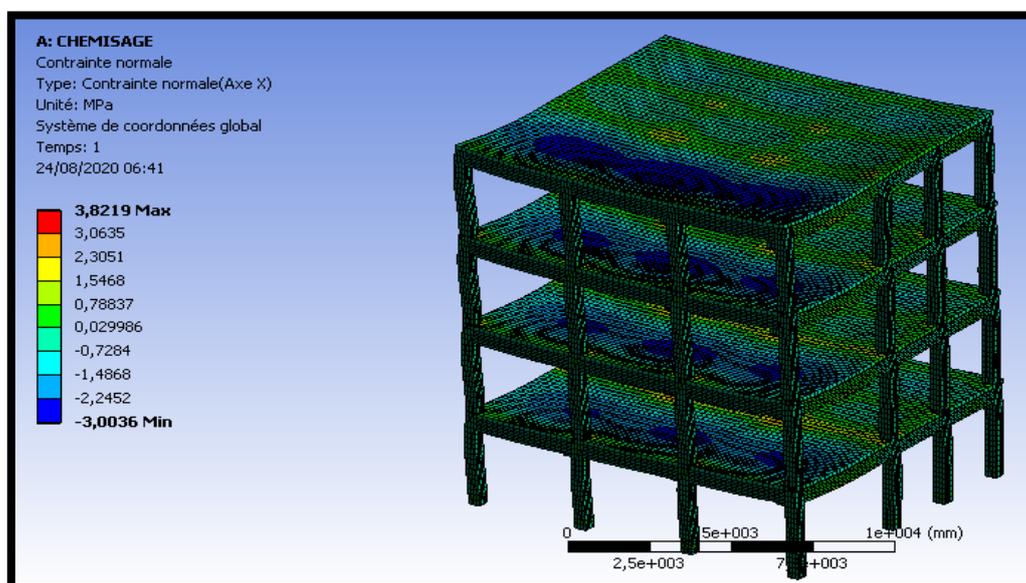


Figure V.20 : Modélisation de la contrainte normale du bâtiment dans le cas du chemisage

V.4.3- Modélisation du bâtiment dans le cas des matériaux composites :

L'analyse modale du bâtiment, avec renforcement des poteaux et poutres de rive à l'aide des matériaux composites, nous a donné des fréquences modales par la méthode des éléments finis fournie par ANSYS, les résultats sont représentés dans le tableau V.6. Avec modélisation de chaque mode, ainsi que la courbe des fréquences et des périodes du bâtiment renforcé par des matériaux composites.

V.4.3.1- Analyse modale :

- MODE 1 :

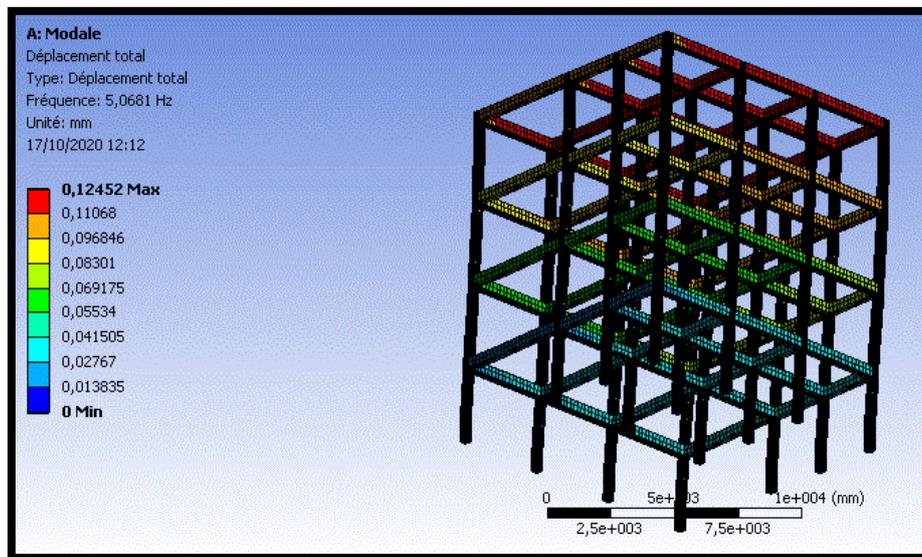


Figure V.21 : Modélisation de l'analyse modale (MODE 1) du bâtiment dans le cas des matériaux composites

- MODE 2 :

