

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة البليدة 1

Université de BLIDA 1



قسم الهندسة المدنية

Département de Génie Civil

Mémoire de Master

Spécialité : **Génie Civil**

Option : **Structure**

Thème

**Réhabilitation d'une ancienne structure en béton armé
Calcul statique et dynamique**

Etudié par :

MOUSSAOUI Hadjer

Encadré par :

Dr M.ABDESSEMED

Année universitaire : 2019-2020

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail,

A ceux qui ont sacrifié leur jeunesse pour me voir réussir, ma chère Maman et mon chère Papa, aucune dédicace ne pourrait exprimer l'ampleur, la gratitude l'amour, le respect, merci pour vos sacrifices, votre amour et votre confiance.

A mon époux Ismail, qui m'a guidé durant les moments les plus pénibles de ce chemin je te souhaite tout le bonheur et la prospérité du monde.

A mes chères frères, Nazim, Reda, Mohamed, trouvez ici le témoignage de notre profond attachement et immense amour, et preuve de notre gratitude pour votre solitude, je vous souhaite la réussite dans vos études et un bel avenir.

A ma petite princesse, ma chère fille Ismahane.

A ma chère grand-mère, je te souhaite une longue vie.

A toutes ma famille et belle famille

A tous mes amis et camarades

A tous ceux qui m'aiment.

Moussaoui Hadjer

Remerciements

Je remercie Le Bon Dieu tout puissions pour son aide et sa protection durant cette pandémie ‘‘Covid19’’. Merci d’avoir rendu ma vie réjouissante et significative. Je le prie encore pour m’aider à apprendre plus.

Un très grand remerciement pour, mon encadreur Dr. M. Abdessemed pour sa présence ,son accueil, malgré cette pandémie , ses conseils , son soutien durant tout mon travail .

Je tiens également à remercier le Dr. Si Ahmed Chef département de génie civil à l’université de Blida 1.

Mes remerciements s’adressent aux membres de Jury d’avoir accepter , d’évaluer , et d’enrichir ce travail .

Mes remerciements s’adressent aussi à tous mes enseignants, le personnel du département de génie civil ainsi que tous les étudiants qui m’ont aidé à réaliser ce travail.

Mes remerciements les plus sincères s’adressent à mes parents , et à toute ma famille .

Mes remerciements s’adressent également à toutes autres personnes avec lesquelles j’ai eu le plaisir de collaborer au cours de ces dernières années.

ملخص

التراث الجزائري من الهياكل الخرسانية المسلحة (مباني ، جسور ، سدود ، أخرى ثابتة) وبالفعل نلاحظ وجود آلاف المباني (بمختلف أنواع الإنشاءات) والتي تتدهور طيلة فترة تشغيلها وخدماتها والتي تتطلب صيانة (ترميم ، صيانة ، تعزيز ، إعادة تأهيل). (تتم هذه الصيانة فقط لفهم تقنيات الإصلاح. نقتراح في هذا العمل الخاص بأطروحة الماجستير ، تجميعًا ببليوغرافيًا لأساليب إعادة التأهيل ، مع الإشارة إلى الأشكال الثابتة للتراث الموجود في الجزائر. ستكون النمذجة العددية لحالة دراسة لبنية باستخدام البرامج المناسبة لحساب ثابت وديناميكي FEM متدهورة قديمة موضوع دراستنا. سيتم تطبيق للبنية المدروسة.

Résumé

Le patrimoine Algérien des structures en béton armé (bâtiments, ponts , barrages , autres) est consistant. En effet, on constate l'existence de milliers de bâtisses d'immeubles (avec des différents types de constructions), qui se dégradent tout le long de leur exploitation et leurs services, ce qui nécessite une maintenance (réparation, entretien, renforcement, réhabilitation). Cette maintenance ne se fait que dans la compréhension des techniques de réparation.

Nous proposons dans ce travail de mémoire de master, une synthèse bibliographique des méthodes de réhabilitation, tout en indiquant les chiffres statiques du patrimoine existant en Algérie. Une modélisation numérique, d'un cas d'étude, d'une structure ancienne dégradée, fera l'objet de notre étude. La MEF sera appliquée avec l'utilisation d'un logiciel approprié pour un calcul statique et dynamique de la structure étudiée.

Abstract

The Algerian heritage of reinforced concrete structures (buildings, bridges, dams, others) is consistent. Indeed, we note the existence of thousands of buildings (with different types of constructions), which deteriorate throughout their operation and their services, which require maintenance (repair, upkeep, reinforcement, rehabilitation). This maintenance is only done in the understanding of repair techniques.

We propose in this work of master thesis, a bibliographical synthesis of the methods of rehabilitation, while indicating the static figures of the existing heritage in Algeria. Numerical modeling of a study case of an old degraded structure will be the subject of our study. The FEM will be applied with the use of appropriate software for a static and dynamic calculation of the studied structure.

Table des Matières

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Tables des matières.....	iv
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux	iix
Liste des symboles et abréviations	ix
<u>Introduction général</u>	1
<u>Chapitre I</u> : Synthèse Bibliographique	2
I.1- Types des structures en béton armé.....	3
I.1 1-Structure à ossature contreventé par portique.....	3
I.1.2- Structure à ossature contreventé par pans rigide.....	3
I.1.3-Structure en acier	4
I.1.2-Cas de bâtiment.....	4
I.2-Dégradations des structures en béton armé	
I.2.1-Types de dégradations.....	6
I.2.2-Causes de dégradations.....	12
I.2.3-Expertise / Diagnostic.....	19
I.3-La réparation.....	25
I.3.1-Préambule.....	25
I.3.2--Les phases de réparation.....	25
<u>Chapitre II</u> : Méthodes de réparation	
II.1-Introduction	28
II.2-Méthodes de réparation	28
II.2.1-Méthodes classiques.....	28
II.2.2-Méthodes moderne	33
II.2.3-Méthodes intelligente.....	37
II.3-Conclusion	43
<u>Chapitre III</u> : Méthodes des éléments finis et choix du logiciel	
III.1-Méthode des élément finis	45
III.1.1-Introduction.....	45
III.1.2-Principes de la méthode des éléments finis.....	45
III.1.3-Etapes de calcul de la méthode des éléments finis	46
III.2-Logiciel SAP 2000	48
III.2.1-Introduction.....	48
III.2.2-Définition	48

Chapitre IV: Analyse Numérique et cas d'étude

IV.1 - Introduction.....	51
IV.2- Présentation de l'ouvrage.....	51
IV.2.1-Description de l'ouvrage	51
IV.2.2-Dimensions de l'ouvrage.....	51
IV.3-Analyse numérique de la structure sans renforcement.....	53
IV.2.1-Analyse dynamique.....	53
IV.2.2-Analyse statique.....	57
IV.4 -Analyse numérique de la structure avec renforcement	58
IV.4.1-Préambule	58
IV.4.2-Renforcement des poutres porteuses	59
IV.4.3-Renforcement des poteaux	60
IV.5-Exploitation des résultats après renforcement	61
IV.5.1-Analyse modale	61
IV.4.2-Analyse statique	62

Chapitre V: Résultats et discussion

V.1-Introduction.....	65
V.2-Analyse statique.....	65
V.3-Analyse dynamique.....	65
V.3.1-Analyse modale.....	65
V.3.2-Combinaison sismiques.....	66
<u>Conclusion générale.....</u>	67
<u>Références bibliographique</u>	68

Liste des Figures

Figure I.1 : Contreventement par portique	04
Figure I.2 : Remplissage par maçonnerie.....	05
Figure I.3 :Contreventement en voile.....	05
Figure I.4 : Contreventement par portique auto stable.....	05
Figure I.5 : Contreventement mixte.....	06
Figure I.6: Béton précontraint	06
Figure I.7 : Fissuration.....	09
Figure I.8 : Carbonatation de béton.....	10
Figure I.9 : Diminution de Ph par carbonatation	10
Figure I.10 : Corrosion des armatures	11
Figure I.11 : Fissure d'angle	14
Figure I.12 : Processus de corrosion /déformation du béton autour de l'acier, après formation des fissures internes	15
Figure I.13 :Avancement du front de dé passivation en fonction du temps	15
Figure I.14 : Fissuration de perte d'adhérence /a. Poutre large, barre isolée / poutre étroite , nombreuses barres.....	18
Figure I.15 : Fissure à l'extérieure du corbeau / Disposition du ferrailage pour éviter la dégradation	18
Figure I.16 : Scléomètre.....	21
Figure I.17 : L'auscultation sonore des bétons	22
Figure I.18 : Ferro scan ou phacomètre	23
Figure I.19 : Carotte prélevée.....	24
Figure I.20 : Prélèvement d'acier.....	24
Figure I.21 : Mesure du potentiel de corrosion	24
Figure II.1 : Dégagements des armatures selon la norme NFP 95.101	28
Figure II.2 :Gauche à droite ; aciers dégagés , application du mortier / finissage par taloche	29
Figure II.3 : Projection par voie sèche.....	30
Figure II.4: Projection par voie humide.....	31
Figure II.5 : Poutre renforcé par câble de précontrainte	32
Figure II.6 : Câble de précontrainte	32
Figure II.7 : Plaque d'acier collée.....	32
Figure II.8 :Poteau confiné par TFC.....	35
Figure II.9 : Poutre renforcée par TFC.....	35
Figure II.10:Tablier du pont en béton armé renforcé par M.C.....	35
Figure II.11: Composant d'un matériau composite.....	37
Figure II.12: Les couches du stratifiés.....	38
Figure II.13: Les différents formes de fibres.....	40
Figure II.14: Les fibres de verre	40
Figure II.15: Les fibres de carbone.....	41
Figure II.16 :Les fibres d'aramide	42
Figure II.17 : Diagramme contrainte /déformations des différents types de fibres	42
Figure III.1 : Interface de SAP 2000.....	48

Figure IV.1: Vue en plan	52
Figure IV.2 : Vue en élévation	52
Figure IV.3 : Plan de masse	53
Figure IV.4 : Modélisation de la structure.....	54
Figure IV.5: : Modélisation de la structure en mode 1.....	55
Figure IV.6: Spectre de réponse.....	56
Figure IV.7: Diagramme des moment fléchissant des poutres porteuses.....	57
Figure IV.8 : Diagramme de la flèche maximale des poutres porteuses à l'ELU.....	58
Figure IV.9: Définition de matériau béton/Sika Carbodur.....	59
Figure IV.10 : Poutre porteuse avec renforcement	60
Figure IV.11: Poteau confiné par Sika Wrap.....	60
Figure IV.12 : Mode 1 après renforcement.....	61
Figure IV.13 : Tableau des moments fléchissant et les efforts tranchants	62
Figure IV.14: Diagramme de flèche maximale de la poutre porteuse à l'ELU après renforcement	63
Figure V. 1 : La variation de la fréquence avant et après renforcement	66

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : L'auscultation sonore	22
Tableau II.2 : Avantages et inconvénients de projection par voie sèche	31
Tableau II.2: Avantages et inconvénients de projection par voie humide	31
Tableau II.3 :Avantages et inconvénients des tôles acier collée.....	33
Tableau II.4 :Avantage et inconvénients de renforcement par TFC.....	36
Tableau II.5:Comparaison entre les propriétés des fibres , la résine, valeurs techniques..	38
Tableau II.6 :Propriétés des résines	39
Tableau II.7 : Propriétés mécaniques typiques des composants PRFC , PRFV,PRFA ,	42
Tableau III.1 :Organigramme d'étapes caractéristiques	47
Tableau IV.1: Périodes , fréquences	55
Tableau IV.2: Facteur des propriétés massiques modales.....	56
Tableau IV.3: Tableau des moments fléchissant	57
Tableau IV.4: Périodes et fréquences après renforcement	61
Tableau IV.5: Facteur de participation massique modale	62
Tableau V.1: Diminution des sollicitations en % après renforcement.....	65
Tableau V.2: Comparaison des fréquences et périodes de vibration	66
Tableau V.3: Comparaison de l'effort tranchant et moment fléchissant avant et après renforcement.....	66

Liste des symboles et des abréviations

BTPH : bâtiments ,travaux publics ,hydrauliques

TFC : tissu de fibres de carbone

MC : matériaux composites

NC : nano composites

PRF : polymère renforcé des fibre

PRFC : polymère renforcé des fibre de carbone

PRFV : polymère renforcé des fibre de verre

PRFA : polymère renforcé des fibre d' Aramide

TP : thermoplastiques

TD : thermodurcissables

MEF : méthode des éléments finis

FEA : Finite Element Analysis

SAP2000

E_c : Module d'élasticité

ν : Coefficient de poisson

f_i : fréquences propres de vibration de la structure

i : modes propres de vibrations

[M] : matrices de masse de la structure

[K] : matrices de rigidité de la structure

i : fréquences naturelles circulaires

i : la quantité de masse se déplaçant

Introduction Générale

Le béton armé est le matériau le plus couramment utilisé pour construire des bâtiments, des ponts, des barrages et autres ouvrages en génie civil. Ces derniers sont menacés par des problèmes de vieillissement, de corrosion, de dégradations (mécaniques, chimiques ou physiques). Il est indispensable d'assurer une protection efficace et suivre un entretien régulier pour ces structures, on faisant un diagnostic à partir du moment où une pathologie est apparue, même si cela ne remet pas en cause la stabilité de la structure, il est important de diagnostiquer pour savoir d'où vient ce problème, d'une part, et d'autre part pour le supprimer à la source de réparer la structure. Après avoir détecter les causes, ainsi que les pathologies diagnostiquées, il faut toujours prévoir des travaux de réhabilitation afin de redonner à la structure ses caractéristiques physiques et mécanique initiales et il est possible de protéger la structure afin de retarder ou de limiter de nouvelles pathologies similaires.

Le but de notre travail c'est de contribuer à la compréhension des techniques récentes de réhabilitation, en l'occurrence les matériaux composites dans le domaine d'entretien de bâtiment. Car beaucoup d'experts utilisent les méthodes anciennes qui ont beaucoup d'inconvénients et problèmes pour la stabilité de la structure.

Notre travail est subdivisé en chapitres suivants ; Après une introduction générale, une revue bibliographique des cas pathologiques et des méthodes de réparation dans le domaine de bâtiments, est donnée dans les chapitre I et II. Le chapitre III, détaille le choix du logiciel et explication brève de la méthode des éléments finis appliquée. Le chapitre IV traitera la cas d'étude d'une structure ancienne réparée par matériaux composites. Les résultats trouvés et les commentaires sont illustrés dans le chapitre V. Enfin une conclusion générale et recommandations qui achèveront le contenu de ce mémoire.

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

-I.1 Types des structures en béton armé

I.1 1-Structure à ossature contreventé par portique

Les structures en portiques doivent être conçues pour résister non seulement aux forces de pesanteur, mais également aux forces horizontales ; cette résistance implique la rigidité des nœuds. Cette solution conduit en général à des sections de béton et d'armatures plus importantes et à des dispositions de ferrailage plus complexes que celles usuellement adoptées dans les structures les plus courantes de bâtiments.

A moins que l'on ne puisse prévoir, dans chaque plan de contreventement, des portiques comportant un nombre relativement important de travées, cette solution de contreventement est onéreuse, et on ne la retient guère que lorsqu'il n'est pas possible d'en choisir une autre.

Il faut cependant lui reconnaître l'avantage de ne pas créer d'obstacles à la présence d'ouvertures de grandes dimensions dans le plan des portiques. [3]

I.1.2- Structure à ossature contreventée par pans rigides

La rigidité des pans de contreventement peut être assurée :

—Soit par des triangulations en béton armé.

—Soit par des voiles en béton armé.

—Soit éventuellement par des remplissages en maçonnerie de résistance suffisante entre éléments (poteaux et poutres) de l'ossature en béton armé.

a-Système vulnérable :

Plutôt favorable, si les parois de remplissage et le cadre sont liés en compression uniquement; Particulièrement défavorable si les parois ne sont que partiellement remplies.

b- Portiques auto stables en béton armé sans remplissage en maçonnerie rigide :

C'est une ossature constituée uniquement de portiques capables de reprendre la totalité des sollicitations dues aux charges verticales et horizontales.

Pour cette catégorie, les éléments de remplissage ne doivent pas gêner les déformations des portiques (cloisons désolidarisées ou cloisons légères dont les liaisons ne gênent pas le déplacement des portiques).

c- Ossature contreventée par voile en béton armé :

Beaucoup d'immeubles privés ou de bureaux dans le monde sont construits en utilisant les voiles comme éléments principaux de résistance. Les voiles ou murs de contreventement peuvent être généralement définis comme des éléments verticaux à deux dimensions dont la raideur hors plans est négligeable. Dans leurs plans, ils présentent généralement une grande résistance et une grande rigidité vis-à-vis des forces horizontales.

Par contre dans la direction perpendiculaire à leur plan ils offrent très peu de résistance

vis-à-vis des forces horizontales et ils doivent être contreventés par d'autres murs ou par des portiques tout en étant conscient de la grande variété des constructions à murs porteurs, nous ne pouvons fournir qu'une classification assez générale.

A cet égard trois grandes catégories peuvent être rencontrées :

- 1- structure uniquement à murs porteurs.
- 2- structure à noyau central.
- 3- structure « mixte » avec des murs porteurs associés à des portiques.

I.1.3-Structure en acier

a-Structure à Ossature contreventée par portiques auto stables ductiles

L'ossature complète (cadres inclus) reprend la totalité des charges verticales. Les portiques auto stables ductiles reprennent à eux seuls la totalité des charges horizontales.

b- Structure à Ossature contreventée par portiques auto stables ordinaires :

L'ossature complète reprend la totalité des charges verticales.

c-Structure à Ossature contreventée par palées triangulées concentriques :

L'ossature complète reprend la totalité des charges verticales et les palées reprennent la totalité des charges horizontales.

d-Structure à ossature avec contreventements mixtes :

Les palées de contreventement doivent reprendre au plus 20% des sollicitations dues aux charges verticales.

Un contreventement mixte est une combinaison de 2 types de contreventement choisis parmi certains de ceux définis précédemment. Il comprend des portiques ou des cadres

Auto stables ductiles couplés avec, soit des palées triangulées en X, soit des palées triangulées en V, ou se rapprochant du V (système en double béquille). L'ossature complète reprend la totalité des charges verticales. Les contreventements mixtes (cadres + palées) reprennent la totalité des charges horizontales globales. Les cadres et les palées doivent être calculés pour résister à l'effort horizontal qui sera partagé au prorata de leur raideurs et en tenant compte de leur interaction mutuelle à tous les niveaux.

Les cadres auto stables ductiles doivent pouvoir reprendre à eux seuls, au moins 25% des charges horizontales globales.

I.1.2-Cas de bâtiments

I.1.2.1- Bâtiments contreventé par portiques



Figure I.1 : contreventement par portique

I.1.2.2- Bâtiments avec remplissage en maçonnerie



Figure I.2 : Remplissage en maçonnerie

I.1.2.3-Bâtiment contreventé en voile



Figure I.3 : Contreventement en voile

I.1.2.4-Bâtiment contreventé par portique auto stable



Figure I.4 : Contreventement par portique auto stable

I.1.2.5-Bâtiment avec contreventement mixte



Figure I.5 : Contreventement mixte

I.1.2.6-Béton précontraint



Figure I.6 : Béton précontraint

I.2-Dégradations des structures en béton armé

Le béton armé est le matériau le plus utilisé dans le domaine de BTPH. Il peut se dégrader et perdre ses propriétés mécanique et physique sous les influences de causes extérieures différentes qui peuvent être liées à des sollicitations d'exploitation ou d'environnement ou bien

à leur qualité essentielle de béton. Trouvons quelques pathologies apparentes ou cachées peuvent survenir dans le but d'établir des méthodes de diagnostic relatives et les solutions de maintenance de l'élément de structure destiné.