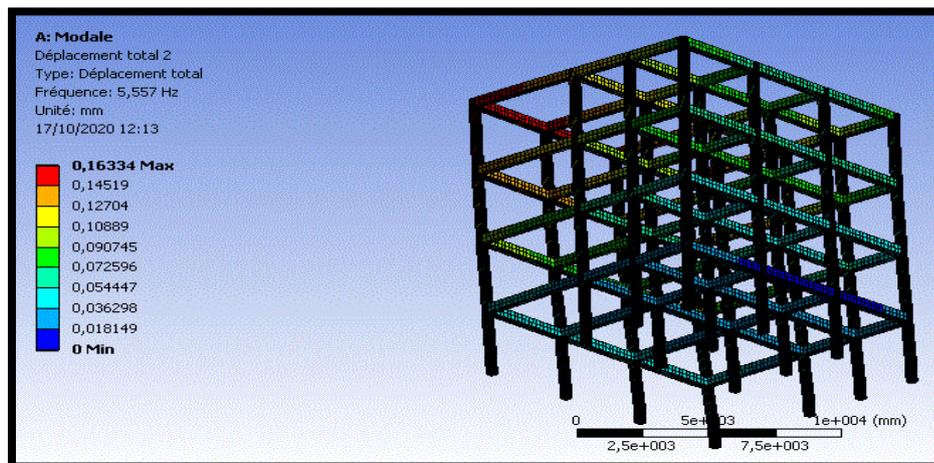


Figure V.22 : Modélisation de l'analyse modale (MODE 2) du bâtiment dans le cas des matériaux composites

- MODE 3 :

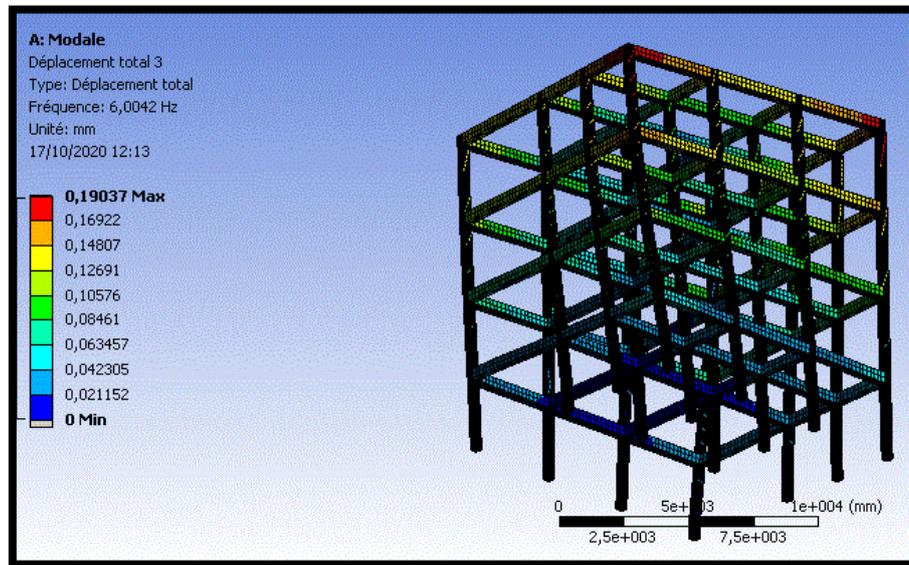


Figure V.23 : Modélisation de l'analyse modale (MODE 3) du bâtiment dans le cas des matériaux composites

- MODE 4 :

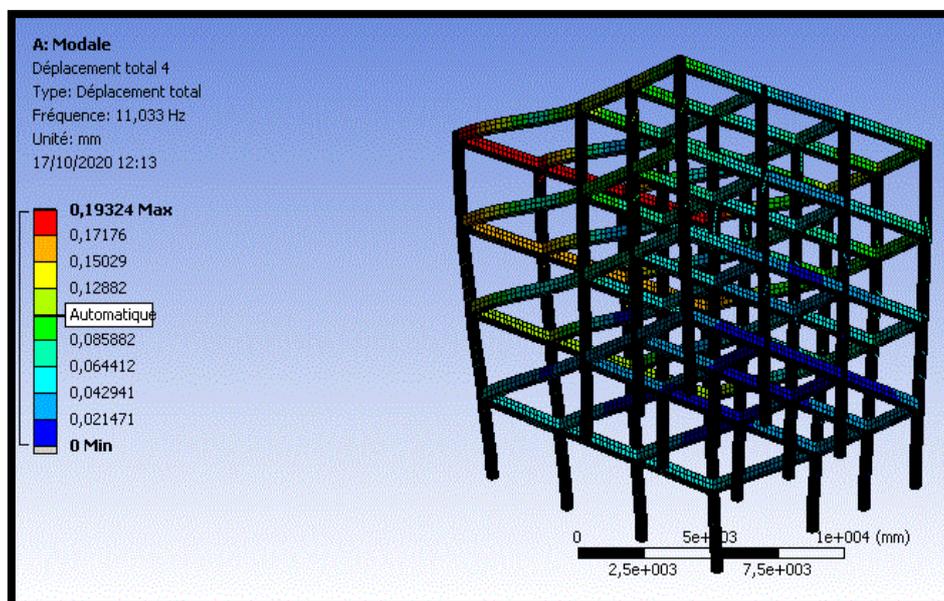


Figure V.24 : Modélisation de l'analyse modale (MODE 4) du bâtiment dans le cas des matériaux composites

- MODE 5 :

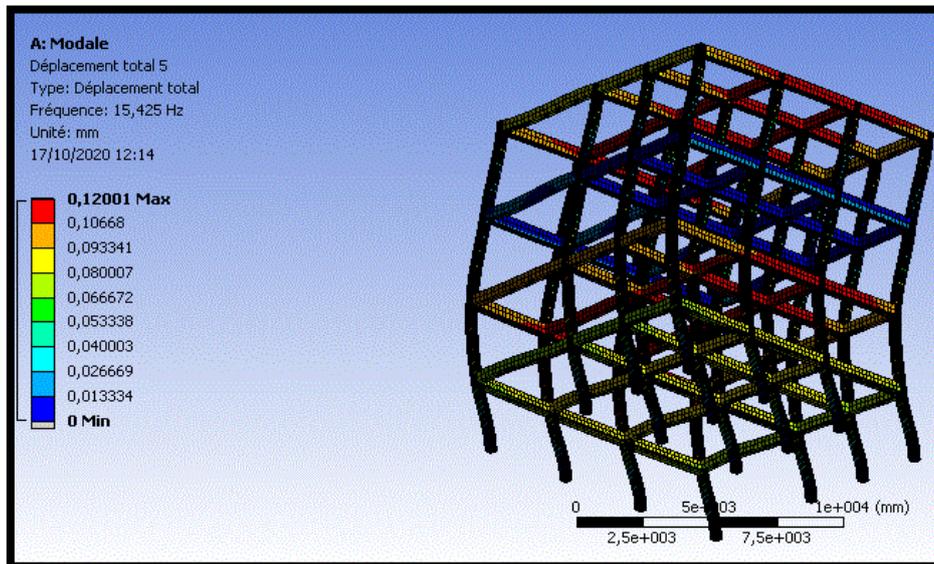


Figure V.25 : Modélisation de l’analyse modale (MODE 5) du bâtiment dans le cas des matériaux composites

- MODE 6 :

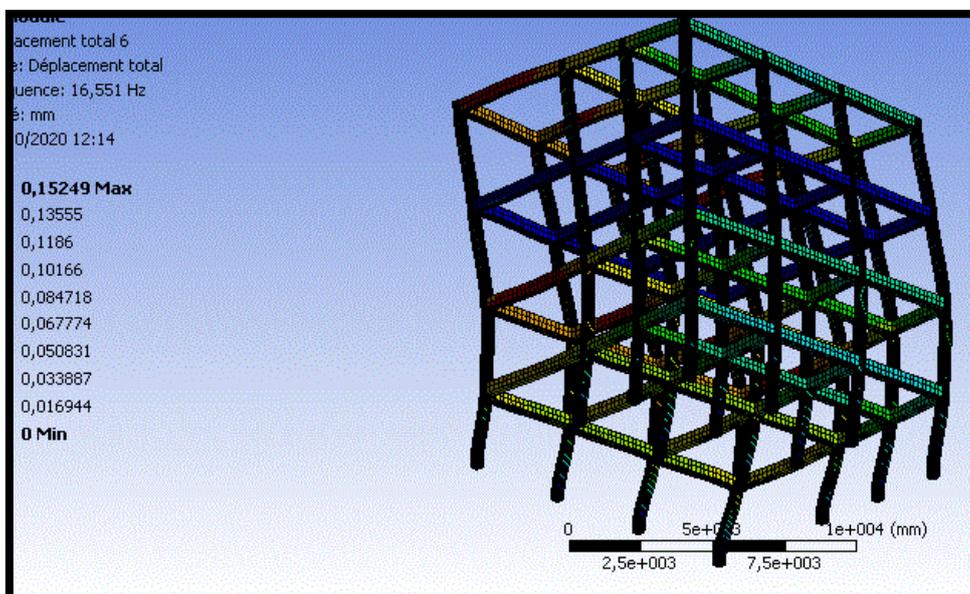


Figure V.26 : Modélisation de l’analyse modale (MODE 6) du bâtiment dans le cas des matériaux composites

Tableau V.3 : Valeurs des fréquences et périodes obtenues par ANSYS

MODE	FREQ (HZ)	Période (S)	LOAD	STEP	SUBSTEP
1	5,0681	0,1973126	1	1	1
2	5,557	0,17995321	1	2	2
3	6,0042	0,16655008	1	3	3
4	11,033	0,09063718	1	4	4
5	15,425	0,06482982	1	5	5
6	16,551	0,06041931	1	6	6