I.2.1-Types de dégradations

I.2.1.1--Dégradations mécaniques :

Ces désordres se manifestent par des déformations inacceptables de la structure comme le tassement , effondrement , flambement , gauchissement , aussi l'apparition des fissures ; lorsque des contraintes brusques comme un impact ou une explosion , provoquent une dislocation plus au moins importante du béton , le lien entre les dégâts et leurs causes est généralement évident , avant de procéder à des réparations , on s'assurera toute fois que d'autres mécanisme de dégradations actifs ne doivent pas être traités au cours des travaux .
[4]

I.2.1.2--Dégradations chimiques :

-Efflorescence : c'est la réaction chimique avec les sels solubles cristallisés

-Oxydation superficielle

-Corrosion : oxydation préalable / Immersion / Aération différentielles / paire galvanique.

- Organisme : présence et attaque d'animaux / présence de plante

-Réaction sulfuriques : les sulfates proviennent essentiellement du milieu extérieur. Ces ions ne sont pas passif vis-à-vis la matrice cimentaire et conduisent à la formation de certains composés chimiques expansifs tel que : l'étrangeté, le gypse et la traumatise. Ces composés provoquent le gonflement du béton créant en son sein des tensions qui engendrent des fissurations.

-Alcali-réactions ou cancer du béton : réaction qui se produisent entre la solution interstitielle du béton riche en alcalin, et certains granulats lorsque ils sont placées dans un environnement humide. Des gels gonflants apparaissent en développant des micros faïençage et un éclatement du béton.

I.2.1.3-Dégradations physiques :

Humidité : Capillaire/De filtrage/De condensation/Accidentelle/De travaux

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

Saleté : Par dépôt / Par nettoyage différentiel.

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

Chocs : le béton éclate sous l'effet de chocs produits par des engins de transport ou de levage, des outils.

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

Le feu : les très fortes élévations de température lors d'un incendie par exemple, entraînent un éclatement du béton.

Cycle gel – dégel : Après un nombre important de cycles gel/dégel, certains bétons peuvent se déliter en surface et se désagréger. C'est le cas des ouvrages de montagne, des chambres froides.

Erosion : météorologique.

Dans ce qui suit nous allons voir des différents types de pathologies que nous avons classées en deux grandes catégories à savoir les pathologies à risque élevé et à risque moyen.

Dans notre cas d'étude, on va s'intéresser qu'aux des pathologies à risque élevé.

a- Les fissures :

Le béton seul, comme nous avons pu l'évoquer dans la fiche sur la résistance du béton, est un matériau très cassant lorsqu'il est soumis à un effort de traction. Cette fragilité du béton s'exprime par l'apparition quasi obligatoire de fissure dans la vie de la structure.

On peut définir la fissure comme une fente visible affectant la surface d'une maçonnerie, d'un dallage, d'un appareil sanitaire, etc.

Par convention, la fissure à entre 0.2 et 2 mm de largeur, au-dessous il s'agit d'un faïençage ou d'un simple fil, au-dessus, la fissure est une lézarde.

-Les fissures sont graves et présentent un danger lorsqu'elles sont pénétrantes laissant passer l'eau de pluie à travers un mur exposé « l'imperméabilité des parois ». Plus graves encore sont des fissures traduisant un affaissement des fondations, ou des mouvements du sol.

Aujourd'hui, il est impossible d'éviter la fissuration du béton armé, que ce soit lors de mise en œuvre, due par exemple au retrait de dessiccation, ou sur le béton durci, du au vieillissement du matériau. Les causes de la fissuration sont multiples, mais peuvent être répertoriées en quatre catégories :

- Les causes dues aux propriétés des matériaux, avec par exemple le retrait suite à l'évaporation de l'eau de gâchage, ou le gonflement du liant ou encore à la résistance mécanique de la cohésion du liant.

- Les causes directes externes, avec notamment les déformations excessives sous l'action des charges ou encore des déformations sous l'action des variations de température ou sous l'action de l'humidité.

- Les causes externes indirectes, à savoir les répercussions sur certaines structures d'actions provenant d'autres éléments tels que les tassements différentiels des fondations.

- Les causes dues à un phénomène de corrosion des armatures, les armatures corrodées ayant un volume plus important que les aciers en bon état, l'état de contrainte du béton au droit d'une armature corrodée est plus important et la fissuration s'enclenche.

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

Le faïençage, c'est un réseau caractéristique de microfissures qui affecte principalement 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 largeur est d'au moins 0.2 mm.

Il est important lors du processus de réhabilitation d'un ouvrage, de s'intéresser à l'évolution de la largeur d'une fissure. Il est possible de classer les fissures en trois catégories selon leur évolution :

Les fissures passives ou mortes, pour les fissures dont les ouvertures ne varient plus dans le temps, quelles que soient les conditions de température, d'hygrométrie ou de sollicitation de l'ouvrage. Cependant, elles sont rares, car les matériaux aux alentours de la fissure varient selon la température, c'est le phénomène de dilatation thermique.

Les fissures stabilisées, lorsque leur ouverture varie dans le temps en fonction de la température.

Les fissures actives ou évolutives, lorsque leur ouverture continue à évoluer indépendamment des cycles de température.



Figure I.7 : fissuration

b-La carbonatation : La carbonatation est la réaction de combinaison avec le dioxyde de carbone, ce sont des bases qui sont carbonatés, éventuellement à l'aire, celui-ci contenant un peu de ce gaz, qui pénètre dans le béton à partir de la surface du matériau.

La carbonatation dégrade les bétons armés, est notamment responsables de la mise à nu de leurs armatures en acier, elle est associée à un phénomène de retrait dit « retrait de carbonatation », entraîne des problèmes de durabilité puis de résistance sur la structure en béton armé. Les barres d'acier, censées garantir cette résistance, gonflent sous l'effet de la corrosion et font éclater le béton d'enrobage, qui subit en plus un retrait du à la carbonatation, les acier sont alors mis à nu et continuent à se corroder.

Mécanisme de la carbonatation :

Le dioxyde de carbone peut alors réagir avec les produits résultant de l'hydratation du ciment ; le ciment hydraté est toujours un milieu poreux, dont les pores sont remplis d'eau, lorsque le matériau cimentaire sèche à l'aire libre, il se désature en eau et les pores se remplissent partiellement d'aire.

Le CO₂ naturellement présent dans l'atmosphère est alors susceptible de diffuser à travers la phase gazeuse du ciment, et forment des ions carbonatés qui réagissent principalement avec les ions de calcium Ca⁺² et l'hydroxyde de calcium ou pentlandite Ca(OH)₂ créent du carbonate de calcium (CaCO₃) avec cette réaction chimique :



Le nouvel équilibre chimique correspond alors à une solution bien plus acide qu'initialement, le PH passe d'une valeur de 13 dans la zone carbonatée, à une valeur inférieure à 9 dans la zone dégradée. Lorsque la zone de carbonatation atteint les armatures en acier, la corrosion du métal peut commencer en produisant des espèces plus volumineuses que des matériaux initialement présents. Ceci explique l'éclatement du béton autour des armatures corrodées.

Toutefois, la carbonatation augmente aussi l'imperméabilité du béton grâce au colmatage de certains pores pour les carbonatées : l'absorption capillaire est réduite et la résistance mécanique est meilleure.

La vitesse de carbonatation est maximale pour une humidité relative de l'ordre 60% , et presque nulle en atmosphère sèche ou saturé en eau

Après environs 30 ans , la profondeur de carbonatation dans un béton d'ouvrage peut varier de 1 à 30 mm suivant la compacité du béton , la fissuration et le milieu environnant .

La corrosion induite par carbonatation est donc fonction de :

- ✓ L'exposition des parements au CO₂ et à l'eau
 - Liée au choix de la classe d'exposition.
- ✓ la qualité du béton en place (compacité) et notamment en parement avec l'absence de ségrégation, de bullage ou de fissuration (retrait gêné, dessiccation).
 - l'enrobage du premier lit d'armature.

- ✓ Lié à la valeur spécifiée et à son respect lors de l'exécution

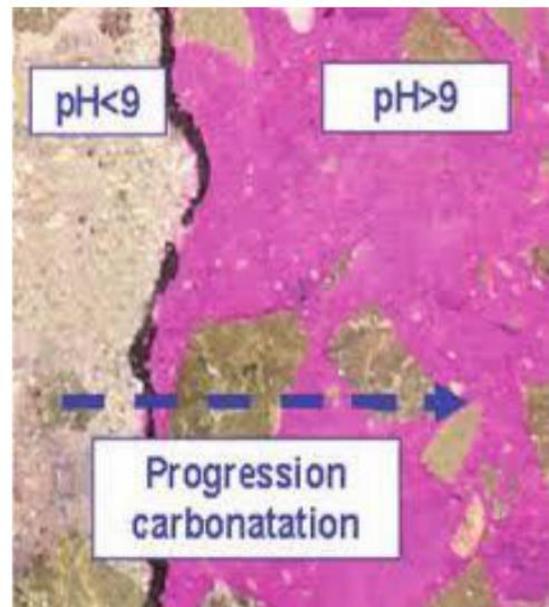


Figure I.8 : carbonatation de béton.

Figure I.9 : Démunissions de ph par carbonatation.

c-La corrosion :

Le béton d'enrobage a pour principale fonction de protéger physiquement et chimiquement l'acier vis – à-vis de la corrosion : il constitue d'une part une barrière à franchir par les espèces agressives (le dioxyde de carbone et les ions de chlorure notamment) avant de pouvoir atteindre le premier lit d'armatures , et d'autre part un milieu environnant basique , assuré par un PH de l'ordre 13 favorisant la passivation de l'acier .

La corrosion est définie comme étant une interaction physico-chimique, entre un métal et son milieu environnant entraînant des modifications dans les propriétés du métal et souvent une dégradation fonctionnelle du métal lui-même, de son environnement ou de son système technique constitué par les deux facteurs préciment que cette interaction est généralement de nature électrochimique.

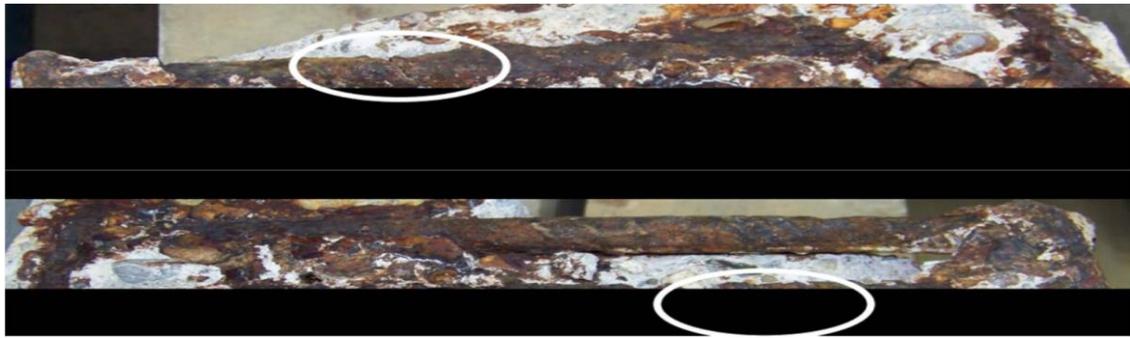


Figure I.10 : Corrosion des armatures

d-Les lézardes :

Les lézardes dans les briques et dans les joints de mortier sont causées par le tassement du sol sous une construction. Le sol peut être un “terrain rempli” où les vides ont été obturés sans qu’on laisse le remblayage se fouler convenablement. La glaise sous la fondation a pu sécher et rétrécir ou, peut-être, s’est déplacée sous l’effet d’une inondation. Le drainage ou l’imperméabilisation font peut-être défaut, ou la fondation a été érigée au-dessus de la ligne de gel. Le sol sous les maisons construites sur une colline se déplace quelquefois vers le bas de la pente. Le pourrissement et le séchage du bois peuvent occasionner des déplacements de terrain et les racines de gros arbres déplacer ou éventrer une fondation. Peu importe la cause, les lézardes causées par affaissement et qui ne sont pas réparées à temps se détériorent rapidement.

Des lézardes continues sur les murs extérieurs indiquent des problèmes d’affaissement : elles sont plus apparentes là où une rallonge a été construite. Elles se forment également dans le haut des portes, aux seuils et aux cadres des fenêtres. Déterminez d’abord si le déplacement et la progression des lézardes sont terminés. Le déplacement dans une maison neuve peut ne jamais plus se reproduire, une fois la maison placée. Vérifiez la lézarde d’un mur extérieur pour savoir si le déplacement est terminé en suivant les deux méthodes que voici : faites un pont sur la lézarde avec un morceau de verre. Collez le verre à l’époxy de chaque côté de la lézarde. Le moindre changement dans le mur ou la fondation brisera le verre.[5]

e- Le retrait :

Contraction d’un matériau provoquée par l’élimination de l’eau de gâchage excédentaire (bétons, enduits). Les tensions internes provoquées par les retraites ont pour effet soit de réduire les dimensions extérieures des matériaux, soit de les déformer, soit de provoquer leur rupture:

Faïençage des enduits, microfissuration du béton.

Le retrait des bétons et mortiers de ciment commence par un retrait plastique (légère contraction par évaporation, dès la mise en place); puis intervient le retrait hydraulique, élimination d’eau de gâchage excédentaire, qui se poursuit de façon décroissante pendant longtemps.

De façon générale, un béton ou un mortier a d’autant plus de retrait que sa concentration en ciment est importante.

La mesure du retrait s’effectue sur des éprouvettes (4x4x16cm), d’une part sur la pâte pure, d’autre part sur le mélange constitué.

Le retrait correspond à des variations dimensionnelles mettant en jeu des phénomènes physiques avant, pendant ou après la prise des bétons. Lorsqu’elles ne sont pas maîtrisées par

le ferrailage ou la présence de joints, ces variations dimensionnelles donnent lieu à l'apparition de fissurations précoces, d'ouverture conséquente. Les fissurations liées au retrait doivent être différenciées des phénomènes de fissuration fonctionnelle des ouvrages, ces derniers étant généralement maîtrisés par les règles de calcul, et restent compatibles avec la bonne tenue des ouvrages dans le temps, notamment en raison des faibles ouvertures des fissures.[6]

I.2.2-Causes de dégradations

Lorsque nous constatons une dégradation sur un ouvrage en service, il est difficile de dire si celle-ci est apparue pendant la construction, peu après, ou longtemps après. Or, à l'analyse, il apparaît le plus souvent qu'une dégradation n'a pas une cause unique et qu'elle est favorisée

par un grand nombre de paramètres, relatifs tout autant à la nature du matériau qu'à la conception de l'ouvrage ou à la technologie de son exécution .

Les principales causes de dégradations en béton armé sont :

I.2.2.1-Déplacements des coffrages : Les coffrages sont dimensionnés pour résister au poids de béton frais, mais ils sont toujours déformables. La déformation provoquée par le béton frais peut alors entraîner, dans les parties déjà durcies mais encore jeunes, l'apparition de fissures importantes. Pour empêcher l'apparition de telles fissures il faut :

- Vérifier que le coffrage est bien conçu ;
- Revêtir la surface du bois utilisé pour le coffrage afin d'empêcher l'absorption qui induit un gonflement du bois;
- Vérifier périodiquement les montages et l'exécution

I.2.2.2-Ségrégation du béton frais : Entre la fin du bétonnage et le début de prise se produit un phénomène de sédimentation (tassement) : par gravité, les grains lourds en suspension sont attirés vers le bas. L'eau qui reflue (ressuage) entraîne à son tour une partie des grains les plus fins vers la surface de l'élément. Il en résulte, dans la zone inférieure de l'élément, une concentration plus élevée en gros grains et, dans la partie supérieure, une concentration plus forte en pâte de ciment. Les conséquences du phénomène se traduisent par la cassure du béton frais avec des fissures visibles qui suivent le tracé des armatures les plus proches. Pour colmater les fissures superficielles, il suffit de différer le réglage des surfaces et de commencer la cure du béton le plutôt possible après sa mise en place ; ce traitement retarde en effet la prise, cela réduit la différence entre la ségrégation en surface et celle en pleine masse.

I.2.2.3- Décoffrage prématuré : La vitesse et l'économie actuellement recherchées dans la construction ont pour conséquence que le coffrage est retiré avant que le béton ait acquis une résistance suffisante. Le décintrement et le décoffrage prématurés d'un béton peuvent entraîner:

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

Pour éviter ces problèmes, il faut laisser les étais et les coffrages en place jusqu'à ce que le béton soit assez résistant. Le durcissement du béton en cours de prise est influencé par un certain nombre de paramètres liés au béton et aux conditions thermiques dans lesquelles il est placé:

*Le dégagement de chaleur du béton en cours de prise est un facteur prépondérant; il est évidemment relié à la chaleur d'hydratation et au dosage du ciment constituant le béton; la connaissance du degré d'avancement des réactions ou degré de maturation du béton, peut être appréciée par la mesure du dégagement de chaleur et, après calibrage, elle devient un outil non destructif permettant d'estimer la résistance du béton au jeune âge;

*Les conditions climatiques dans lesquelles est placé le béton jouent également un rôle non négligeable; à cet effet, le coffrage constitue une enveloppe de protection plus ou moins efficace suivant sa nature: un coffrage constitué par un matériau isolant génère un traitement thermique passif du béton;

*Lorsque les conditions climatiques sont trop sévères pour permettre un décoffrage dans les délais souhaités, le béton peut être soumis à un traitement thermique actif.

I.2.2.4-Retrait lors du durcissement : Le retrait thermique peut être la cause de pré-fissuration du béton. La prise puis le durcissement du béton se font avec un dégagement de chaleur ; le matériau se contracte au cours de son refroidissement. A ce phénomène viennent s'ajouter des effets de masse, la température d'hydratation pouvant être plus élevée au sein d'une pièce massive et plus faible au voisinage des parois par échange thermique avec l'extérieur. L'expérience montre que le retrait gêné, hydraulique et / ou thermique, peut provoquer la fissuration dans tous les éléments, mais particulièrement dans les murs et les dalles en fonction de la longueur, l'épaisseur, le ferrailage, l'hygrométrie ambiante et les conditions climatiques (ensoleillement, vent, pluie...).

Le retrait hydraulique s'effectue sous l'action de l'évaporation d'une partie de l'eau de gâchage.

Dans le cas d'une dalle, cette évaporation se produit intégralement sur les deux faces : alors qu'en partie basse le coffrage de la dalle rend cette évaporation malaisée, la face supérieure, au contraire, est en contact avec l'atmosphère et la dessiccation sera d'autant plus rapide que l'air sera chaud (ensoleillement) et, surtout, en mouvement. Les deux faces de la dalle sont ainsi soumises à un retrait différentiel, et, dans certains cas (béton trop liquide, absence de produit de cure), il peut en résulter un soulèvement de la dalle au droit des angles. Ce phénomène de soulèvement des angles, empêché par les liaisons avec les poutres ou les murs périphériques, explique certaines fissures à 45° que l'on voit parfois apparaître dans les angles des dalles. Pour éviter ces fissures qui sont sans gravité, il est nécessaire de prévoir un quadrillage d'armatures supérieures obtenu par le croisement des chapeaux (Figure a), ou, à la rigueur, des armatures disposées dans le sens perpendiculaire à la fissure (Figure b)

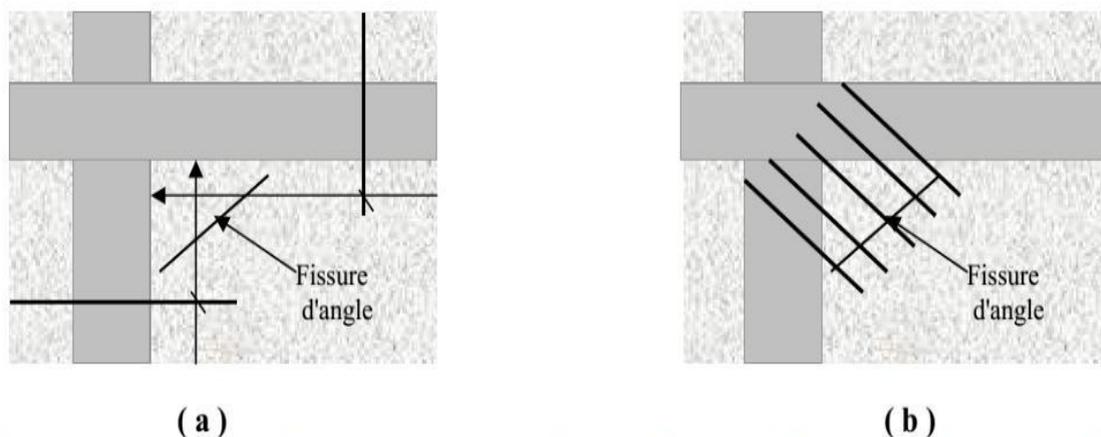


Figure I.11 : Fissure d'angle

I.2.2.5-Contraintes thermiques : La prise du ciment provoque un dégagement de chaleur. Le béton est mauvais conducteur et dans les pièces massives, cette chaleur s'accumule au cœur, ce qui élève la température et accélère la réaction. De plus, le cœur des pièces refroidit moins vite que la surface. Dans le cas des pièces constituées de parties d'épaisseur différentes, des cisaillements apparaissent dans les zones de transition.