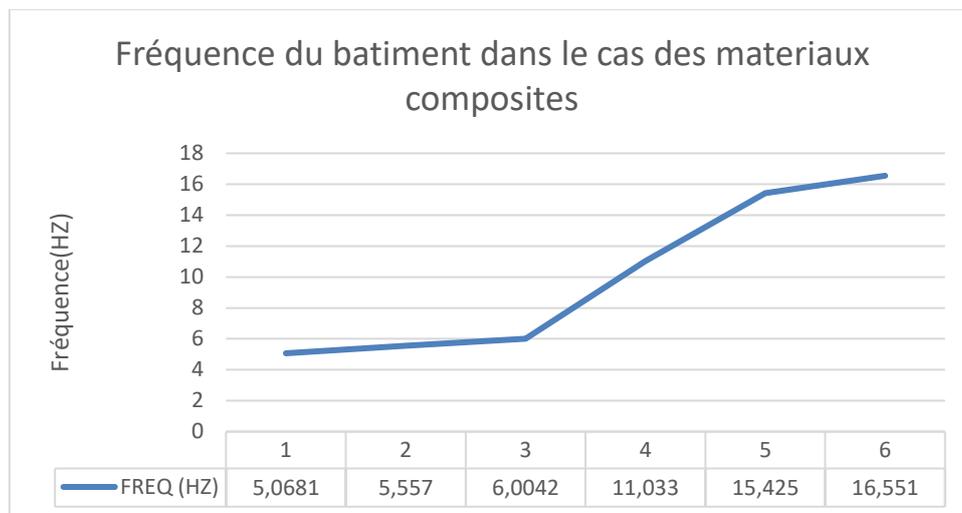


Figure V.27 : Courbe des fréquences du bâtiment dans le cas des matériaux composites

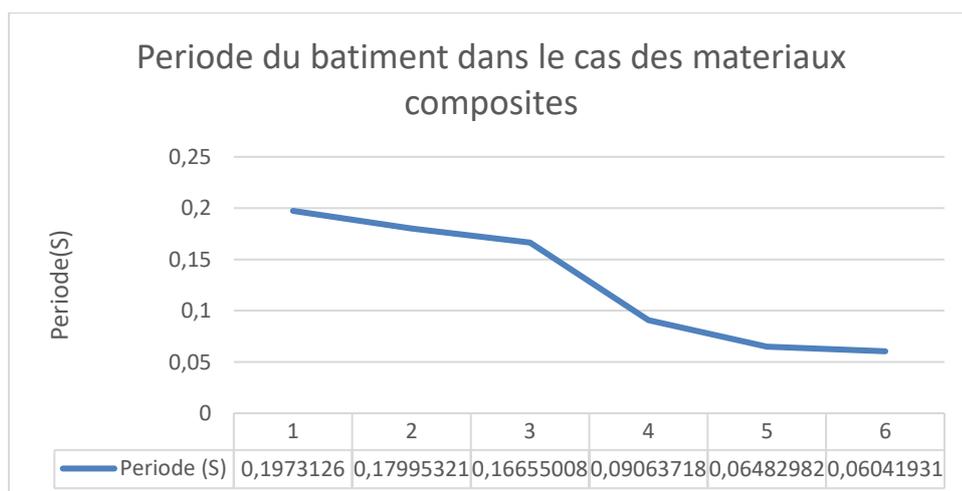


Figure V.28 : Courbe des périodes du bâtiment dans le cas des matériaux composites

V.4.3.2- Analyse statique :

- Déplacement vertical :

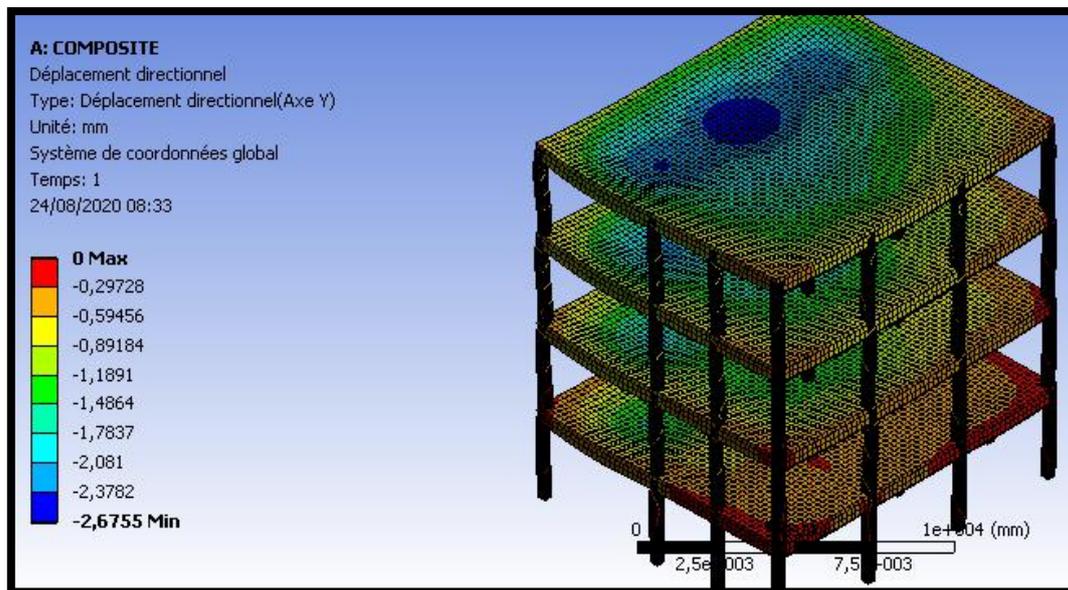


Figure V.29 : Modélisation du déplacement vertical du bâtiment dans le cas des matériaux composites