En conséquence, il faut limiter les variations brusques d'épaisseur, les angles vifs. Dans certains cas, le choix d'un ciment à chaleur d'hydratation modérée peut, en outre, s'avérer nécessaire. Très souvent une protection thermique même légère diminue nettement les gradients de température.

I.2.2.6-Absorption d'eau par le béton : On constate souvent que parmi les différentes parties d'un même ouvrage construit avec les mêmes matériaux, certaines sont saines tandis que d'autres sont gravement détériorées. Cela est dû à la différence de quantité d'eau absorbée par le béton. Il n'est pas possible d'empêcher le gonflement du béton dû à l'augmentation de la teneur en eau. Le remède est soit de tenir compte de la dilatation du béton dans des ouvrages soumis à des cycles de séchage et d'humidification, soit de maintenir le béton humide en le gainant dans une sorte d'épais manchon de bois empêchant la dessiccation de la masse.

I.2.2.7-Corrosion des armatures :

I.2.2.7.1-Déroulement du processus de corrosion : Le mécanisme comprend deux phases :

La première, dite phase d'incubation, dépend en grande partie des processus assurant le transport des éléments agressifs jusqu'à l'armature, mais aussi des réactions chimiques se produisant au sein du béton et des réactions électrochimiques à l'interface.

La seconde phase est la période de croissance pendant laquelle la corrosion se produit avec une certaine vitesse, conduisant à la formation de la rouille et aux états ultimes de dégradation.

La pénétration des agents agressifs (Figure II.2) s'effectue sous forme gazeuse (molécules d'air ou de CO₂) ou ionique. Les processus de transport font intervenir les phénomènes de diffusion et de convection ou de capillarité. Les fissures du béton ont un rôle à part (Figure II.3). Ce sont en effet les passages préférentiels pour le milieu ambiant. Dans le cas où elles pénètrent jusqu'à l'armature, le temps d'initiation est très court. Il se produit tout d'abord une

perte d'adhérence locale, pouvant se propager suivant le profil de l'acier, pour dépassiver localement le métal (Figure II.4).

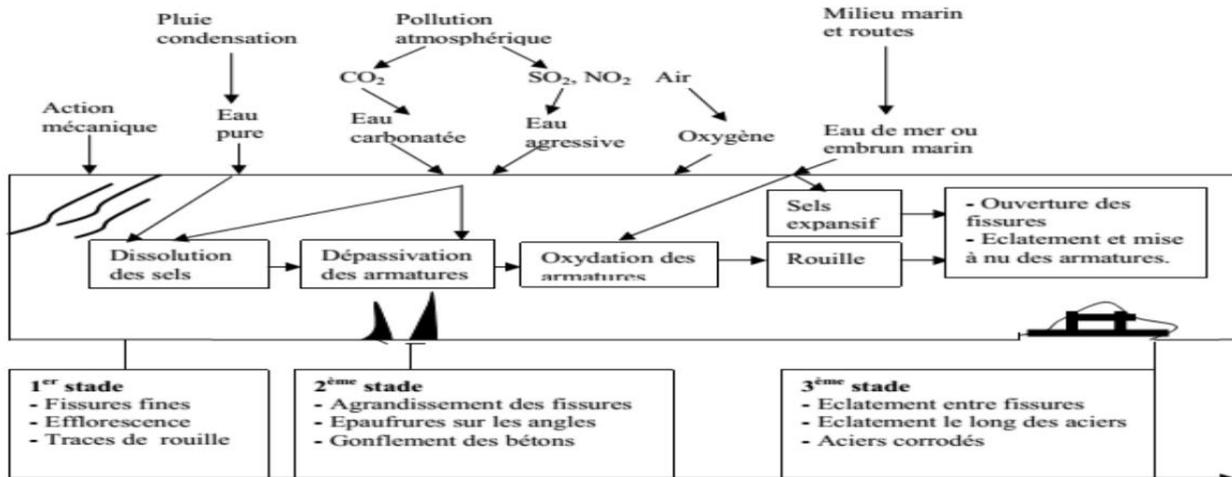


Figure II.2: Processus de corrosion.

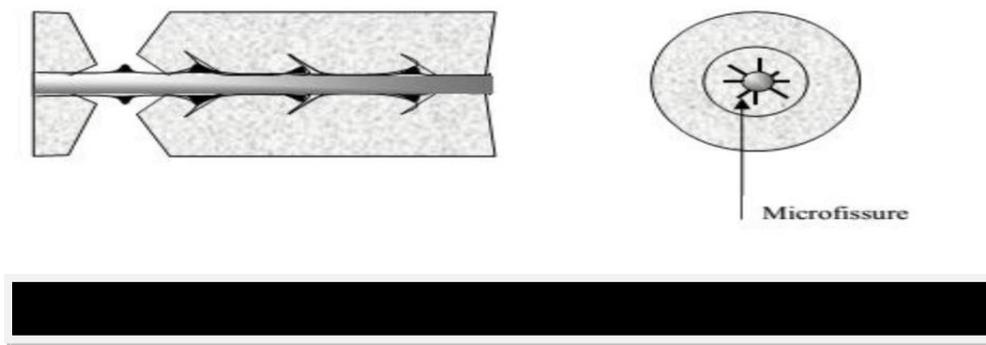


Figure I.12 :Processus de corrosion /Déformation du béton autour de l'acier , après formation de fissures internes

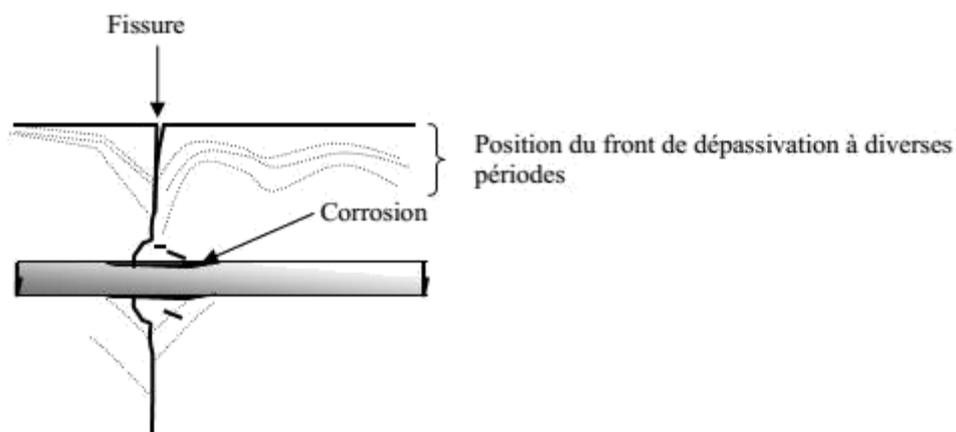


Figure II.4: Avancement du front de dépassement en fonction du temps.

Figure I.13 : Avancement du front de dépassement en fonction du temps

I.2.2.7.2 Conséquence de la corrosion: la corrosion de l'acier provoque la réduction de la section de l'armature (partiellement, localement ou en totalité). De plus, la réaction chimique de formation de la rouille (mélange d'oxydes et d'hydroxyde de fer) s'effectue avec une expansion (le volume de l'acier devient 3 à 4 fois supérieur). Ce gonflement provoque dans le béton des contraintes d'expansion importantes, supérieures à la résistance à la cohésion du béton. La manifestation visuelle qui en résulte se présente sous forme de fissures en surface qui s'amorcent à partir de l'acier.

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

I.2.2.8- Réactions chimiques : Il existe deux sortes de milieux agressifs vis à vis du béton :

*Les milieux fluides : eaux douces, eau de mer, liquides organiques, gaz...

*Les milieux solides : produits de stockage, sols, ... En fonction de la concentration de l'agent agressif, de la mobilité de son milieu, de la température ambiante et de la durée d'exposition, ces milieux peuvent attaquer le béton et provoquer des dégâts irréversibles si des précautions de protection ne sont pas prises à temps. La vitesse de dégradation du béton dépend également de plusieurs facteurs dont notamment :

*La nature des différents constituants (ciment, agrégats...) et composition minéralogique

*La composition du béton

*Le mode de sa mise en œuvre

*De l'âge du béton et des conditions climatiques Les symptômes d'attaque chimique sont la désagrégation des surfaces, l'agrandissement des fissures et des joints. Pour éviter ces désordres il faut utiliser un béton dense de bonne qualité car il empêche la pénétration des solutions chimiques, il résiste mieux et plus longtemps aux attaques chimiques qu'un béton ordinaire.

I.2.2.9-Altération atmosphérique : Si l'eau absorbée par le béton est exposée à des températures inférieures à zéro degré Celsius, elle gèle en augmentant le volume ; la pression résultante fissure le béton. Au moment du dégel la surface fissurée s'épauvre. La meilleure protection à prendre est :

*De diminuer la porosité en utilisant un béton dense et de bonne qualité (le rapport eau/ciment est inférieur à 0.5) ;

*Utilisation des adjuvants pour accroître la résistance aux agents atmosphériques ;

*L'emploi d'un revêtement de coffrage absorbant pour accroître la densité de la surface du béton pour des ouvrages partiellement enterrés ou placés en eau peu profonde.

I.2.2.10-Ondes de chocs : Le béton est susceptible de s'épaufrer quand il est soumis à des ondes de choc. Ceci est dû aux différentes vitesses de propagation des ondes dans les différents matériaux (les agrégats, le liant et les armatures). La résistance aux chocs peut être améliorée par l'emploi pour la confection du béton, d'agrégats anguleux et rugueux et par l'utilisation de sections fortement armées.

I.2.2.11-Tassement :

I.2.2.-11-1- Tassement uniforme : Lorsque les tassements sont uniformes, ils ne provoquent pas de désordres dans les constructions, si ces dernières possèdent une certaine raideur. Ce type de tassements se rencontre principalement lorsque les fondations assez rigides reposent sur une importante couche de sol compressible ou une bi-couche. Généralement, dans le cas de sol compressible dont la couche est importante toutes les mesures nécessaires sont prises au moment de la conception. Il n'en est pas de même lorsqu'il s'agit d'une bi-couche constitué d'une couche très compressible surmontée d'une autre couche relativement résistante mais

de faible épaisseur ; la force portante à la partie supérieure de la couche compressible est alors fonction de la valeur du rapport H/B (H étant l'épaisseur de la couche résistante et B étant la largeur de la semelle) qui conditionne la répartition des charges au travers de la couche résistante. Cette répartition des charges peut alors être différente de la répartition à 45° et les tassements uniformes peuvent être plus importants que prévu. Dans les deux cas, si l'amplitude du tassement doit être importante, la seule solution consiste à surélever le plancher du rez de chaussée et de prévoir des canalisations suspendues et très flexibles au moment de la construction.

I.2.2.11.2-Tassements différentiels : Lorsqu'un sol tasse d'une façon inégale sous les différents points d'une fondation, on dit qu'il y a un tassement différentiel. Il se manifeste soit par un basculement soit par de graves désordres dans les éléments non structuraux et parfois dans la structure elle-même si les efforts sont incompatibles avec la sécurité des ² matériaux. Les causes des tassements différentiels sont multiples, mais les plus fréquemment rencontrés sont :Les sols compressibles ; les remblais récents ; les remblais d'épaisseurs ; la non homogénéité du sous-sol de fondations ; l'emploi des fondations hétérogènes ; les affouillements du sol sous les fondations ; la modification du volume de certains sols en fonction de la teneur en eau...

I.2.2.12-Désordres dus à un défaut de conception : Si certains schémas de fissuration correspondent à un type de sollicitations bien défini, on peut aussi, à partir du relevé des fissures, essayer de comparer l'état d'une structure à celui prévu par le calcul, dans le but de déceler des anomalies de fonctionnement. Si le tracé des fissures est conforme au schéma prévu, une indication sur le risque de dépassement d'un chargement normal est donnée par la valeur de l'ouverture des fissures et sa variation. Des fissures correspondant à un schéma non prévu constituent, aussi, une indication de fonctionnement anormal. La plupart du temps, les fissures résultent d'une insuffisance consécutive à des oublis ou à des impasses au niveau des études, parfois aussi d'un manque de coordination entre le bureau d'études et le chantier.

I.2.2.12-1- Fissures de perte d'adhérence: Des fissures longitudinales le long d'une barre (Figure I.14), si elles sont provoquées par une mise en traction de cette barre, révèlent une rupture d'adhérence, qui peut être due, par exemple, à un recouvrement insuffisant; ces fissures constituent un danger grave de corrosion et correspondent à un fonctionnement défectueux.

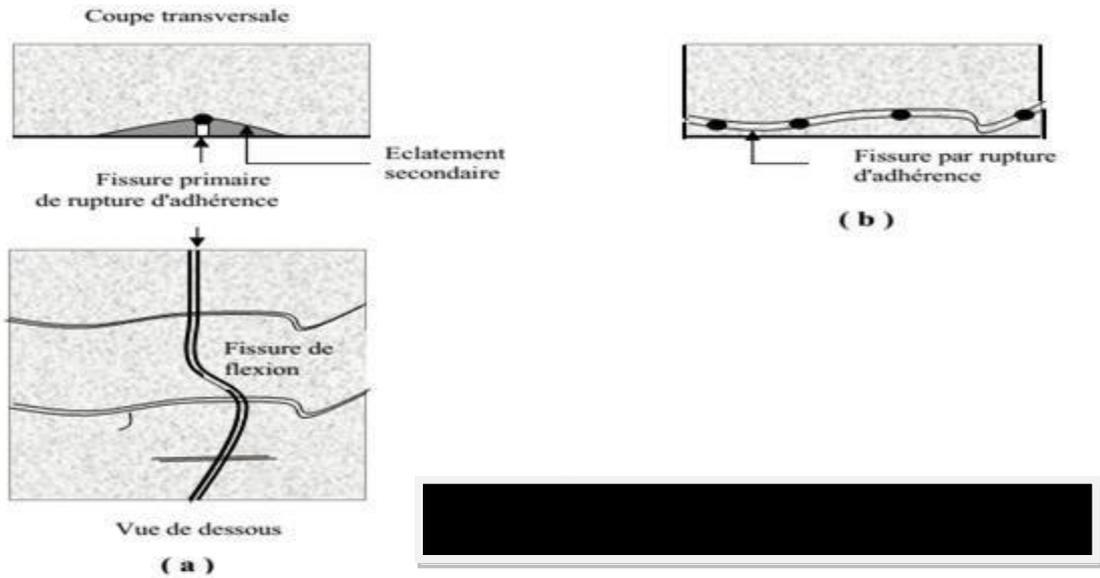


Figure I.14 : Fissures de perte d'adhérence /a. Poutre large, barre isolée/b.Poutre étroite, nombreuse barres

I.2.2.12.2-Fissures typiques des corbeaux: Dans le cas d'une charge localisée P appliquée à faibles distance du nez de la console, il existe un risque de fissuration presque à la verticale (Figure II.15). On constate que la stabilité du nez de la console dépend de la position correcte d'armatures, qui est fonction du rayon de courbure. Il est donc conseillé de compléter le ferrailage principal par des aciers en forme de boucle, de faible diamètre, et disposés à plat (Figure II.15).[7]

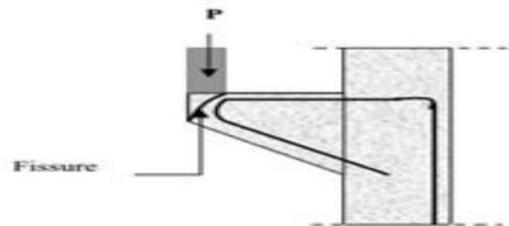


Figure II.7 : Fissure à l'extrémité du corbeau.

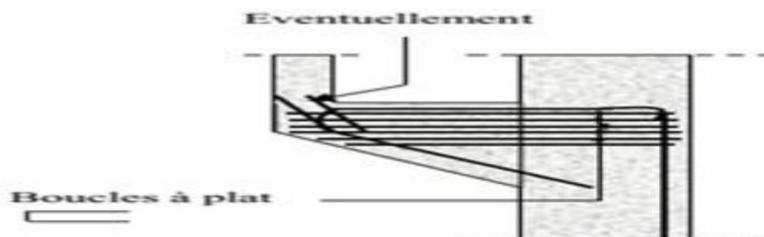


Figure I.15 : Fissure à l'extrémité du corbeau/Disposition de ferrailage pour éviter la dégradation du corbeau

I.2.3-Expertise / Diagnostic

I.2.3.1-Préambule

Le diagnostic d'un ouvrage en béton armé est une étape primordiale dans le cadre de réhabilitation.

Le diagnostic est un ensemble de techniques élaborées dont l'objectif est d'évaluer l'état de matériau dans une structure donnée, tout en évaluant la stabilité globale et partielle de cette structure, pour pouvoir analyser, déterminer les causes affectant cette conception et envisager à la fin une intervention et réparation avec succès.

Le diagnostic peut avoir principalement deux finalités ; dans un premier temps, il peut être demandé de suivre l'évolution des différentes pathologies dans le temps que ce soit à court, moyen, ou à long terme. Cela permet d'évaluer le comportement de l'ouvrage sous l'effet de ces troubles, de voir s'il y a une stagnation du phénomène, auquel cas il est important de prévoir des réparations.

L'autre finalité d'un diagnostic c'est de répertorier tous les désordres, mais aussi la construction de chaque élément, en vue de traitement immédiat.

I.2.3.2-Choix d'investigations

Le choix d'investigation dans un diagnostic d'ouvrage dépend de plusieurs paramètres. Il est primordial de les évaluer afin de mettre en œuvre mission. En effet le choix d'investigation dans un diagnostic dépend :

- Suivi sur le site.
- Suivi géométrique.
- Suivi de l'état des matériaux.

On peut les définir comme il suit :[8]

»La nature des matériaux :

Les méthodes et techniques utilisées pour réaliser un diagnostic varient d'un matériau à un autre, tout dépend de ces caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques, de plus chacun de ces matériaux a ses propres pathologies types ; par exemple le diagnostic d'un ouvrage en béton armé ne fera pas appel aux mêmes techniques d'investigations que pour un ouvrage en bois, en acier, en pierre.

»De type de la structure :

La géométrie et la taille de l'ouvrage rentrent en compte dans le choix d'investigation, et aussi le type d'ouvrage d'art ou bien un bâtiment industriel ou un bâtiment d'habitation.

»Etat de l'ouvrage :

Les investigations dépendent d'une part des désordres qui affectent l'ouvrage, le matériel et le type d'investigation à mettre en œuvre seront différents pour des armatures corrodées ou pour des fissures. Mais cela dépend aussi de la fragilité de l'ouvrage.

»De l'environnement de l'ouvrage :

L'origine des pathologies peut être dépend du site de l'ouvrage ou bien l'environnement où se trouve l'ouvrage, car certains désordres y sont parfois directement liés. C'est ainsi fréquemment le cas pour les structures soumises à des attaques chimiques.

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

I.2.3.3-Types d'investigations :

Les types d'investigations sont classés en deux catégories, soit les méthodes non destructives **CND**, soit les méthodes destructives **ED**.

Les principales méthodes rencontrées lors de diagnostics sont décrites dans la suite.

I.2.3.3.1-Investigations non destructives :

Les techniques de **CND** constituent l'une des méthodes les plus efficaces pour prévenir un risque, et de suivre le vieillissement afin d'augmenter la durée de service des structures.

I.2.3.2.1.1-Inspection visuelle :

L'inspection visuelle est le premier moyen de contrôle non destructif à la reconnaissance et au diagnostic d'ouvrage en béton armé. Elle permet de fournir immédiatement des données utiles et globales sur le degré de détérioration visible, comme l'écaillage des surfaces de béton, l'apparition de la fissuration et des défauts, la corrosion avancée des armatures, les fractures avec leurs ouvertures, la zone d'altération superficielle et profonde, des zones humides, les zones de mousses ou de végétation, les zones de faïençage, les éclats de béton en formation ou profonds, les aciers apparents et les zones de ségrégation.

Les inspections visuelles peuvent être effectuées aujourd'hui par des appareils photographiques, ainsi que la topographie est aussi un moyen d'inspection visuelle, qui permet de suivre les déplacements, les déformations d'un ouvrage, aussi un distance mètre, pied à coulisse, et un fissuromètre.

I.2.3.2.1.2-Scléromètre :

Le scléromètre de Schmidt est un instrument servant à mesurer la résistance à la compression du béton. L'indice de rebondissement à la surface du matériau est proportionnel à sa résistance à la compression.

La dureté du béton est définie selon les rapports gradués entre la hauteur du rebondissement et la dureté du béton à la compression par le moyen défini préalablement

Le principe de l'essai sclérométrique repose sur la corrélation entre la dureté d'un matériau et sa résistance à la compression.

Pour déterminer la dureté du béton, une bille d'acier est projetée sur une sonde en contact avec l'ouvrage à inspecter. Lors de son rebond, la bille entraîne un index coulissant sur une règle de mesure. Plus le rebond sera important, plus le matériau sera dur. Il convient de réaliser un certain nombre d'essais sur l'élément à ausculter, vingt-sept dans la norme actuelle, afin d'obtenir un résultat cohérent.

L'indice sclérométrique de l'élément diagnostiqué est la médiane de 27 mesures effectuées sur la zone d'ouvrage testé. Par report de l'indice sclérométrique sur un abaque, considéré. Il est important de savoir que différents paramètres peuvent influencer sur les résultats, tels que l'on obtient la résistance à la compression estimée de l'élément l'inclinaison du scléromètre ou encore l'homogénéité du béton.

Il peut être intéressant de coupler ces résultats avec des essais de résistance à la compression sur des prélèvements de la zone étudiée.[9]



Figure I.16 : Scléomètre

I.2.3.2.1.3-L'auscultation sonique

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

L'auscultation sonique permet de mesurer le temps de propagation d'un train d'ondes sonores entre deux points. Une partie de l'auscultateur, le transducteur, produit des ultrasons. Grâce aux propriétés piézoélectriques des matériaux, l'énergie électrique émise est transformée en énergie mécanique ultrasonore. L'appareil mesure le temps nécessaire à l'onde pour atteindre le récepteur qui la convertit en signal électrique.

Ce procédé permet de caractériser l'homogénéité physique du béton ainsi que son état d'altération. En effet, cette méthode de diagnostic permet entre autres de localiser des défauts, des vides ou autres malfaçons dans le béton.

Le principe est que les lames d'air emprisonnées dans le matériau transmettent très peu l'énergie des ultrasons, ainsi, la vitesse mesurée sur l'ensemble de l'élément sera plus faible que pour un béton homogène.

Il existe principalement deux types de mesures à effectuer sur site :

- » Les mesures de transparence : cette méthode consiste à déterminer le temps propagation des ondes sonores longitudinales à travers un élément. Pour procéder à ce type de mesure, il faut placer l'émetteur et le récepteur sur les deux faces opposées de l'élément à ausculter.
- » Les mesures des surfaces : cette méthode s'effectue principalement lorsqu'une seule des faces de l'élément est accessible lors des investigations.

Elle peut être utilisée pour déterminer la profondeur d'une fissure ou bien la présence des couches multiples dans le même élément.

Pour réaliser cette mesure, il faut placer l'émetteur et le récepteur sur la même face de l'élément à ausculter. L'émetteur reste sur un même point, tandis que le récepteur se déplace en effectuant à chaque fois une mesure.

Il est à noter qu'il existe une règle a été conçue par le CEBTP afin d'avoir des espacements donnés et ne pas faire des erreurs sur les distances mesurées.

Le tableau suivant donne les résultats d'essais obtenus par le CEBTP sur l'auscultation sonique des bétons : [25]

Vitesse de propagation du son	Qualité estimée du béton
$V > 4000$ m/s	Le béton est de bonne qualité et homogène
$3500 < V < 4000$ m/s	Le béton est de qualité moyenne
$3000 < V < 3500$ m/s	Le béton est de qualité médiocre
$V < 3000$	Le béton est de mauvaise qualité

Tableau I.1 : l'auscultation sonique des bétons [25]



Figure I.17 : L'auscultation sonique des bétons

I.2.3.2.1.4- Le relevé du ferrailage :

Le relevé du ferrailage peut se faire à l'aide d'un phacomètre de type Ferro scan. Cet appareil est un système de détection portable pour un examen d'armatures non destructives. Il permet de déterminer le position exact des barres d'armatures, de mesurer l'enrobage et de donner une indication du diamètre de l'armature.

L'appareil émet un flux magnétique, le phacomètre détecte la diffusion de ce champ et la variation électromagnétique qui est causée par la présence des armatures.

Le diamètre des armatures est déterminé par le fait que plus le diamètre d'une armature augmente, plus le signal reçu par l'appareil sera important. Alors que, plus l'épaisseur d'enrobage sera importante, plus le signal s'affaiblit. Pour cela, la profondeur de mesure du phacomètre est limitée (généralement de l'ordre de 10 à 15 centimètres selon le type de béton et le type d'armature).



Figure I.18 : Ferro scan ou pachomètre

I.2.3.2.2-Investigations destructives :

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

I.2.3.2.2.1- Test à la carbonatation :

Le dioxyde de carbone atmosphérique qui pénètre à travers la porosité du béton, depuis la surface du parement, réagit avec les constituants alcalins contenus dans le béton. Au fur et à mesure de sa pénétration, ce processus conduit à une réduction de la valeur du pH d'une valeur de 13 à une valeur inférieure à 9. Ceci a pour effet de diminuer voir supprimer l'effet de passivation de l'acier qui lui assurait une protection naturelle contre la corrosion.

Le degré d'avancement de la carbonatation (profondeur de carbonatation) de la matrice cimentaire est directement lié aux caractéristiques intrinsèques des matériaux (porosité, âge,...) ainsi qu'aux conditions environnementales (humidité, température,...)

Une des méthodes d'essai existante consiste à pulvériser un colorant sensible au pH (solution de phénolphthaléine) sur une coupe fraîche de béton. La partie non colorée indiquant la zone carbonatée ($\text{pH} < 9$).[10]

I.2.3.2.2.2-Carottage :

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



Figure I.19 :: Le carottage de béton

I.2.3.2.3-Prélèvement d'acier :

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

Le prélèvement d'acier permet de déterminer le type d'acier (HA, lisse, TOR, etc.) ainsi que leurs caractéristiques mécaniques telles que la limite d'élasticité. [11]



Figure I.20 : Prélèvement d'acier

I.2.3.2.4- Mesure du potentiel de corrosion :

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

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

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

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



Figure I.21 : Mesure du potentiel de corrosion

I.3-La réparation

Des travaux de remise en état ou de renforcement des structures porteuses sont quelquefois , nécessaires , soit pour remédier à la vétusté des constructions ou à leur dégradation , soit pour prévenir , ou réparer , les méfaits de travaux effectués au voisinage immédiat des immeubles , soit encore pour permettre certaines transformations : surélévation d'immeuble , création d'ascenseurs , augmentation des surcharges des planchers ..etc.

I.3.1-Préambule

Après le passage obligé du diagnostic, la réparation proprement dite peut être abordée et le processus comporte plusieurs phases qui ont chacune une finalité bien précise.

Il convient tout d'abord de distinguer les réparations qui visent des éléments de structure dont la dégradation nuit à la résistance et pourrait mettre en cause la stabilité, des réparations qui visent des éléments de façade, dont la dégradation n'est susceptible de compromettre la stabilité que très rarement mais la conservation d'aspect est souvent primordiale.

Dans le premier type, auquel se rattache nombre de réparations concernant des ouvrages de génie civil, il s'agit non seulement de rétablir la protection des éléments de la structure, mais aussi de rétablir, voire renforcer, la résistance de cette dernière.

I.3.2--Les phases de réparation

I.3.2.1-Première phase : Elimination du béton dégradé

Il s'agit d'éliminer les éclats de béton en cours de formation.

L'opération consiste à repérer à l'oreille, en frappant la surface du béton, les zones qui «sonnent creux » et donc qui sont affectées d'une fissure interne engendrée par la poussée des armatures oxydées .

Le principal écueil à éviter est la création d'une micro fissuration parasite dont le nettoyage de surface ultérieur n'assure pas avec certitude l'élimination des micros - éclats.

Il est conseillé de dégager sur toute leur périphérie les parties défectueuses pour faciliter la tenue du mortier de réparation, de ménager une contre - dépouille à la périphérie des trous obtenus par élimination des éclats de béton, ce qui permet d 'éviter aussi les bords «en sifflet » qui favorisent le «grillage » de périphérie du mortier de réparation [12].

I.3.2.2-Deuxième phase : Nettoyage des surfaces

Cette deuxième phase est nécessaire pour faire disparaître toute poussière ou souillure afin d'assurer une bonne adhérence au support du produit de couverture ou du primaire d'accrochage. Plusieurs méthodes de nettoyage sont utilisées, mais il faut d'abord s'assurer de la compatibilité entre la méthode de nettoyage prévue et la composition du produit de

couverture. On distingue les méthodes à sec (brossage, aspiration, soufflage à l'air sec déshuilé) et les méthodes humides.

I.3.2.3-Troisième phase: Traitement ou remplacement des armatures existantes:

Les armatures existantes devant être intégrées au béton neuf doivent être débarrassées de toute trace de corrosion, huiles, saleté, et de tous corps étrangers. A cet effet, on procède par grattage par frottement à la brosse métallique manuelle ou mécanique ou par projection (sablage ou grenailage).

Si l'on doit ajouter de nouvelles barres d'armature, il faut se rappeler que les barres d'origine, si elles ne sont pas rompues, continuent à supporter des efforts. En outre, si au cours de la réparation les charges sur l'ouvrage n'ont pas été diminuées, les nouvelles armatures ajoutées à l'ouvrage seront soumises à des contraintes plus faibles que les armatures existantes. Pour que les nouvelles armatures prennent en compte une partie de la charge, il faut que les contraintes dans le béton augmentent. La répartition des contraintes qui en résulte doit être étudiée.

I.3.2.4-Quatrième phase : Reconstitution de la couverture des surfaces réparées

Il s'agit de combler les vides laissés autour des surfaces voisines par la purge du béton dégradé, au moyen d'un remplissage adhérent présentant, vis-à-vis des futurs agents de détérioration, une résistance meilleure que celle du béton qu'il remplace. Le tout afin d'éviter une réapparition rapide des mêmes désordres aux mêmes endroits.

Le plus souvent cette fonction est assurée non pas par un béton, mais par un mortier. Soit un mortier ordinaire de ciment, soit un mortier à base de liants hydrauliques.

I.3.2.5-Cinquième phase : Mise en place d'un revêtement de protection superficiel

Dans le cas d'une intervention localisée, des raisons d'esthétique imposent pratiquement la mise en place d'un revêtement d'aspect pour uniformiser l'apparence de l'ouvrage. Il est donc souhaitable de profiter de la nécessité de ce revêtement pour lui conférer des propriétés autres que celle du simple aspect et notamment une protection du support vis-à-vis des échanges gazeux (carbonations) et hydriques et de souplesse vis-à-vis d'éventuelles amorces de fissuration .

Chapitre II : Méthodes de réparation

Chapitre II: Méthodes de réparation

II.1- Introduction

La durabilité d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, des matériaux utilisés, de sa réalisation ainsi que des diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance. Le béton résiste au temps qu'il fait et au temps qui passe. Mais les ouvrages en béton peuvent nécessiter des opérations de réparation ou de renforcement pour augmenter leur durée d'utilisation ou offrir de nouvelles fonctionnalités.

De nombreuses solutions techniques sont disponibles et maîtrisées, elles ont fait la preuve de leur efficacité et répondent à l'ensemble des problèmes potentiels rencontrés sur les matériaux ou sur les structures. Il convient de choisir la solution technique adaptée à la pathologie à traiter, après un diagnostic complet et précis des désordres, de leurs causes et de leurs évolutions.

II .2-Méthode de réparation

Suite à un propre diagnostic, les procédés de réparation d'un ouvrage ne viennent pas seulement ramener les sections d'origine de l'acier et du béton, mais aussi rétablir les caractéristiques mécaniques des différents éléments concernés. C'est-à-dire remettre la possibilité à la structure de reprendre au mieux les efforts qui lui sont appliqués.

On distingue dans ce chapitre plusieurs méthodes de réparations ;

II .2.1-Méthode classique :

II .2.1.1-réparation des surfaces :

II .2.1.1.1- Dégagement des armatures :

La préparation des surfaces à réparer est très importante pour la longueur de vie des réparations. Il convient dans un premier temps de dégager toutes les zones de faible cohésion. S'il y a corrosion des armatures, il est important de dégager les aciers corrodés pour arriver à une zone saine apparaisse ; plusieurs techniques sont valables pour vérifier qu'on atteint des zones sous corrosion (burinage, repiquage, bouchardage, jet d'eau, sablage).

Pour être sûr d'une bonne réparation, il est d'usage d'obtenir un dégagement comme le montre le schéma suivant selon AFNOR :[13]

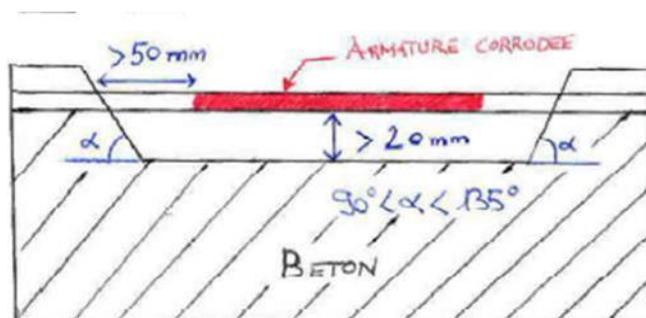


Figure II.1 : Dégagement des armatures selon la norme NF P 95.101

Il faut ensuite nettoyer la surface du béton afin d'enlever toute trace de poussière et souillure. Si la perte de section de l'acier est très élevée, il est alors nécessaire de remplacer l'armature ; par scellement ou soudure.

Il est important qu'après cette opération, de respecter la section d'armatures (au moins égale à la section initiale), les longueurs d'ancrage et de recouvrement, et les armatures de couture.

Pour limiter les risques d'apparition de la corrosion, une protection immédiate des armatures, par un produit convenablement choisi, est nécessaire surtout si l'enrobage final ne pourra pas être de la même valeur prévue dans les règlements.

Il est possible, après cette étape, de commencer la réparation.

II .2.1.1.2-Le ragréage

Le ragréage est une méthode de réparation locale, qui consiste à rétablir manuellement l'enrobage des armatures à l'aide d'un mortier de réparation possédant des propriétés qu'on verra plus loin.

Afin de limiter la réapparition de corrosion dans les zones réparées on choisit de mélanger des inhibiteurs de corrosion dans la formulation de ce mortier.

Selon « Weber » (une entreprise de solutions pour la construction et la rénovation)

II .2.1.1.2.1-Mode opératoire

- Humidifier abondamment les parties à réparer. Laisser ressuyer, le béton doit être humide mais non ruisselant
- Pour une bonne adhérence, appliquer le mortier en le serrant fortement sur tout le pourtour de la zone à réparer.
- L'application se fait par passes de couches successives qui varient d'épaisseurs selon les propriétés du produits choisit entre 2 et 100 mm (indiqués par le fournisseur)
- Dès raidissement du mortier, réaliser la finition à l'aide d'une taloche polystyrène ou d'une taloche éponge



Figure II.2 : Gauche à droite; Aciers dégagés, Application du mortier, Finissage par taloche

II.2.1.1.3- Le béton projeté

Lorsque les surfaces de béton à réparer sont importantes, la méthode du béton projeté est une option souvent utilisée. Puisque ce type de réparation est relativement rapide à mettre en œuvre, mais nécessite du matériel particulier.[13]

II.2.1.1.3.1-Technique de projection

Projeté avec une force assez importante, le béton se place et se compacte au même instant, ce qui le diffère du béton conventionnellement coulé et ensuite vibré. Ce procédé permet de produire un béton plus dense, homogène et imperméable, ayant une surépaisseur moins poreuse, plus durable et peu sensible aux attaques chimiques.

La résistance en compression du béton projeté a, selon la norme NBN EN 14487-1, un minimum de 40 Mpa. Un mélange soigneusement réalisé, permet l'application de ce béton sur toutes les surfaces même les surfaces verticales et en surplomb.

Il existe principalement deux techniques de projection du béton suivant le moment d'introduction de l'eau de gâchage dans la chaîne. En projetant par voie humide, le béton gâché est pompé jusqu'à la lance, alors que par voie sèche le mélange de ciment et de granulats, sans l'eau, est propulsé par de l'air comprimé, l'eau s'ajoute en bout de lance.

Différentes méthodes vont présenter de différents résultats. Par voie sèche, le rapport E/C est évidemment plus faible, on obtiendra alors une résistance plus élevée que par voie humide. Mais on aura un dégagement de poussière plus important et un risque de détérioration d'un support fragile.

Il existe deux techniques principales de projection:

-Projection par voie sèche

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

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

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

La Figure II.3 présente l'appareillage nécessaire à l'application de béton projeté par voie sèche.

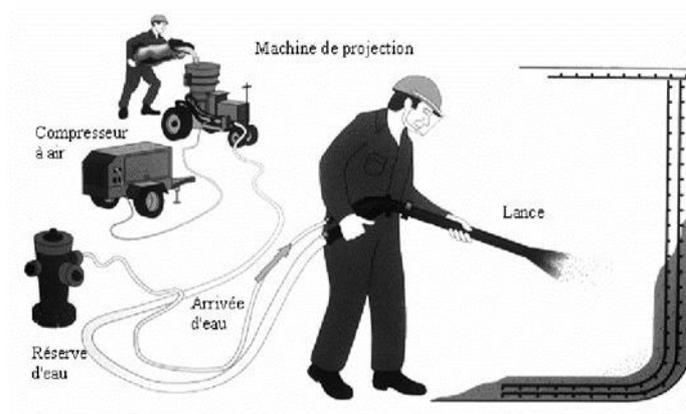


Figure 2.1 - Projection par voie sèche

Figure II.3 : Projection par voie sèche

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients de projection par voie sèche

Avantages de projection par voie sèche :	Inconvénients de la projection par voie sèche :
<ul style="list-style-type: none"> ❖ 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 énergétique ❖ Une bonne adhérence sur le support. ❖ Une pénétration en grande profondeur dans les pores. ❖ Une éventuelle projection en plafond sans accélérateur de prise 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Pertes de volume du béton projeté importantes par rebondissement. ❖ Production de poussières.

-Projection par voie humide :

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

La Figure II.4 présente l'appareillage nécessaire à l'application de béton projeté par voie humide.