- Contraintes normales :

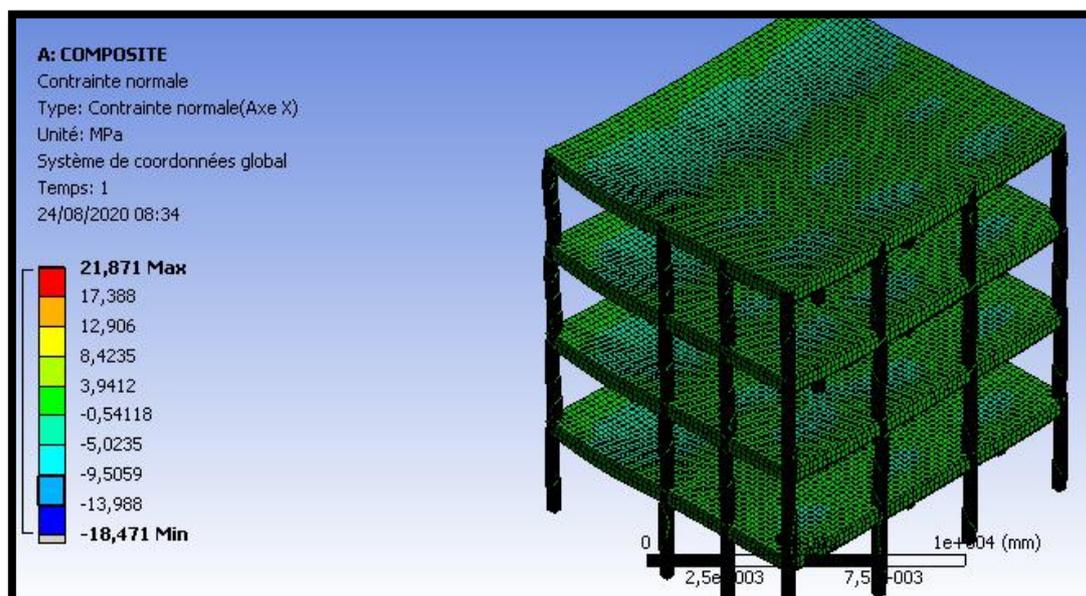


Figure V.30 : Modélisation de la contrainte normale du bâtiment dans le cas des matériaux composites

V.5- Comparaison et commentaires :

Le tableau V.8 présente une comparaison sommaire des valeurs numériques des fréquences et périodes obtenues à l'aide du logiciel ANSYS, en ayant effectué une modélisation en élément finis de la structure, avec les trois cas de simulation étudiés, (modélisation du bâtiment sans confortement, modélisation du bâtiment conforté par la méthode de chemisage et modélisation du bâtiment renforcé à l'aide de matériaux composites).

Les couleurs définissent chaque cas : le bleu représente le cas de la structure sans chemisage, le rouge représente le cas de la structure chemisée et enfin, le vert représente le cas de la structure renforcée par les matériaux composites.

Tableau V.4 : Comparaison sommaire des valeurs de fréquences et périodes des trois cas étudiés

MODE	FREQ(HZ)	Période (S)	FREQ (HZ)	Période (S)	FREQ (HZ)	Période (S)
1	3,4562	0,2893351	3,7643	0,26565364	5,0681	0,1973126
2	3,5839	0,27902564	3,7809	0,26448729	5,557	0,17995321
3	4,024	0,24850894	7,2389	0,13814254	6,0042	0,16655008
4	7,2238	0,13843129	8,05	0,1242236	11,033	0,09063718
5	10,628	0,09409108	11,107	0,09003331	15,425	0,06482982
6	10,922	0,09155832	11,121	0,08991997	16,551	0,06041931