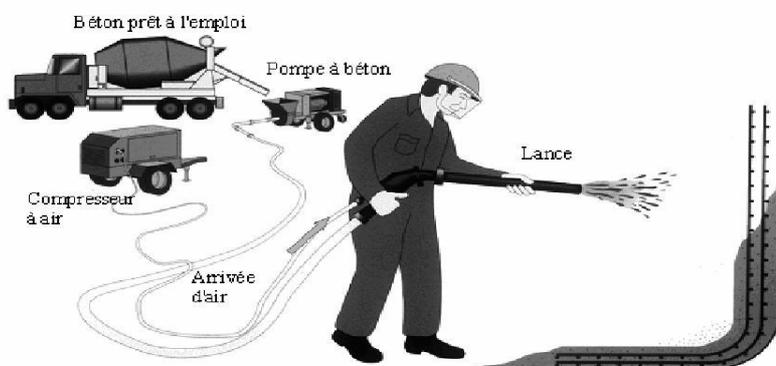


Figure 2-2 : Projection par voie humide

Figure II.4 : Projection par voie humide

Tableau II.2: Avantages et inconvénients de projection par voie humide

Avantages de projection par voie humide(mouillée)	Inconvénients de la projection par voie humide(mouillée) :
<ul style="list-style-type: none"> ❖ Composition uniforme de la couche Projetée ❖ - Pas de rebondissement violent. ❖ - Pas de production de poussières 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Dosage en eau et en ciment plus élevé pour assurer une plasticité nécessaire. ❖ Compactage faible. ❖ Nécessité d'accélérateurs de prise

II .2.1.2-Précontrainte additionnelle

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

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

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

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



Figure II.5 : Poutre renforcée par câble de précontrainte **Figure II.6 : Câble de précontrainte**

II .2.1.3-Tôles d'acier collé

L'utilisation de plaques d'acier collées afin de renforcer des insuffisances locales ou globales s'est développée ces dernières années. C'est une technique économique qui modifie peu l'aspect et les dimensions de la structure à réparer. Ces plaques sont généralement facilement inspectables pour faire le suivi des dégradations. Le collage de la plaque à la surface du béton assure un bon transfert des efforts et permet ainsi une augmentation de la résistance et de la raideur de la structure renforcée. Les plaques d'acier collées peuvent être utilisées afin d'effectuer un renforcement en flexion, en cisaillement ou pour confiner des colonnes en béton[14]

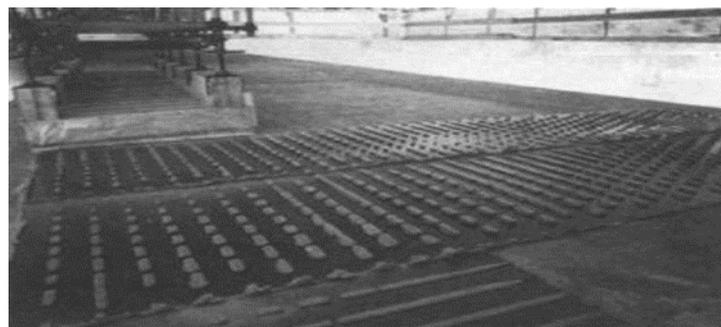


Figure II.7 : plaques d'acier collées.

Tableau II.3 : Avantages et inconvénients des tôles collée[15]

Avantages	Inconvénients
- il n'exige que des interventions mineures sur la structure	- sensibilité de l'acier à l'oxydation (il demande donc une protection et un entretien soigné) ;
- il est d'un emploi souple	- impossibilité de mobilisation de toute la résistance en traction des tôles, même sous faible épaisseur (solicitation le long d'une face) ;
- les renforts sont peu encombrants.	- nécessité d'une préparation spécifique de la surface à traiter (la raideur des tôles nécessite une surface parfaitement plane pour assurer l'uniformité de l'épaisseur de l'adhésif)
	- nécessité d'un collage sous pression (vérins), pour assurer une adhésion suffisante et éviter les bulles d'air dans la couche de résine de collage ;

Ces méthodes présentent beaucoup d'inconvénients tels que : La difficulté de la mise en œuvre, la durée, la corrosion des aciers, etc. Dès lors, les chercheurs ont tenté de trouver des matériaux de substitution qui régleraient ce problème.

Diverses conditions doivent être réunies pour obtenir les meilleurs résultats en effectuant un renforcement par plaques d'acier. Il faut vérifier que la structure elle-même peut recevoir ce type de modification et que d'autres défauts n'apparaîtront pas suite au renforcement.

Cette technique efficace a montré ses limites :

L'acier est l'objet de la corrosion, il demande une maintenance et une protection coûteuse.

La collation demande une surface de traitement spéciale et une pression constante jusqu'à la collation totale de l'acier.

Les plaques d'acier sont lourdes et trop raides.

Elle ne peut pas être collée dans des surfaces concaves

Dans les plaques c'est très difficile d'éviter les boules d'air entre les tôles et le support, ce qui implique une malle adhérence.

II .2.2-Méthode moderne :

Lors de ces dernières années, le renforcement par tôles d'acier est de plus en plus remplacé par le renforcement par matériaux composites (polymères renforcés en fibre PRF). La plupart des renforts composites utilisés dans le génie civil sont des composites carbone/époxyde, verre/époxyde ou hybride. Les performances mécaniques spécifiques, de ces matériaux, sont en effet supérieures à celles de l'acier, principalement la résistance à la traction [KRE-15].

L'utilisation des PRF offre plusieurs avantages parmi lesquels [MOL-08] :

Rapport résistance/masse relativement élevé ;

- Résistance contre la corrosion ;

- Selon le type de fibre, de bonnes propriétés contre la fatigue et le fluage ;

- Adaptabilité aux formes géométriques les plus complexes ;

- Facilité et rapidité de la mise en œuvre de la technique, pouvant même être effectuée alors que l'ouvrage est en service.

Après quelques chantiers d'essais, cette technique fut employée par la société Sika en Suisse dès 1993, puis étendue en Allemagne dès 1995 et en Angleterre en 1996. Dès lors, les études sur l'utilisation de matériaux composites pour la réhabilitation se sont multipliées pour mieux comprendre les problèmes posés par cette nouvelle technique.

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

- [3]. **EBR** (EXTERNALLY BONDED REINFORCEMENT): Le principe de cette méthode est de coller extérieurement sur la partie tendue de la structure la feuille de PRF (lamelle ou tissu)
- [4]. **NSM** (NEAR SURFACE MOUNTED) : Le principe de cette technique est d'insérer des plaques ou des barres de PRF dans l'enrobage de la partie tendue de la structure en BA. (Banijamali, 2015).
- [5]. **SNSM** (SIDE NEAR SURFACE MOUNTED) : Le principe de cette méthode est d'insérer des plaques ou des barres de PRF sur les côtés de la partie tendue de la structure en BA

II.2.2.1- Renforcement par tissu de fibres de carbone (TFC)

a- Définition du système TFC

Le procédé TFC est un procédé breveté de renforcement structurel par collage d'armatures additionnelles à base de fibres de carbone. Le procédé est basé sur le principe d'un placage de matériau résistant aux efforts de traction et judicieusement collé sur les zones tendues de la pièce à renforcer pour en augmenter les performances de fonctionnement. Le procédé TFC a essentiellement un rôle de renforcement structurel aux efforts engendrés par les effets de flexion comme d'efforts tranchants [16]. Le TFC est un composite à base de fibres de carbone matricées dans un liant synthétique appliqué à froid dans le but d'être intégré par adhérence au support pour former le complément d'armature de renforcement désiré. Le composite ainsi obtenu rivalise par ses caractéristiques mécaniques avec les meilleurs aciers sans avoir les inconvénients des effets de la corrosion.

Les avantages de fabriquer le composite directement sur le support sont de pouvoir mouler la forme exacte de la pièce à renforcer, de ne pas manier de plaques lourdes ou encombrantes, de ne pas avoir d'autre interface de collage avec le support que la matrice même du composite. Par sa simplicité de mise en œuvre, l'absence de pression à exercer durant la pose et le durcissement de la colle, fait du TFC est un système de renforcement économique [17].

b-Composite TFC

On appelle composite TFC, l'ensemble du tissu matricé dans la résine de synthèse. Le composite obtenu par fabrication in situ est constitué d'environ 40 de tissu et 60 de résine. Ces proportions peuvent varier à l'exécution dans une fourchette de plus ou moins 7 selon les conditions d'application sur le chantier (température ambiante, surface spécifique du support etc.) [16].

c-Cas d'utilisation Domaine d'application

L'application des composite TFC dans le domaine de génie civil est presque dans tout les ouvrage en béton armé et en tout les éléments structuraux , en dit poutres ,voiles , poteaux ,dalle, etc.

Les cas d'utiliser le TFC sont les suivants :

- Cas de dommages accidentels dans l'élément structural.
- Renforcement difficile d'accès.
- Corrosion avec réduction des sections d'aciers.
- Réparation d'ouvrages endommagés
- Défaut de positionnement.
- Réduction de la déformation surtout la flèche et les fissurations.
- Ferrailage insuffisant ou bien faible.



Figure II.8: poteau confiné par TFC[18].



Figure II.9: poutre renforcée par TFC[18].



Figure II.10 : Tablier de pont en BA renforcé par matériaux composites[18]

d-Avantages et inconvénients de renforcement par TFC

Les avantages et les inconvénients du renforcement par le composite TFC sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II.4 : Avantages et inconvénients de renforcement par TFC

Avantages du TFC	Inconvénients du TFC
<ul style="list-style-type: none">- Facilité de transports et de manipulation.- Facilité de coupure et de la mise en œuvre dans les surfaces non développées.- Adaptation aux supports.- Possibilité d'application à multicouche.- Facilité de contrôle.- Immunité contre la corrosion.- Une légèreté 5 fois plus que l'acier.- Une résistance 10 fois plus que les platines.- Une grande flexibilité avec une faible épaisseur [19].	<ul style="list-style-type: none">- Coût relativement 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.- Le TFC ne résiste pas au feu.- Manque de ductilité [19].

II-3- Conclusion

On conclut que le renforcement par les composites TFC a une grande avantage de flexibilité en s'adaptant aux formes des éléments renforcés les plus complexes et pour leurs propriétés mécaniques et physiques très légères par rapport aux autres matériaux comme l'acier, plus que leur facilité de mise en œuvre sur site. On point de vue de ces avantages permet de choisir les matériaux composites comme méthode de réparation et renforcement des ouvrages en béton, l'application de TFC ou lamelles en PRFC (polymère renforcé en fibres de carbone) est un choix intéressant comme une méthode de renforcement conventionnelle. Pour ce but le choix de réparation ou renforcement d'un ouvrage par matériaux composites PRFC (Polymère Renforcé en Fibre de Carbone) est considérée comme une étude intéressante.

II .2.2-Méthode intelligente

Parfois, nous avons besoin d'un matériau avec certaines propriétés telles que la mécanique physique thermique et d'autres propriétés, dans le développement de la pensée humaine et le développement de la technologie, l'homme a trouvé un moyen d'obtenir un matériau ayant les propriétés requises en mélangeant deux ou plusieurs substances et en acquérant une nouvelle substance appelée matière composée, cette dernière étant considérée comme un matériau homogène.

Les matériaux composites sont utilisés dans de nombreux domaines tels que la construction, l'aviation et d'autres.

II.2.2.2- Matériaux composites

II.2.2.2.1-Caractéristiques générales

Un matériau composite consiste dans le cas général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue a habituellement des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée " la matrice", la phase discontinue est appelée "le renfort .[18]

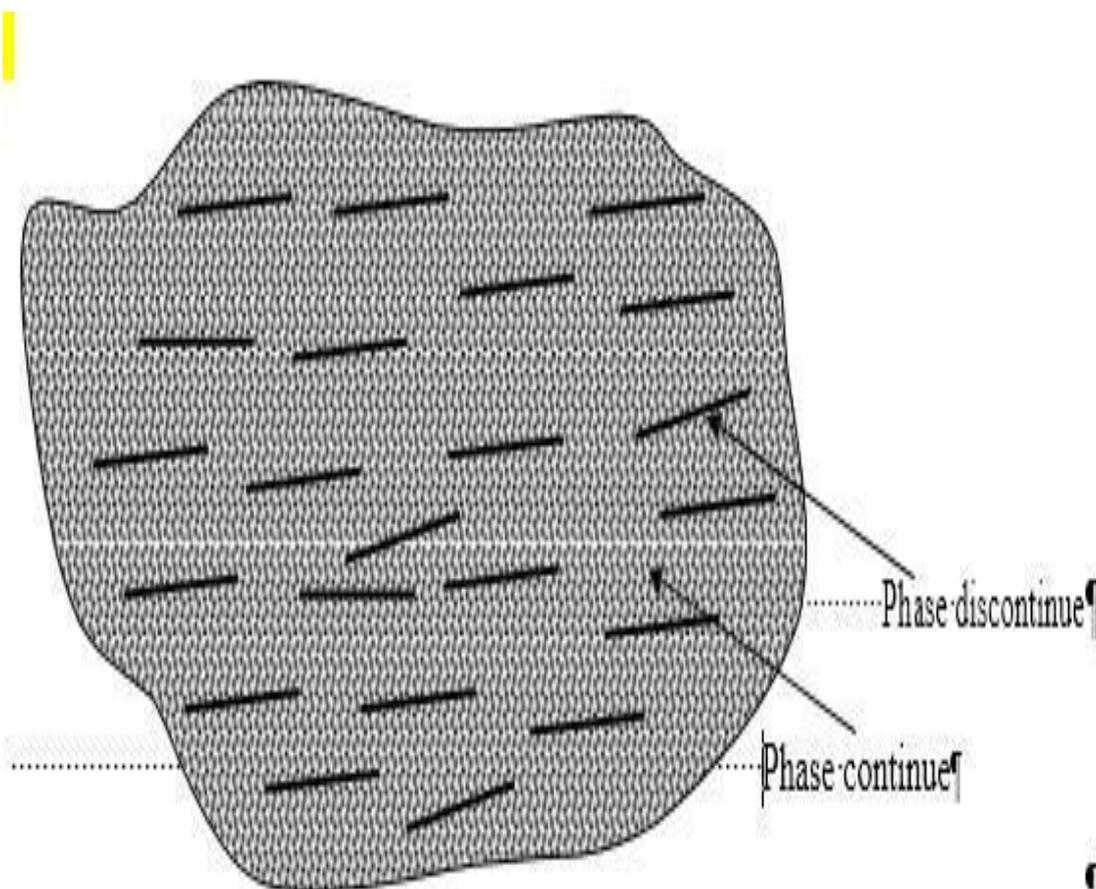


Figure II.11 :Composant d'un matériau composite[18]

Tableau II.5: Comparaison entre les propriétés des fibres, la résine et l'acier (valeurs typiques)

	Module de Young E [GPa]	Résistance à La traction σ_r [MPa]	Déformations à la rupture ϵ_r [%]	La dilatation thermique α [$10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$]	Densité ρ [g/cm ³]
Verre - E	70 – 80	2000 – 3500	3.5 – 4.5	5 – 5.4	2.5 – 2.6
Verre - S	85 – 90	3500 – 4800	4.5 – 5.5	1.6 – 2.9	2.46 – 2.49
Carbone (HM ¹)	390 – 760	2400 – 3400	0.5 – 0.8	-1.45	1.85 – 1.9
Carbone (HR ²)	240 – 280	4100 – 5100	1.6 – 1.73	-0.6 – -0.9	1.75
Aramide	62 – 180	4100 – 5100	1.6 – 5.5	-2	1.44 – 1.47
Matrice en polymère	2.7 – 3.6	40 – 82	1.4 – 5.2	30 – 54	1.10 – 1.25
Acier	206	250 – 400 ³ 350 – 600 ⁴	20 – 30	10.4	7.8

Pour résumer les propriétés des PRF, il est plus commode de regrouper les composites renforcés de fibres en deux catégories, selon leur technologie de production :

-Monocouche (lame)

-Multicouches (stratifié)

Les stratifiés sont des matériaux composés de couches empilées (lames) dont l'épaisseur est dans l'ordre de la dizaine de millimètres. Dans le cas le plus simple, les fibres sont intégrées seulement dans le plan de la lame (il n'y a pas de fibres arrangées orthogonalement à ce plan).[20]

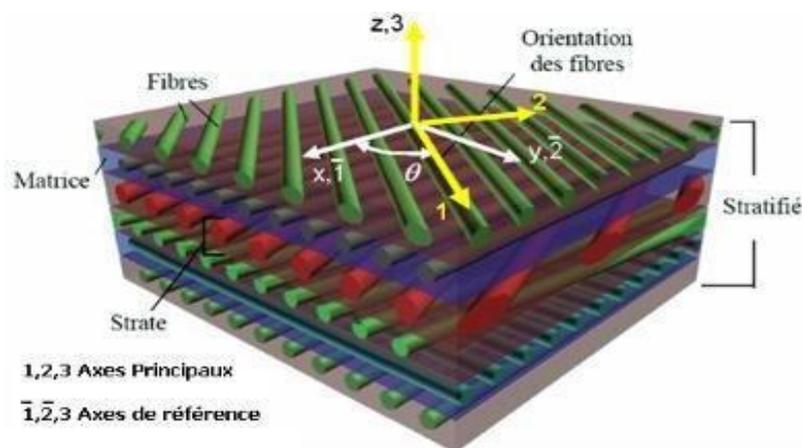


Figure II.12 : Les couches du stratifiés[18]

II.2.2.2.3- Les matrices

La matrice fournit le mécanisme nécessaire au transfert de la charge de part et d'autres des fibres. Elle protège également les fibres des risques d'abrasion et des autres attaques environnementales et chimiques. Il existe deux principaux types de matrices :

- **Résine thermodurcissable (TD) : polymère transformé en un produit** essentiellement infusible et insoluble après traitement thermique (chaleur, radiation) ou physicochimique (catalyse, durcisseur). La transformation est irréversible,

- **Résine thermoplastique (TP):** polymère pouvant être alternativement ramolli par chauffage et durci par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. Les résines thermoplastiques présentent l'aptitude à l'état ramolli, de se mouler aisément par plasticité. La transition est réversible.

Les résines thermos et (thermodurcissables) sont principalement les résines les plus utilisées dans la production des matériaux composites en PRF. Elles sont usuellement disponibles en état de polymérisation partielle avec une consistance fluide ou pâteuse à la température ambiante. Lorsqu'elles sont mélangées à un réactif approprié, elles se polymérisent pour devenir solide (matériau vitreux). La réaction peut être accélérée par ajustement de la température. Les résines thermos et ont plusieurs avantages y compris :

- c) Une faible viscosité qui permet une imprégnation relativement facile des fibres,
- d) De bonnes propriétés d'adhésion,
- e) Polymérisation à la température ambiante,
- f) Une bonne résistance aux agents chimiques,
- g) Absence de température de fusion, etc.

Leurs inconvénients, sont principalement :

- d) Un intervalle de température de fonctionnement limité par une limite supérieure donnée par la température de transition vitreuse,
- e) Pauvre ténacité vis-à-vis de la rupture ("comportement fragile"),
- f) Sensibilité à l'humidité.

Les résines thermodurcissables couramment employées dans les applications de génie civil sont les résines époxy. Les résines polyester et vinylester sont également utilisées.

Lorsque le matériau est mélangé directement au niveau du site de construction, il doit être, toujours, manipulé par un personnel spécialisé. Le tableau suivant donne un ordre de grandeurs des caractéristiques des résines usuellement employées dans la production des matériaux composite en PRF :[20]

Tableau II.6: Propriétés des résines [20]

Résine	Masse volumique [Kg/m ³]	Résistance à la traction [MPa]	Module élastique [GPa]	Déformation à la rupture [%]	Température maximale d'utilisation à long terme [°C]
Polyester	1.2	50 – 65	3.0	2 – 3	120
Vinylester	1.15	70 – 80	3.5	4 – 6	140
Epoxyde	1.1 – 1.4	50 – 90	3.0	2 – 8	120 – 200

2-3- Les fibres

Les fibres couramment utilisées dans les matériaux composites sont les fibres de verre, de carbone et d'aramide. Leur géométrie monodimensionnelle unique, en plus d'être particulièrement adaptées à la réalisation du composite, procurent aux joncs et lamelles en PRF une rigidité et une résistance plus grandes que les PRF en formes trois-dimensionnelles. Cela est dû à la faible densité, par défauts, dans les configurations monodimensionnelles par opposition aux membres trois-dimensionnelles.[20]

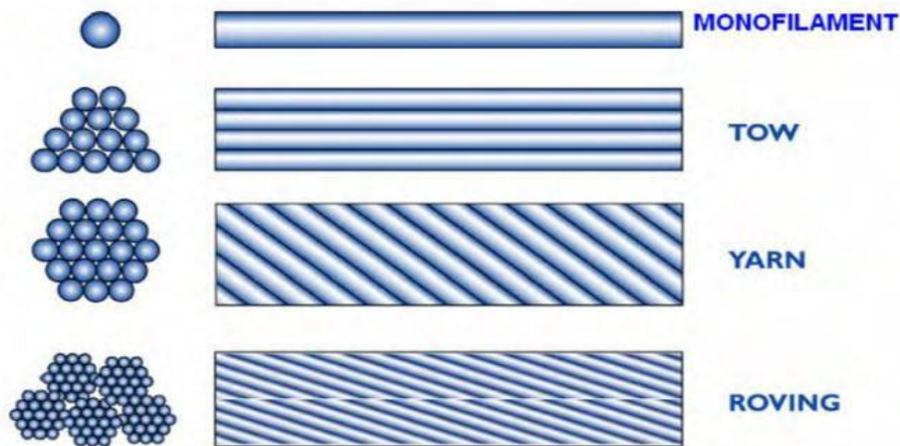


Figure II.13 : Les différentes formes de fibre [20]

✓ **Les fibres de verre** : elle sont généralement réalisées à partir de silice (SiO_2), dont les sources sont abondantes ; par mélanges d'additifs on produit trois types de verre utilisables dans les composites .