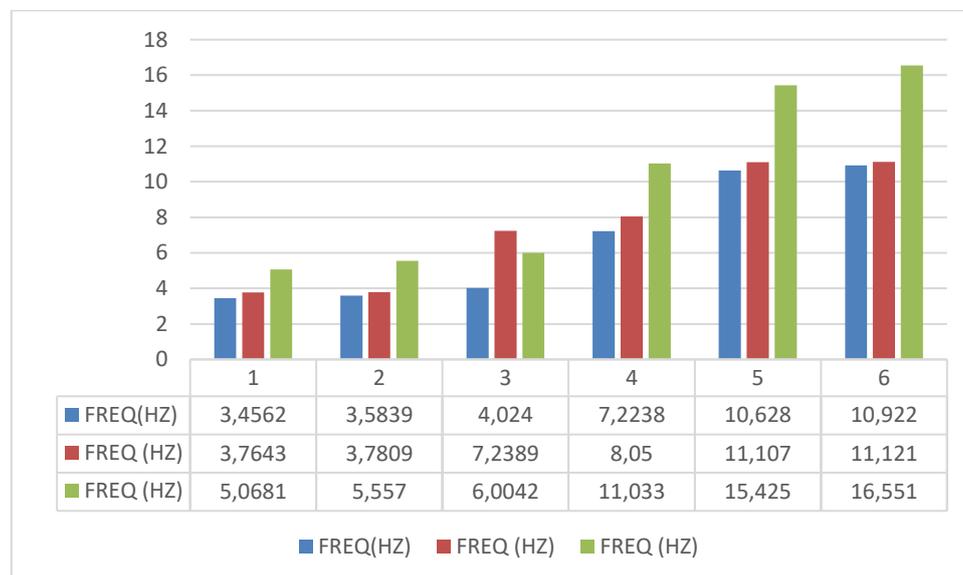


Figure V.31 : Graphe de comparaison des fréquences des trois cas étudiés

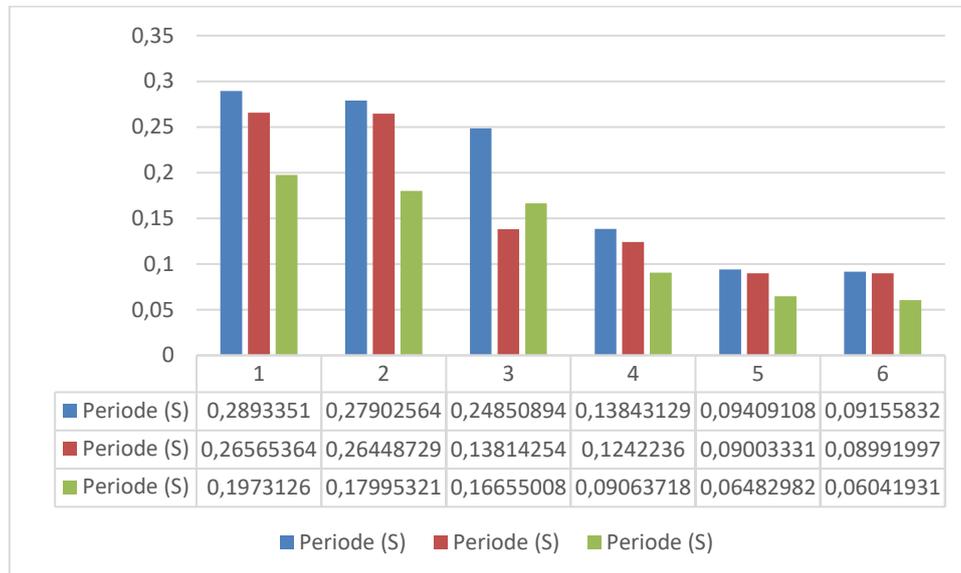


Figure V.32 : Graphe de comparaison des périodes des trois cas étudiés

Les résultats trouvés, sur la base, de la modélisation numérique par le logiciel ANSYS avec un comportement linéaire des matériaux (Béton, composites) ont montré l'efficacité du composites, en tant que solution alternative, vis-à-vis a la technique de chemisage.

Conclusion Générale et Recommandations

La sauvegarde du patrimoine existant des structures de bâtiments, et leur mise à niveau, constituent une préoccupation primordiale pour les experts en la matière et les des pouvoirs publics. En effet, ce patrimoine nécessite une attention particulière et des techniques de réparation et/ou renforcement choisies d'une manière fiable, surtout dans les zones à en risques majeurs (séisme, inondations, explosion, grande vibrations, etc.).

Les récentes travaux et études récentes faites sur les structures de bâtiments et/ou travaux publics, renforcées par matériaux composites ont montrés que ces derniers augmentent la rigidité des éléments de la structure, réduisent la déformation et redonnent aux éléments détériorés leur portance initiale. Cependant, la prise de cas de structures renforcées en présence des dégradations et calculées numériquement avec analyse modale, reste peu.

Le travail accompli dans ce mémoire, nous a permis de tirer des conclusions suivantes :

- L'utilisation des matériaux composites comme aciers additifs, pour le renforcement des éléments structuraux de bâtiments en béton armé est très efficace ;
- Les résultats numériques obtenus confirment l'effet bénéfique du renforcement sur le comportement global de la construction renforcée.
- Renforcement par matériaux composites plus rapide et plus simple contrairement au confortement par chemisage.
- L'utilisation des logiciels comme ANSYS peuvent nous aider pour le calcul surtout en ce qui concerne la modélisation des matériaux composites (fibre de carbone).
- L'analyse modale de la structure renforcée, donne un aperçu significatif du comportement de cette dernière en cas de séisme.
- Les matériaux composites améliorent les fréquences de vibrations et par conséquent font augmenter la rigidité de cette structure.