Elle présente une plus faible résistance mécanique mais une plus grande déformabilité , ce qui la rend attrayante pour certaines utilisations . le plus grand inconvénient de cette fibre reste sa dégradation par des phases alcalines si elle n'est pas correctement protégée .[2]



Figure II.14 : Les fibres de verre

✓ **Les fibres de carbone** :

Les fibres de carbone peuvent être obtenues à partir du brut de pétrole ou de charbon , ou bien de manière synthétique au moyen de polyacrylonitrile . ces derniers possèdent de meilleures caractéristiques mécaniques que les précédentes .

L'intérêt des utilisations de la fibre de carbone dans le génie civil se trouve essentiellement dans :

- g) Sa faible densité .
- h) Ses propriétés mécaniques (R_t , R_c , E) excellentes .
- i) L'absence de corrosion .
- j) Sa très bonne tenue à la fatigue
- k) Sa facilité de manipulation .

Les principaux inconvénients sont :

- l) Une anisotropie très marquée .
- m) Un comportement à la rupture de type fragile des composites .
- n) Un prix de matière élevé comparé à celui de l'acier .[2]

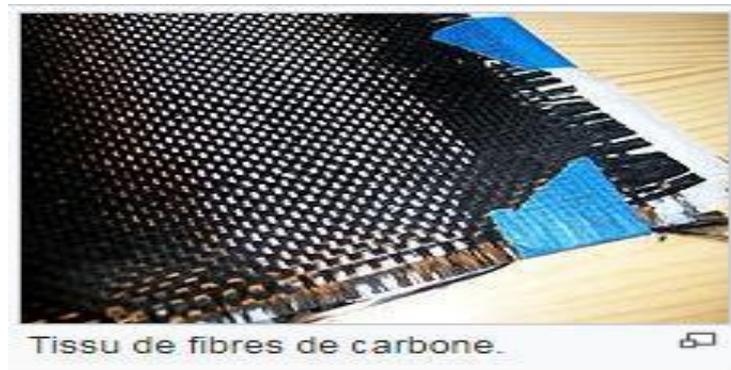


Figure II.15 : les fibres de carbone



Fibres d'aramide :

Elle ont une structure anisotropique , elle est issue de la chimie organique des polyamides aromatique (ou polyaramide) par synthèse chimique à basse température . les composites renforcés de fibres d'aramide offrent une bonne stabilité en température (jusqu'à 200°C en fonction de la matrice) , mais souffrent :

- o) D'une adhérence moyenne entre matrice et fibre .
- p) D'un prix encore trop élevé .[2]



Figure II.16 : les fibres d'aramide

✓ **Les fibres de bore :**

Un filament de tungstène (=12 β m) sert de catalyseur à la réaction de chlorure de bore et

d'hydrogène à 1200 °C . les fibres de bore obtenue ont un diamètre d'environ 100 μm (la vitesse de croissance est de 1 μ/s) . Fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures , elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène . .[2]

✓ **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 . .[2]

✓ **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 synthétique courantes de polyamide ou polyester . .[2]

✓ **Les composites à fibres de carbone :**

Les fibres de carbone ont un module d'Young en traction de l'ordre de 230 GPa , une résistance en traction de 2500 MPa , et une déformation à la rupture de 0.5 à 2 % . un composite composé de fibres de carbone HR et d'une matrice époxy ou vinylester a les caractéristiques mécaniques suivantes :

- Module d'Young longitudinal en traction : 155 :165 GPa
- Résistance longitudinale en traction : 500 : 3000 MPa
- Déformation à la rupture : 1.2 : 1.3 %

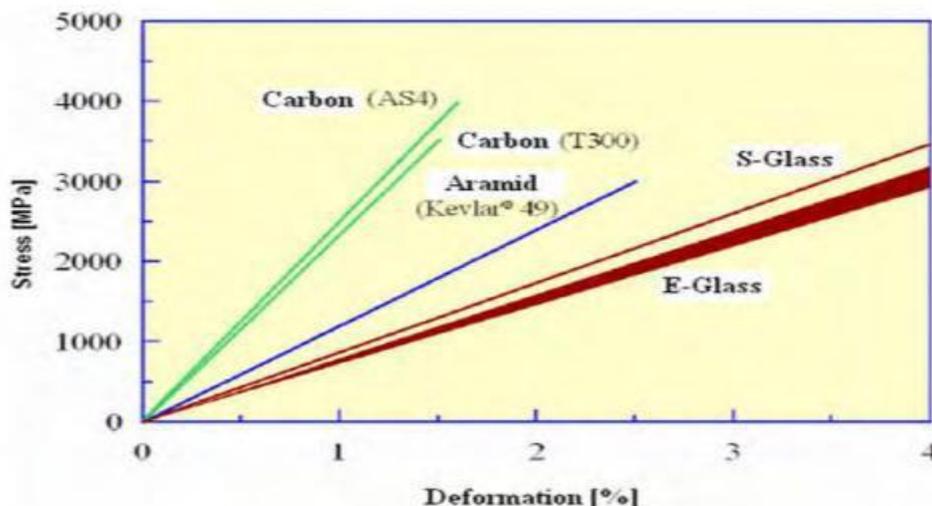


Figure II.17 : Diagrammes contraintes-déformations des différents types de fibres .[20]

Tableau II.7: Propriétés mécaniques typiques des composites “PRFC“, “PRFV“ et “PRFA“.

Matériaux composites unidirectionnels	Contenu en fibres [% par poids]	Densité [kg/m ³]	Module d'élasticité longitudinale [GPa]	Résistance à la traction [MPa]
Fibres de verre / polyester (PRFV laminaire) (FOUZI C. ; 2015)	50 – 80	1600 – 2000	20 – 55	400 – 1800
Carbone / époxy (PRFC laminé)	65 – 75	1600 – 1900	120 – 250	1200 – 2250
Aramide / époxy (PRFA laminé)	60 – 70	1050 – 1250	40 – 125	1000 – 1800

II-3- Conclusion

En génie civil, les résines thermodurcissables (thermosets) sont utilisées presque exclusivement, telles que les matrices vinylesters, polyesters et époxyes [21]. Les matériaux composites présentent des avantages tels que [18] :

- 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 PRF (Polymère Renforcé en Fibre) est inférieure de 10% au poids des platines d'acier.
- Maniabilité : les bandes des matériaux composites présentent une large flexibilité qui facilite la mise en œuvre et son application dans les zones confinées.
- Vu la difficulté d'assemblage et de transport sur site des platines d'acier, les PRF sont beaucoup plus concluants que ces derniers.
- 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 : la bonne tenue des matériaux composites à la corrosion par rapport à celle des platines d'acier, qui peuvent être contaminés par le chlorure ou leurs zones de fixation seront fissurées.
- Tenue au feu : la conductivité thermique des matériaux composites est inférieure à celle des platines d'acier. La dégradation due au feu des matériaux composites est lente comparativement à celle des platines d'acier.
- Réduction du risque gel- dégel : la mise en œuvre du bandage des matériaux composites favorise une bonne étanchéité vis-à-vis de la formation du phénomène gel- dégel
- La maintenance et entretien : le système de renforcement de matériaux composites n'exige pas un entretien, par contre le renforcement par les platines d'acier demande une maintenance périodique continue.
- Réduction du temps d'exécution et mise en œuvre : la préparation, le transport et la mise en œuvre des platines d'acier prend un temps considérable par rapport à l'application des matériaux composites.
- L'aptitude de précontrainte dans les matériaux composites : un nouveau champ des bandes plats de précontrainte des composites est appliquée afin de compenser la perte de tension dans l'élément structurel et réduire ainsi les fissures .

Chapitre III: Méthode des éléments finis Et choix du logiciel

Chapitre III: Méthode des Éléments Finis et Choix de Logiciel

III.1 – Méthode des éléments finis

III.1.1 Introduction

L'analyse aux éléments finis (MEF) est une méthode de calcul utilisée dans les domaines scientifique et technique. Avec les éléments finis, il est possible de calculer des problèmes complexes qui ne peuvent pas être résolus par d'autres méthodes. En effet, la méthode des éléments finis étant une analyse numérique consistant à résoudre des équations différentielles, il est possible de l'utiliser dans divers domaines physiques. Le composant à analyser est subdivisé en un grand nombre de petits éléments finis avec une géométrie simple, qui peuvent être calculés avec les équations initiales connues. Cette subdivision a donné le nom de la méthode numérique: méthode des éléments finis. En ingénierie, la méthode des éléments finis est aujourd'hui une méthode standard dans le calcul assisté par ordinateur des charpentes et structures planes [22].

III.1.2 Principes de la méthode des éléments finis

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

La MEF utilise des **approximations** simples des variables inconnues dans chaque élément pour transformer les équations aux dérivées partielles en équations algébriques.

Les nœuds et les éléments n'ont pas forcément de signification physique particulière, mais sont basés sur des considérations de **précision de l'approximation**. Elle permet donc de résoudre de manière discrète une EDP dont on cherche une solution approchée « suffisamment » fiable. De manière générale, cette EDP porte sur une fonction u , définie sur un domaine. Elle comporte des conditions aux bords permettant d'assurer existence et unicité d'une solution.

Sauf cas particuliers, la discrétisation passe par une redéfinition et une approximation de la géométrie, on considère donc le problème posé sur la géométrie approchée par un domaine polygonal ou polyédrique par morceaux. Une fois la géométrie approchée, il faut choisir un espace d'approximation de la solution du problème, dans la MEF, cet espace est défini à l'aide du maillage du domaine (ce qui explique aussi pourquoi il est nécessaire d'approcher la géométrie). Le maillage du domaine permet d'en définir un pavage dont les pavés sont les éléments finis. Un élément fini est la donnée d'une cellule élémentaire et de fonctions de base de l'espace d'approximation dont le support est l'élément, et définies de manière à être interpolantes.

Bien qu'il existe de nombreux logiciels exploitant cette méthode et permettant de « résoudre » des problèmes dans divers domaines, il est important que l'utilisateur ait une bonne idée de ce qu'il fait, notamment quant au choix du maillage et du type d'éléments qui doivent être adaptés au problème posé : aucun logiciel ne fait tout pour l'utilisateur, et il faut toujours garder un œil critique vis-à-vis de solutions approchées. Pour cela il existe des indicateurs d'erreur et des estimateurs d'erreur qui permettent d'ajuster les différents paramètres.

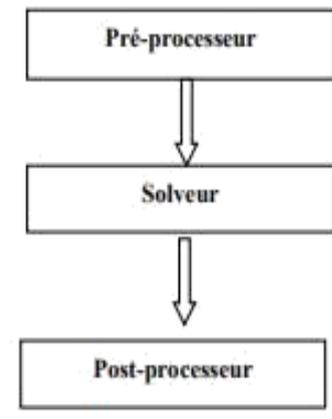
La solution trouvée, il reste cependant à déterminer les caractéristiques de la méthode ainsi développée, notamment l'unicité de l'éventuelle solution ou encore la stabilité numérique du schéma de résolution. Il est essentiel de trouver une estimation juste de l'erreur liée à la discrétisation et montrer que la méthode ainsi écrite converge, c'est-à-dire que l'erreur tend vers 0 si la finesse du maillage tend elle aussi vers 0.

Dans le cas d'une EDP linéaire avec opérateur symétrique (comme l'est l'opérateur laplacien), il s'agit finalement de résoudre une équation algébrique linéaire, inversible dans le meilleur des cas.

III.1.3 Etapes du calcul de la MEF :

III.1.3.1 Étapes logiques du calcul par éléments finis :

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



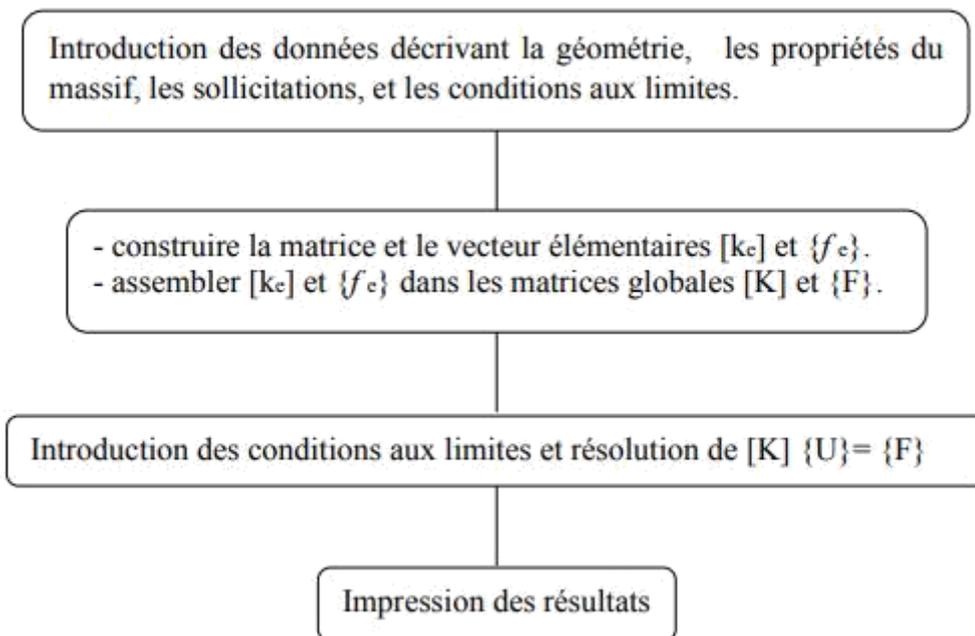
- **Préprocesseur**
 - Choisir le type d'éléments
 - Entrer les propriétés géométriques
 - Entrer les paramètres physiques
 - Créer le modèle géométrique
 - Créer le maillage : définir les nœuds et les éléments
 - Appliquer les sollicitations
 - Imposer les conditions aux limites

- **Solveur :**
 - Choisir le type d'analyse (statique, dynamique,...)
 - Construire la matrice et le vecteur élémentaire $[k_e]$, $\{f_e\}$
 - Assembler $[k_e]$ et $\{f_e\}$ dans $[K]$ et $\{F\}$
 - Prendre en compte les conditions aux limites
 - Résoudre le système d'équations $[K] \{U\} = \{F\}$
 - Calculer les variations additionnelles (gradients, réactions, $\epsilon...$).
- **Post-processeur**
 - Présenter les résultats de façon intelligible et synthétique
 - Sous forme numérique
 - Sous forme graphique
 - Effectuer des fonctions complémentaires : combinaisons, interprétations
Interpolations, animation.

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

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

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



III-2 Logiciel SAP 2000

III-2-1 Introduction

Plusieurs logiciels d'analyse des structures basés sur la méthode des éléments finis (ROBOT, ANSYS, SAP 2000, ETABS, ABAQUS...) sont mis à la disposition de l'ingénieur pour faciliter leur travail et diminuer le temps, parmi ces logiciels qui ont une grande satisfaction de la part des ingénieurs, SAP 2000. La simplicité de l'utilisation de ce logiciel a permis de le faire propager à travers le monde entre les ingénieurs. Il est devenu un état de la technique analytique depuis son introduction 46 ans. SAP2000 est devenue un programme structurel d'usage général, le plus intégré, productif et pratique sur le marché aujourd'hui.

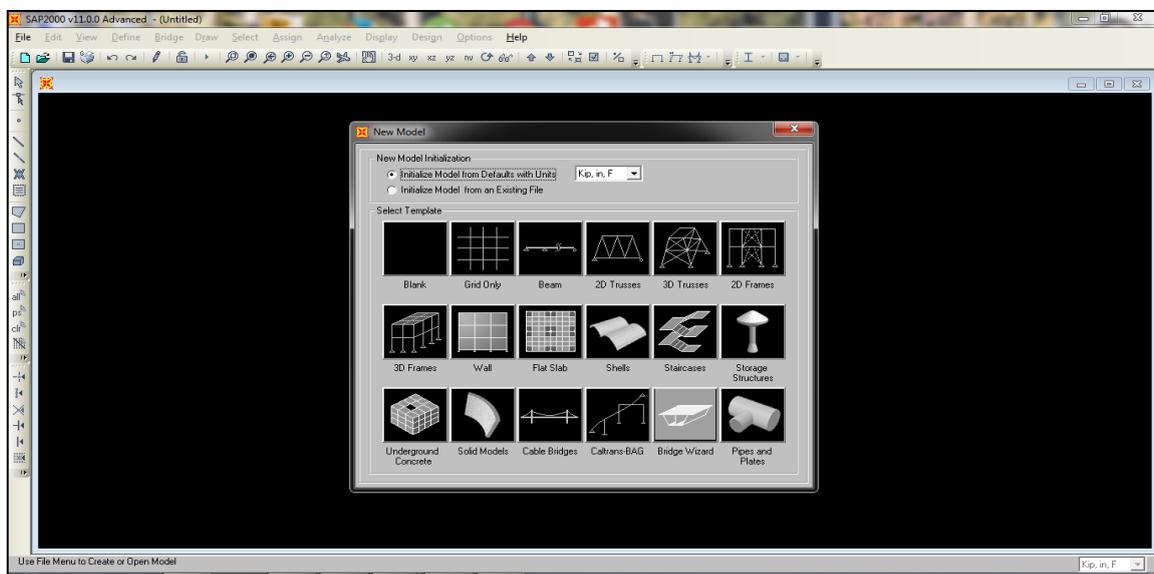


Figure III-1 : l'interface de SAP 2000

III-2-2 Définition

La modélisation avec le logiciel SAP 2000 permet de considérer que les éléments structuraux, quand ils ne sont pas structuraux, ils sont modélisés soit par une masse concentrée aux nœuds soit par des charges qui s'ajoutent au poids des éléments structuraux.

La modélisation avec le SAP 2000 consiste en les étapes suivantes :

- Définition de la géométrie du modèle
- Définition des propriétés mécaniques des matériaux utilisés
- Définition et affectation des sections aux modèles
- Encastrement des fondations
- Définition des charges statiques

- Chargement de la structure
- Définition de la masse sismique

- Affectation des diaphragmes
- Définition et chargement de spectre de réponse
- Définition des charges sismique
- Définition des combinaisons

Chapitre IV: Analyse Numérique et Cas d'étude

Chapitre IV: Analyse Numérique et cas d'étude

IV.1 - Introduction

Dans cette étude deux différents modèles ont été créés afin d'étudier le comportement d'un bâtiment en béton armé renforcé avec matériaux composites :

- a) Modélisation de la villa sans renforcement.
- b) Modélisation de la villa par matériaux composites

IV-2- Présentation de l'ouvrage :

notre cas d'étude se présente sous la forme d'une villa r+2 à usage d'habitation construite dans les années 80. Avec le temps la structure a subi des dommages qui nuisent à la sécurité de l'ouvrage. ce qui nous a amené après un diagnostic effectué sur site à adopter la solution d'un confinement du béton. Dans ce travail on va essayer d'étudier différentes techniques de renforcement innovantes et faire une comparaison entre eux.

IV-2-1 Description de l'ouvrage

L'ouvrage que nous allons étudier est :

- D'importance moyenne (groupe 2). [23]
- Composé d'un seul bloc (RDC+2 étages) de forme en plan régulière.
- A usage habitation.
- Réalisé sur un site meuble (type S3). [23]
- Implanté dans la commune de Blida , zone classée comme zone sismique III selon le règlement parasismique Algérien. [23]

IV-2-2 Dimensions de l'ouvrage

A. Dimensions en plan

- Le sens transversal (X-X) : 21.90m
- Le sens longitudinal (Y-Y) : 11.95m

B. Dimension en élévation

- La hauteur totale du bâtiment : 12.65m
- La hauteur de RDC : 3.40m
- La hauteur de l'étage courant : 3.40m

IV-2-3 Ossature

- Le contreventement de notre structure est assuré par des portiques en béton armé.

IV-2-4 Poteaux et Poutres

L'ensemble des poteaux sont de section Carrée de 30*30 cm²

L'ensemble des poutres sont :

- Poutre principale de section rectangulaire de 30*40 cm²
- Poutre secondaire de section de 30*30 cm²

IV-2-5-Planchers

Tous les planchers sont des planchers en corps creux avec une dalle de compression (16+4).

Les balcons sont réalisés par une dalle pleine de 15 cm d'épaisseur.

IV-2-6- Plans de la structure

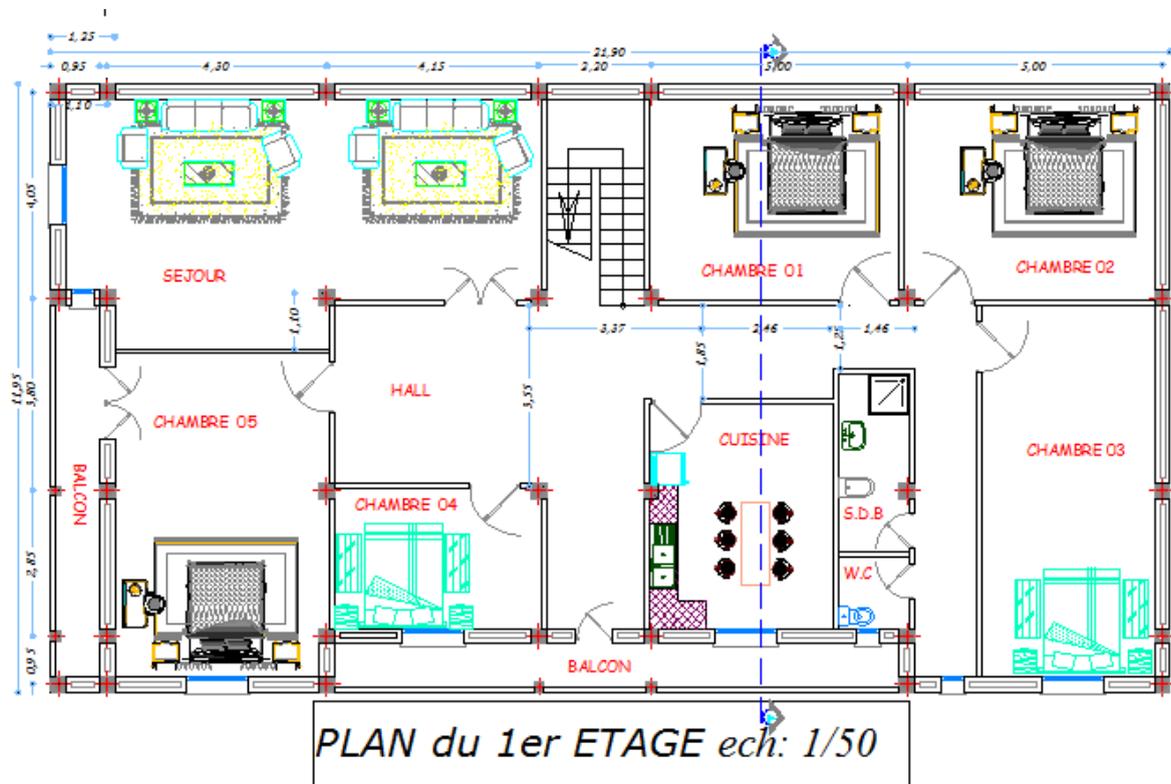


Figure IV.1 : Vue en plan

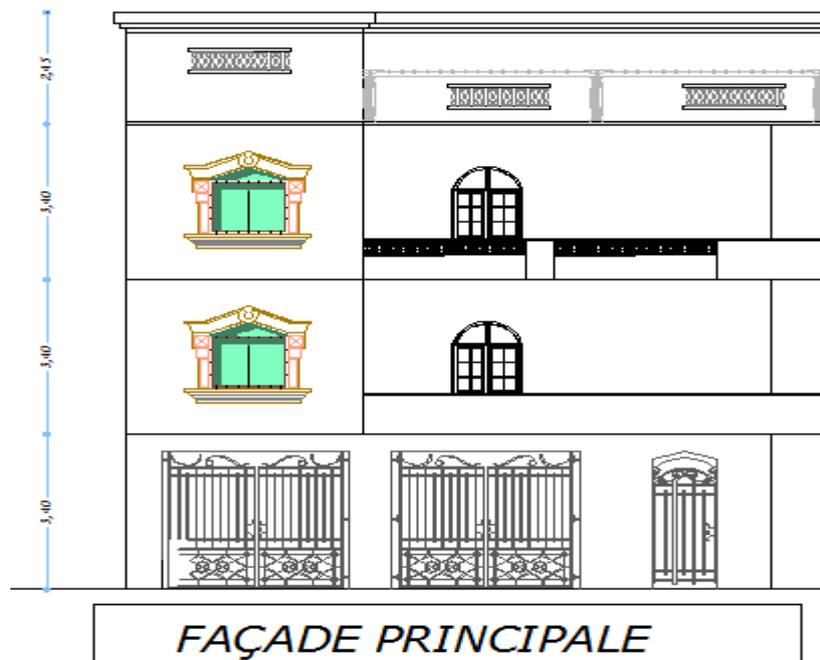


Figure IV.2 : Vue en élévation

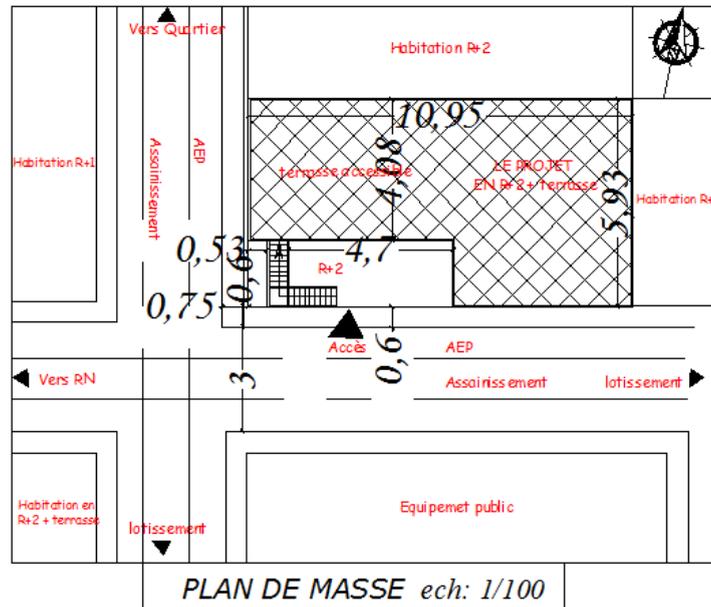


Figure IV.3 : Plan de masse

IV-2-7-Matériaux utilisés

a- Béton

- Module de Young $E=3.2 \cdot 10^7 \text{ KN/m}^2$
- Coefficient de poisson $\mu= 0.17$
- Poids volumique 25 KN/m^3

b- Acier

- Module de Young $E=2 \cdot 10^8 \text{ KN/m}^2$
- Coefficient de poisson $\mu= 0.3$
- Poids volumique 78 KN/m^3

IV-3-Analyse numérique de la structure sans renforcement

IV-3-1 Analyse dynamique

L'analyse dynamique a été conduite par le logiciel SAP2000 (version 11). Le développement de l'analyse dynamique et la modélisation de la structure selon le logiciel SAP2000 est comme suit :

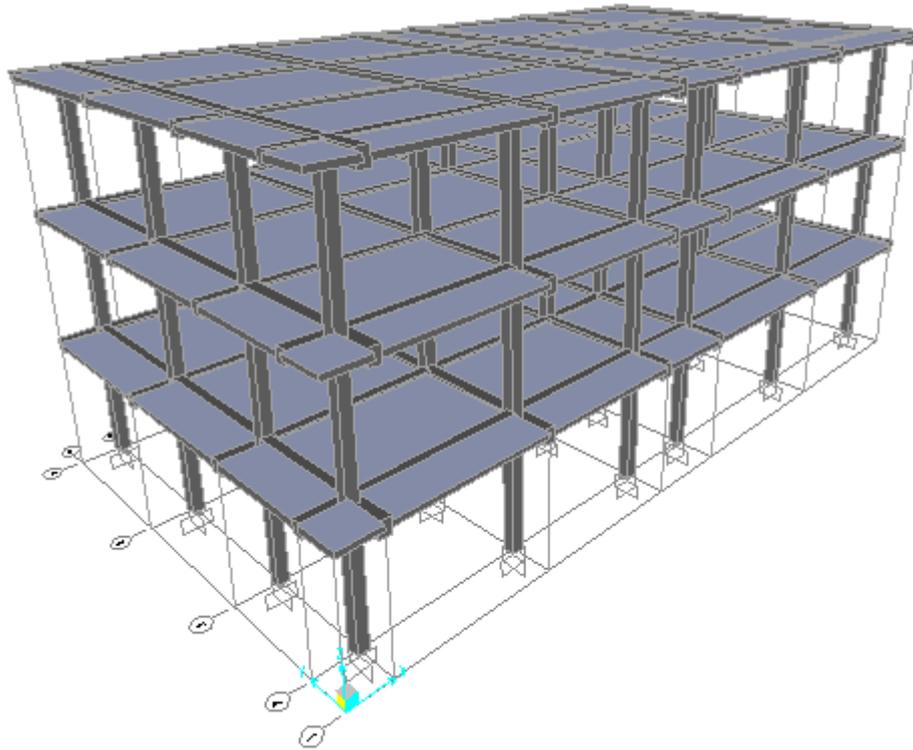


Figure IV.4 : modélisation de la structure en 3D

IV-3-1-1 Analyse modale

L'analyse modale permet d'améliorer la connaissance physique et le comportement d'une structure en service . En particulier , elle permet d'appréhender les problèmes d'amplification dynamique de la réponse d'une structure sous une excitation forcée . Ces amplifications dynamiques peuvent être synonymes d'inconfort ou la source de détérioration de l'ouvrage . Leur connaissance peut permettre de modifier la conception du bâtiment afin de limiter ou de définir une structure qui n'est pas de mode propre dans une bande de fréquence donnée . la détermination des modes propres permet de connaître précisément la fréquence naturelle de l'ouvrage . a chaque fréquence naturelle correspond un champ de contraintes dynamiques dans la structure . Cependant le calcul des modes propres ne permet pas de déterminer précisément les amplitudes de ces modes . Ces derniers sont extraits à un coefficient multiplicateur près et sont donc indéterminés . la seule manière de connaître précisément la réponse d'une structure lors d'une excitation temporelle à la fréquence naturelle de l'ouvrage est d'effectuer un calcul dynamique complet . Cette partie est consacrée à la détermination des six premières fréquences propres et modes de vibration , dites fondamentales .[2]

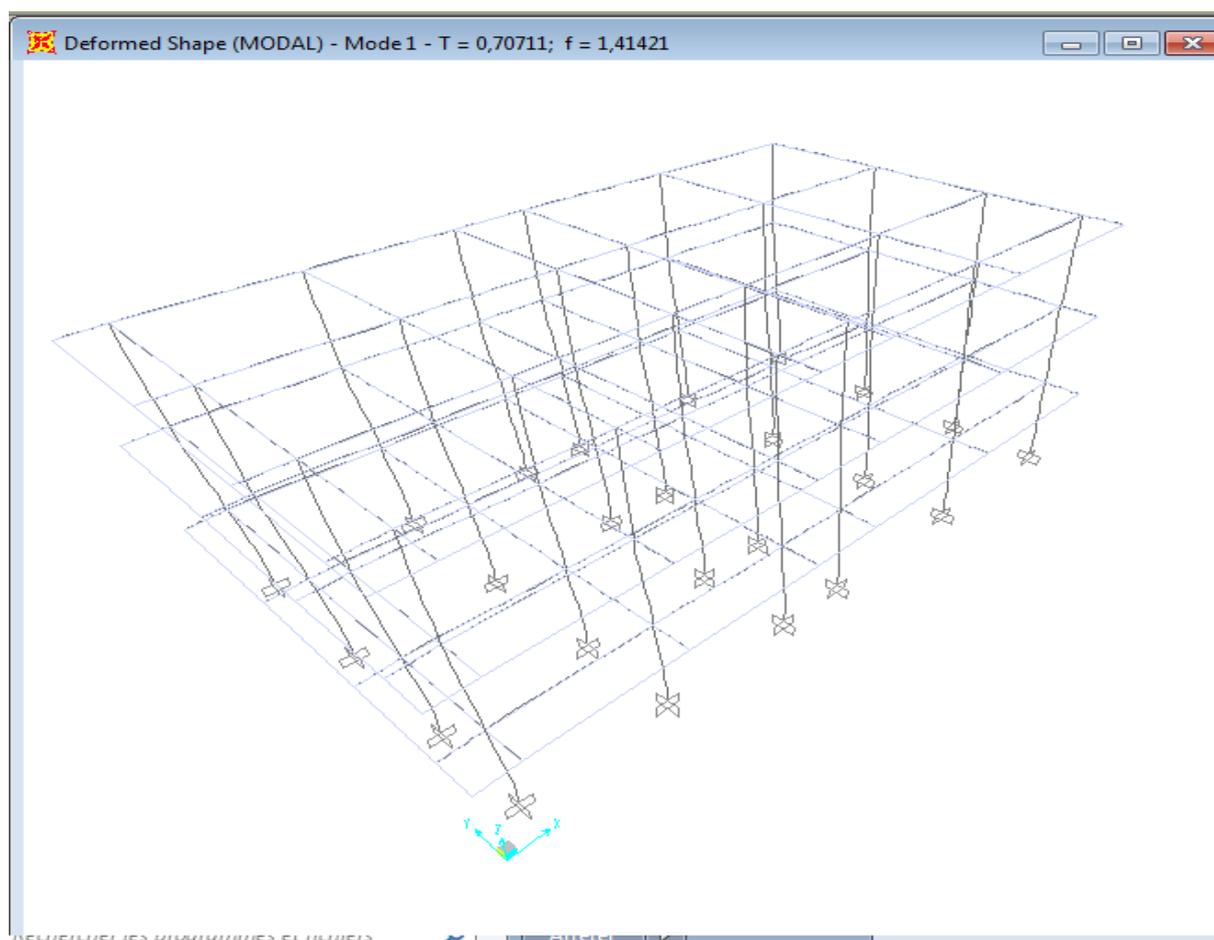


Figure IV.5 : Modélisation de la structure mode 1

Les résultats de l'analyse modale sont présentés dans le tableau suivant :
Tableau des Périodes, Fréquence et pulsation. Trouvés par le SAP 2000 .

Tableau IV.1 : période, fréquence

Mode	Période Sec	Fréquence Hz
Mode 1	0.70711	1.41421
Mode 2	0.620452	1.611728
Mode 3	0.591178	1.691537
Mode 4	0.225493	4.434727
Mode 5	0.207083	4.828981
Mode 6	0.196842	5.080216

Tableau IV.2: Facteurs de participations massiques modales.

Mode	Période	UX	UY	SUM U X	SUM U Y
1	0.70711	0.86906	0.000001227	0.86906	0.000001227
2	0.620452	0.000008543	0.88224	0.86907	0.88224
3	0.591178	0.00079	0.00373	0.86985	0.88597
4	0.225493	0.10484	0.00000001848	0.97469	0.98085
5	0.207083	0.00000003276	0.09488	0.97469	0.98088
6	0.196842	0.000004528	0.0000326	0.97469	0.98088

IV-3-1-2-Analyse spectral

a. Détermination du spectre de calcul

Pour la détermination du spectre de réponse selon RPA 99 on opte pour le programme "PARAMÈTRE RPA99" qui permet de trouver les réponses maximales en termes d'accélération. Le spectre de réponse est défini pour les valeurs des paramètres suivants :

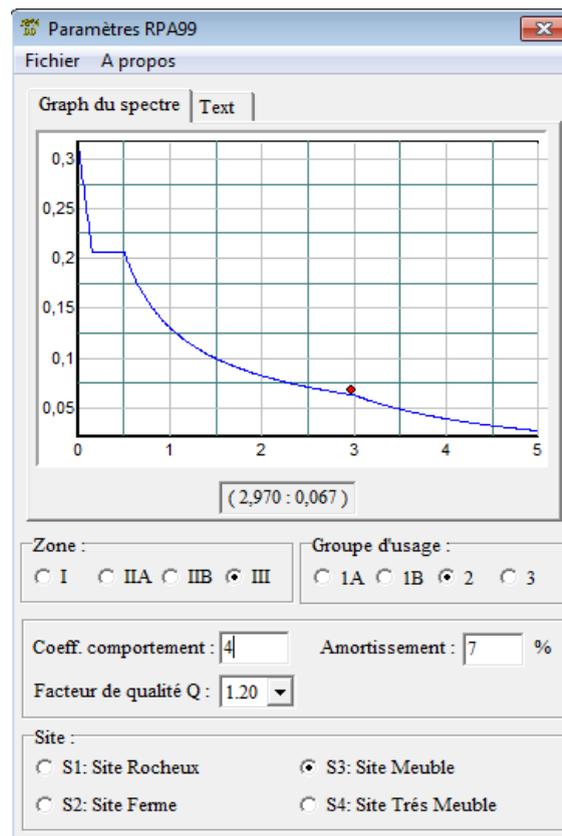


Figure IV.6 : Spectre de réponse

IV-3-2-Analyse statique

Cette partie une modélisation numérique statique, dont le but est la détermination des éléments de réduction (le moment M , l'effort tranchant T) de la charge la plus défavorable , ainsi que la flèche et la contrainte de flexion sous l'effet des chargements (ELU , ELS) .

$$\text{ELU} = 1.35G+1.5Q$$

$$\text{ELS} = G+Q$$

IV-3-2-1-Moments fléchissant

Tableau. IV.3 : Tableau des moments fléchissant

Combinaison	MX (KN.M)	MY (KN.M)
ELU	57669.6147	-105075.063
ELS	42045.2398	-76592.9047