Nous recommandons, pour les futurs travaux de recherche, de prendre d'autres cas d'études d'éléments structuraux (bâtiments mixtes, ponts, barrages,) et faire les mesures in situ pour avoir de vraies valeurs en résultats. Le modèle pour le calcul numérique peut être amélioré afin de caler par des investigations in situ.

Références bibliographiques

- [1]ABELLA NAOUEL, «Techniques de renforcement des structures en béton en risque majeur», Thèse de Master, 2015.
- [2]L.YAMANI, «Cours de construction(1)», Edition O.P.U, collection le cours d'architecture et urbanisme, 1993.
- [3]BERRAHAIL, W., TAKBOU, L., «Etude comparative entre techniques de renforcement par application des matériaux composites : cas des ponts routiers», Mémoire de master, 2019.
- [4]PLACIDI MICHEL, «Cours de ponts : Principes généraux - Conception Méthodes de construction».
- [5]LILA, M.A, Spécialité : Génie Civil Option : Géotechnique et environnement Surveillance et sécurité des barrages, 2013.
- [6]W. De CALUWE (FEREB), M. LE BEGGE(CFE), «Réparation et protection des ouvrages en béton (bâtiment et génie civil)», Note d'information technique 231(CSTC), page 7, Septembre 2007.
- [7]EHAB, I., «Pathologie de structures en béton armé», Mémoire de Master Académique, 2016.
- [8]GUILLEMONT Pierre, «Ouvrages en béton armé», édition Dunod, 2015.
- [9]BEDDIAR.A, «Renforcement de poutres en béton armé a l'aide de matériaux composites : Etude théorique et numérique », mémoire de magister, 2004.
- [10]<http://doc.lerm.fr/wp-content/uploads/2013/08/carbonatation-carde.pdf> «La carbonatation» [Solutions béton - Hors-série], 2013.
- [11]<http://forum-btp.blogspot.com/2018/04/pathologies-des-betons.html>, «Pathologie des bétons», le monde du génie civil.
- [12]AIT SI YOUSSEF.S, KARAB.C, «Pathologie des bâtiments», mémoire de Master, Rabat, 2019
- [13]CHRISTOPHE CARDE, directeur technique du LERM, MATIERE (Le retrait des bétons), Septembre/Octobre 2006.
- [14]KACI.O, «Outil d'aide à la décision appliqué aux ouvrages d'art», mémoire de master professionnel, 2017.

[15] **LAURENT JOSSERAND**, Ressuage des bétons hydrauliques (Ressuage des bétons hydrauliques. Mechanics). Ecole des Ponts Paristech, 2002.

[16] **Ahmed LAICHAOUI**, « Analyse expérimentale du comportement des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites », mémoire de magister, 2006.

[17] **SIDNEY M. JOHNSON**, "Dégradation, entretien et réparation des ouvrages du génie civil", Editions Eyrolles, 1969.

[18] **C.G.S**, « Catalogue des méthodes de réparation et de renforcement des ouvrages », Alger – 2^{ème} semestre 1992.

[19] **ABOU CHAKRA, F.**, Renforcement des poteaux en béton armé au moyen de polymère renforcé par fibre de carbone : comparaison des codes Farid Abou Chakra To cite this version : HAL Id : dumas-01664765, 2017.

[20] **AIT TALEB Souad**, «Simulation numérique d'un cylindre en béton confiné hélicoïdalement par des bande en FRP ». Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, juillet 2012.

[21] **Yehya, K., & Younes, S.**, «Recherche bibliographique sur la réhabilitation des voiles et des poutres en béton armé», Mémoire de Master, 2016.

[22] Structure, rencontres scientifique, SOCOTEC-CTC année 2002.

[23] Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, «Recommandations techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages», premier semestre 1992.

[24] Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique," Catalogue des méthodes de réparation et de renforcement des ouvrages", Deuxième semestre 1992.

[25] **JEAN CHAUDESAIGUES**, «Renforcer ou réparer une structure : Pourquoi et comment», Annales N° 411, Tome 1,1983, (4-25).

[26] **J.V.MIRANDA**, techniques et systèmes de renfort des structures en béton 2004

[27] **AIT TAFATI ABDERRAHMANE**, «Réparation des poutres en béton armé endommagées à l'aide des matériaux composites hybrides», Mémoire de Master, Boumerdes, 2017.

[28] «Les techniques de réhabilitation renforcer les structures ».

[29] **Ould El Hacem Zein El Abidine**, «renforcement du béton par les matériaux composites», Mémoire de Master, 2016.

[30] Charges permanentes et charges d'exploitation, DTR B C 2 2.

[31] **BERNARD BLACHE, JEAN-DANIEL MERLET**, " Comment réparer le béton armé", Cahiers techniques du bâtiment, Editions du Moniteur, Avril 1993, (25-32).

- [32] **Amjad KREIT**, « Prolongation de la durée de vie des ouvrages en béton armé », thèse De doctorat, Universités de TOULOUSE, France, 2015.
- [33] **AMIR-MAZAHERI, BISCH, CAPRA, CHENAF, DAVIDOVICI, DELMOTTE, TAILLEFR**, « Renforcement parasismique du bâtiment existant » : guide méthodologique.
- [34] Cours de MDC II, Université Sétif-1, Faculté de technologie, Département de Génie civil.
- [35] **J.M.BERTHELOT**, matériaux composites, «comportement mécanique et analyse des structures», TEC et DOC 4eme édition, 2002.
- [36] **C.BATHIAS**, matériaux composites, édition DUNOD, année 2005.
- [37] **D.G.HERMES**, matériaux composites, 5eme édition, 2005.
- [38] **Louis Berreur, Bertrand de Maillard, Staniseas**, L'industrie française des matériaux composites, page 129, décembre 2001.
- [39] **Hicham BELHANNACHI**, «Réhabilitation et renforcement des poteaux en béton armé», Mémoire de Magister, 2009.
- [40] **PERROT. Y**, «Influence des propriétés de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites», thèse de Doctorat, Université de Bretagne Sud, 2006.
- [41] **BERTHELOT. J.M**, «Matériaux composites», Editions Eyrolles, 2010.
- [42] **CARAMARO. L**, «Fibres et fils à usage technique», Éditions Techniques de l'Ingénieur, n2510, 2005.
- [43] **Jean-Claude RIGAL, André NEGRIER**, «Présentation des matériaux composites, plastiques et composites», Technique de l'ingénieur, 1991.
- [44] **LAAREJ. M**, «Etude par spectroscopie raman et modélisation d'une résine composite RTM », thèse de Doctorat, Tlemcen, 2010.
- [45] **WEISS. J, BORD. C**, «Les matériaux composites : calculs, essais et contrôles», Conception, Paris, édition de L'USINE, 1983.
- [46] **Raphaëlle SADONE**, « Comportement de poteaux en béton armé renforcés par matériaux composites, soumis à des sollicitations de type sismique, et analyse d'éléments de dimensionnement », thèse de Doctorat, 12 décembre 2011.
- [47] **Abdelmadjid SI SALEM**, « Développement d'une poutre en béton-composite : analyse expérimentale et modélisation » Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2016.
- [48] **Bruno CASTANIE, et al**, «Structure en matériaux composites stratifié», Institut Clément Ader, Technique de l'ingénieur, 2013.

Références bibliographiques

- [49] **T. CHICOINE**, « Analyse et conception d'ancrages sur les poutres renforcées en flexion à l'aide de matériaux composites », Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Université de Sherbrooke, 1997.
- [50] **BOUSSAHA, Fateh**, «Comportement en fatigue de poutre en béton armé renforcées en cisaillement à l'aide de matériaux composites avancés», mémoire université du Québec, 2008.
- [51] **M. ABDESSEMED**, « Comportement des poutres isostatiques en béton armé renforcées par tissu et lamelle de fibre de carbone », Mémoire de magister, Université deBlida, 2003.
- [52] **MAAMOURI Ghania, LAKHDARI Loubna**, «Optimisation numérique des paramètres de confinement des cylindres en béton par des bandes composites», 2018.
- [53] **Mary Kathryn THOMPSON and John M. THOMPSON**, «ANSYS Mechanical APDL for Finite Element Analysis», Description of the book, Copyright © 2017 Elsevier Inc. All rights reserved, 2017.
- [54] **BENLAKHDER kheireddine**, «Application des composites collés dans la Réparation d'une structure en béton armé approche numérique», Mémoire de Master, 2016.
- [55] **FREY François**, « Analyse des structures et milieux continus (Mécanique des solides) », volume3 Presses polytechniques, édition (1999).
- [56] AcademicAnsys, 2020, "Free Student Software Downloads ", Home site web official.
- [57] Ansys IncSouthpoint, "Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications", 275 Thechnology Drive, P671, 2019.
- [58] **COURANT, R. L.**: Variational Methods for the Solution of Problems of Equilibrium and Vibration. Bulletin of the American Mathematical Society, 49:1-23, 1943.
- [59] **RITZ, W.**: Uebereineneue Methodezur Losunggewisser Variations probleme der mathemati-schenPhysik. J. ReineAngew. Math., 135:1-16, 1908.
- [60] **DERBANE Said**, «Modélisation des plaques par la méthode des éléments finis», Mémoire de Master, 2012.
- [61] Sika Building Trust«Sikadur-300», NOTICE PRODUIT, Mai 2018, Version 02.01.
- [62] ENSICAEN, «TP de Simulation Numérique par Eléments Finis Code de calcul ANSYS Mechanical Etudes non linéaires». 3A EMS Option Matériaux Structuraux, 2018-2019.
- [63] Avis Technique 3/16-875 (2012), «SikaCarboDurSikaWrap», Annule et remplace l'Avis Technique 3/10-669, (arrêté du 21 mars 2012).