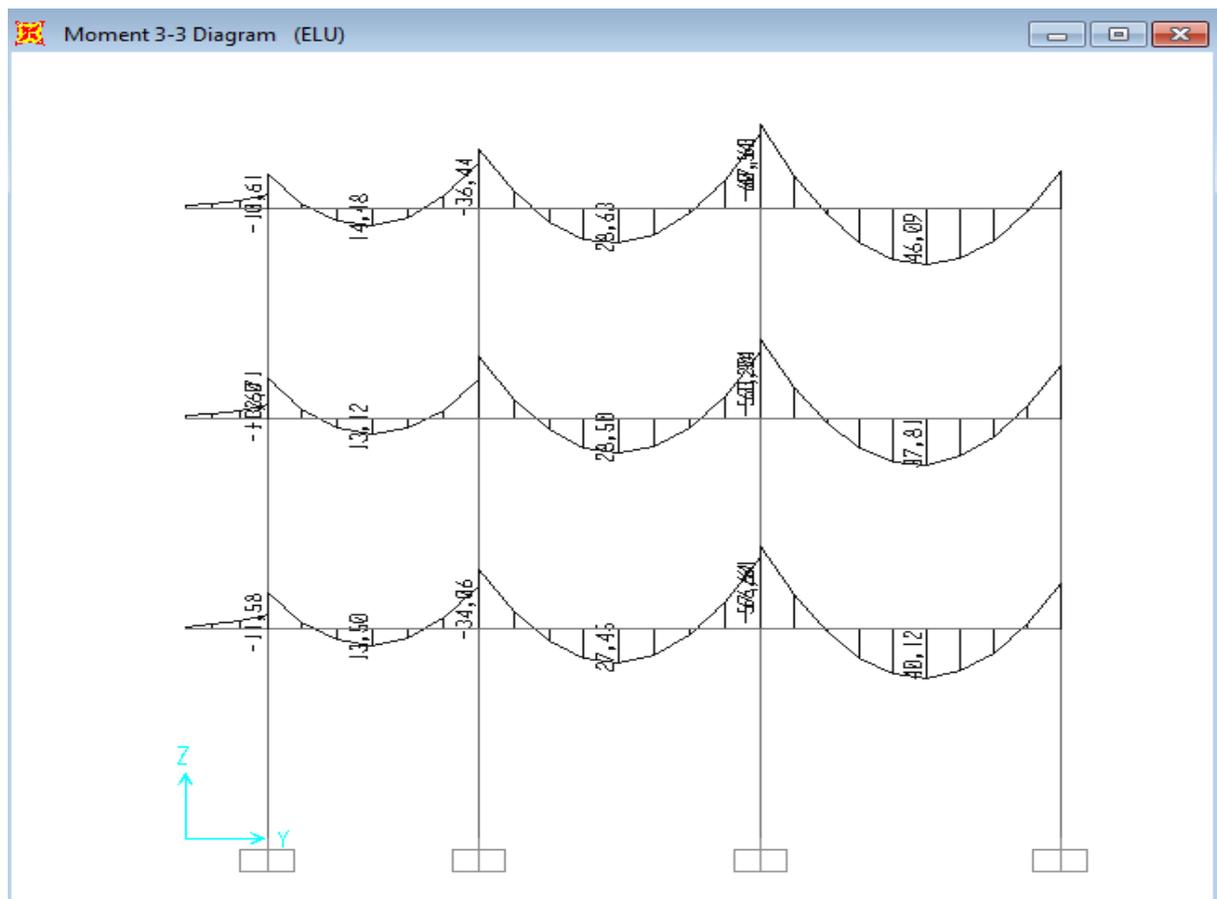


Figure IV.7 : Diagramme des moments fléchissant sur les poutres porteuses

IV-3-2-2-La flèche

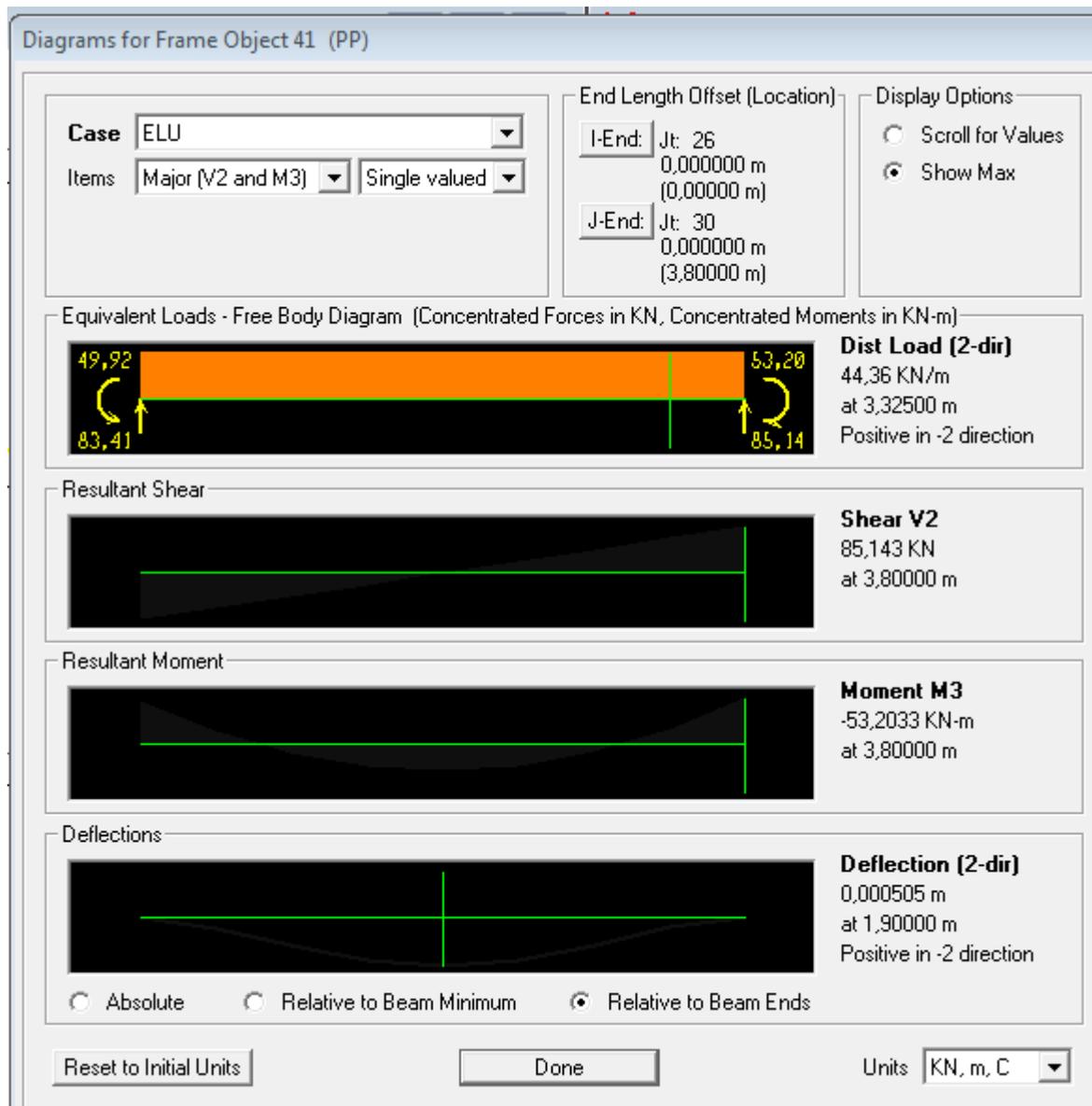


Figure IV.8 : Diagramme de la flèche maximale de la poutre porteuse à ELU

IV-4-Analyse numérique de la structure avec renforcement

IV-4-1-Préambule

Le renforcement et la réparation d'ouvrage en béton par collage de matériaux composites sont devenus relativement courant. Cela consiste à associer à la structure existante par collage structural un matériau relativement léger ayant de plus hautes performances mécaniques que le matériau béton (en termes de raideur et de contrainte ultime en traction). Ces matériaux dits matériaux composites sont le plus souvent composés de matrice époxy et de fibres de carbone, et ont l'avantage d'être relativement légers.

Notre cas d'étude fait l'objet de la modélisation du bâtiment après le renforcement des poutres principales et des poteaux par collage de matériaux composite « Polymère renforcé de fibres de carbone PRFC »

IV-4-2-Renforcement des poutres porteuses

Le renforcement des poutres en flexion par PRFC , est réalisé en collant des lamelles Sika Carbodur en surfaces des zones tendues du béton armé [24] , c'est pour ça dans notre cas nous utilisant lamelle Sika Carbodur aux dessous des poutres porteuses de notre structure .

IV-4-2-1 Modélisation des poutres porteuses :

La modélisation des poutres s'est faite de la même manière que celle effectué dans les titres précédents « analyse numérique » , mais en rajoutant des lamelles Sika Carbodure , qui fait comme suit :

Dans notre model nous utilisons une approche qui consiste à introduire dans logiciel SAP2000 lamelle Sika Carbodure dans la partie inferieure de la poutre porteuse , mais en définissant un nouveau module de Young , qui sera comme suit :

$$E' = E \cdot 1.15$$

$$E' = 3.2 \cdot 10^7 \cdot 1.15 = 3.68 \cdot 10^7 \text{ KN/m}$$

Le facteur 1.15 est justifié par les travaux de Dr.Abedssamad [1] , indiquant que le tissu Sika Carbodur apporte une amélioration au module de Young de 15 % .

La modélisation se fait alors :

- Définition d'un nouveau matériau *
- Introduction des différents propriétés et caractéristiques mécaniques du nouveau matériau

Material Property Data	
General Data	
Material Name and Display Color	BETON-FRP
Material Type	Concrete
Material Notes	Modify/Show Notes...
Weight and Mass	
Weight per Unit Volume	25,
Mass per Unit Volume	2,5493
Units	
	KN, m, C
Isotropic Property Data	
Modulus of Elasticity, E	36800000
Poisson's Ratio, U	0,3
Coefficient of Thermal Expansion, A	1,170E-05
Shear Modulus, G	14153846
Other Properties for Concrete Materials	
Specified Concrete Compressive Strength, f'c	20684,274
<input type="checkbox"/> Lightweight Concrete	
Shear Strength Reduction Factor	

Figure IV.9 : Définition du matériau béton / Sika Carbodur

- Ajout de la couche de Sika Carbodure sur les surfaces à renforcer .
- Enregistrement du nouveau profilé .
- Modélisation du reste de la structure .

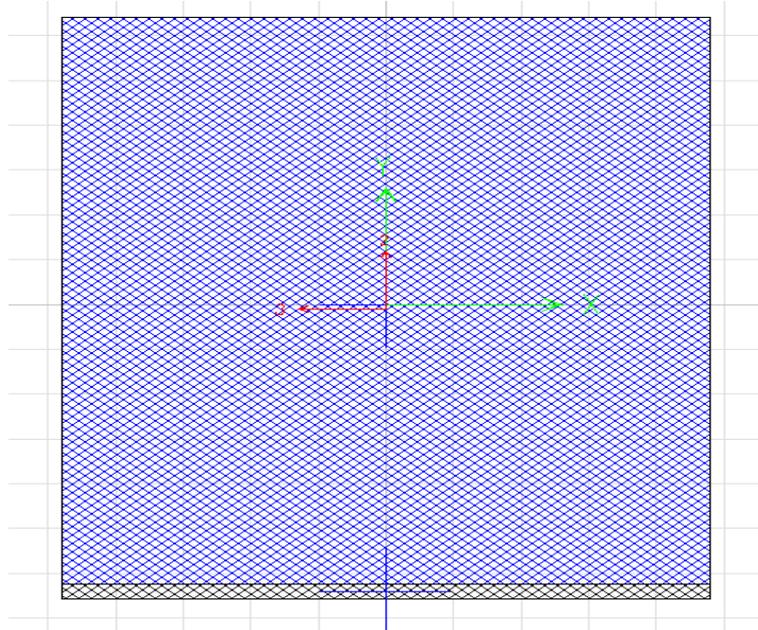


Figure IV.10 : Poutre porteuse avec renforcement par Sika Carbodur

IV-4-3-Renforcement des poteaux :

Comme nous le savons , les poteaux travaille en compression , donc on fait un confinement par Sika Wrap pour renforcer les cadres des poteaux .

IV-4-3-1-Modélisation des poteaux après renforcement

On utilise les mêmes donnés de celles des poutres porteuses, en indiquant que le tissu apporte une amélioration au module de Young de l'ordre de 15 %.

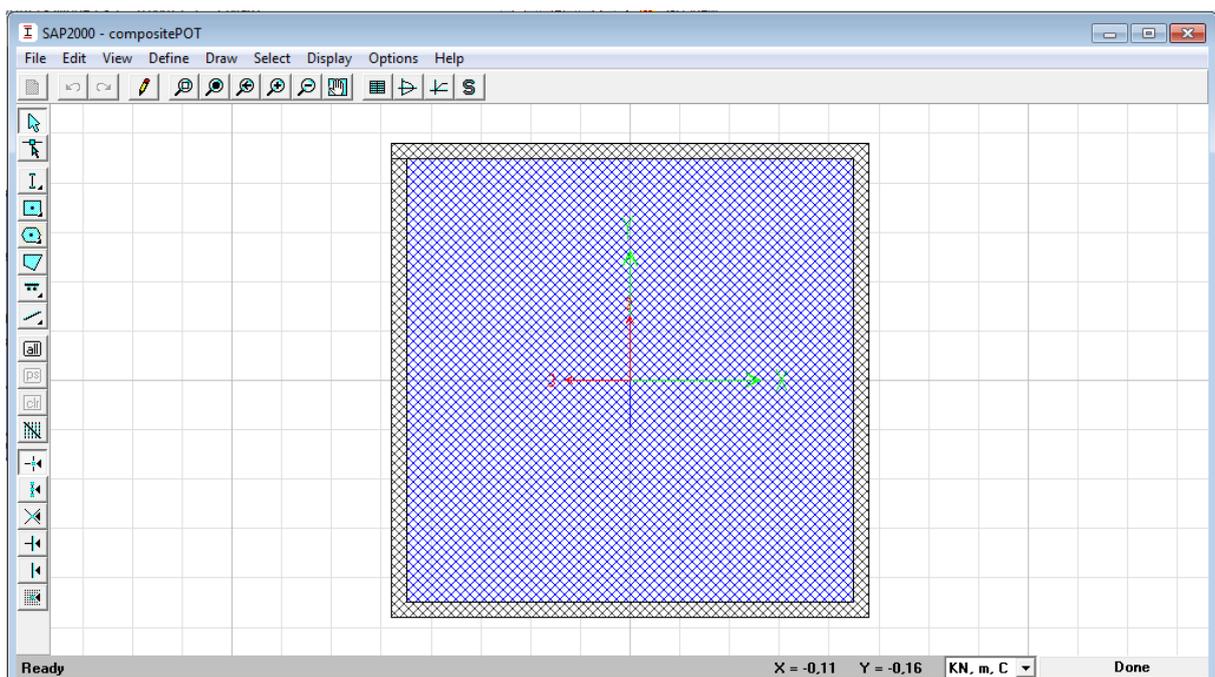


Figure IV.11 : Poteau confiné par Sika Wrap

IV-5-Exploitation des résultats après renforcement

IV-5-1-Analyse modale

Cette modélisation nous a permis de discerner les six premiers modes de vibrations après le renforcement des poutres principales et poteaux de la structure

Tableau IV.4 : Périodes et fréquences après renforcement

Mode	Période Sec	Fréquence Hz
1	0.688138	1.453196
2	0.618667	1.616378
3	0.586519	1.704974
4	0.221333	4.518079
5	0.206494	4.842755
6	0.195589	5.112761

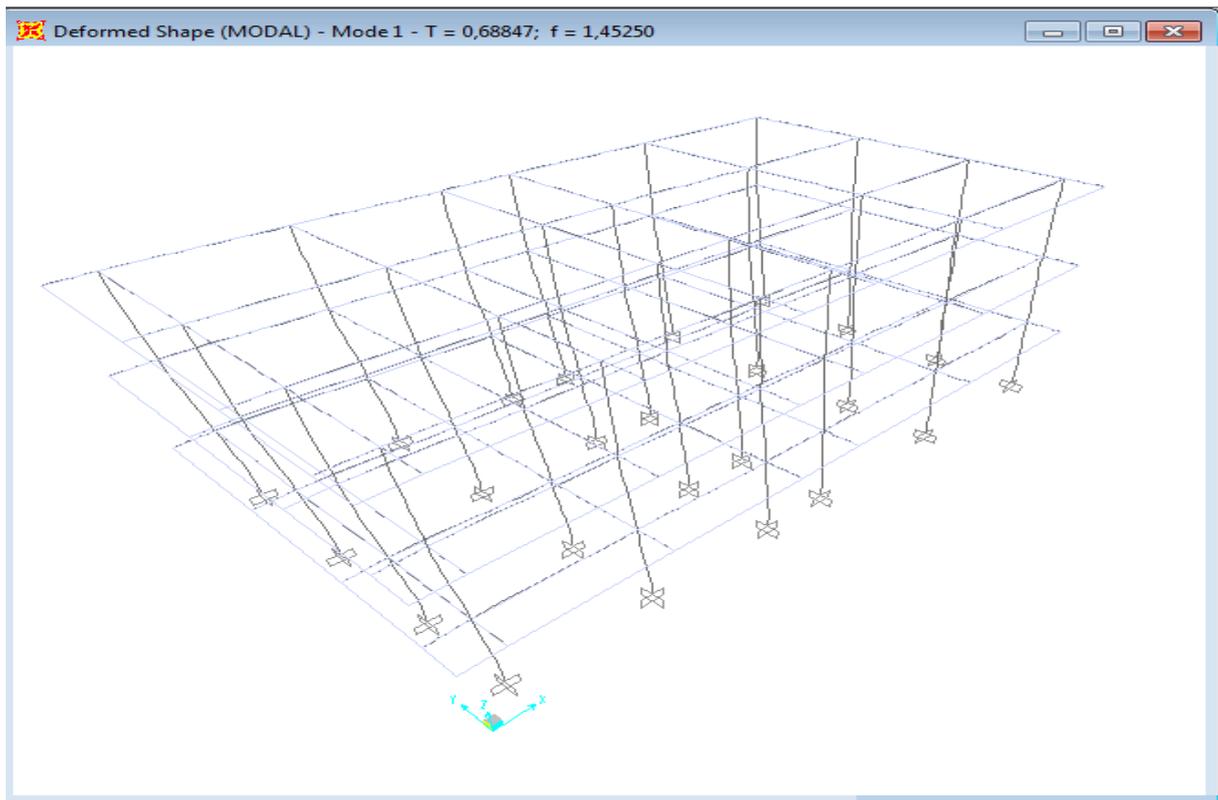


Figure IV.12 : Mode 1 après le renforcement

Tableau IV.5: Facteurs de participations massiques modales.

Mode	Période	UX	UY	SUM U X	SUM U Y
1	0.688138	0.87235	0.000001822	0.87235	0.000001822
2	0.618667	0.000008508	0.88195	0.87236	0.88195
3	0.586519	0.00054	0.00406	0.8729	0.88601
4	0.221333	0.10294	0.00000002123	0.97583	0.88601
5	0.206494	0.00000002244	0.09483	0.97583	0.98085
6	0.195589	0.0000000000255	0.00005327	0.97583	0.9809

IV-5-2-Analyse statique

IV-5-2-1-Le moment fléchissant et l'effort tranchant

Le tableau suivant indique les valeurs des combinaisons statiques après le renforcement

The screenshot shows a software window titled 'Base Reactions'. It contains a table with 10 columns: OutputCase Text, CaseType Text, StepType Text, GlobalFX KN, GlobalFY KN, GlobalFZ KN, GlobalMX KN-m, GlobalMY KN-m, and GlobalMZ KN-m. The table lists various load cases and their corresponding reaction values. The interface also includes a menu bar (File, View, Format-Filter-Sort, Select, Options), a units dropdown set to 'As Noted', and a record navigation bar at the bottom showing 'Record: 1 of 10'.

	OutputCase Text	CaseType Text	StepType Text	GlobalFX KN	GlobalFY KN	GlobalFZ KN	GlobalMX KN-m	GlobalMY KN-m	GlobalMZ KN-m
▶	ELU	Combination		000000001286	7,286E-13	9537,719	57598,8268	-104965,686	000000001016
	ELS	Combination		000000009286	5,249E-13	6950,91	41992,8043	-76511,8847	000000007342
	GQEX	Combination	Max	1020,088	2,037	6952,747	42013,8302	-68547,2829	6308,1749
	GQEX	Combination	Min	-1020,088	-2,037	6949,074	41971,7783	-84476,4865	-6308,1749
	GQEY	Combination	Max	2,037	1107,445	6953,114	50601,7852	-76491,0058	12308,0626
	GQEY	Combination	Min	-2,037	-1107,445	6948,707	33383,8233	-76532,7635	-12308,0626
	GEx	Combination	Max	1020,088	2,037	4741,285	28769,7174	-44313,486	6308,1749
	GEx	Combination	Min	-1020,088	-2,037	4737,612	28727,6655	-60242,6895	-6308,1749
	GEy	Combination	Max	2,037	1107,445	4741,652	37357,6724	-52257,2089	12308,0626
	GEy	Combination	Min	-2,037	-1107,445	4737,245	20139,7104	-52298,9666	-12308,0626

Figure IV.13 : Tableau des moments fléchissant et l'effort tranchant

IV-5-2-2-La flèche

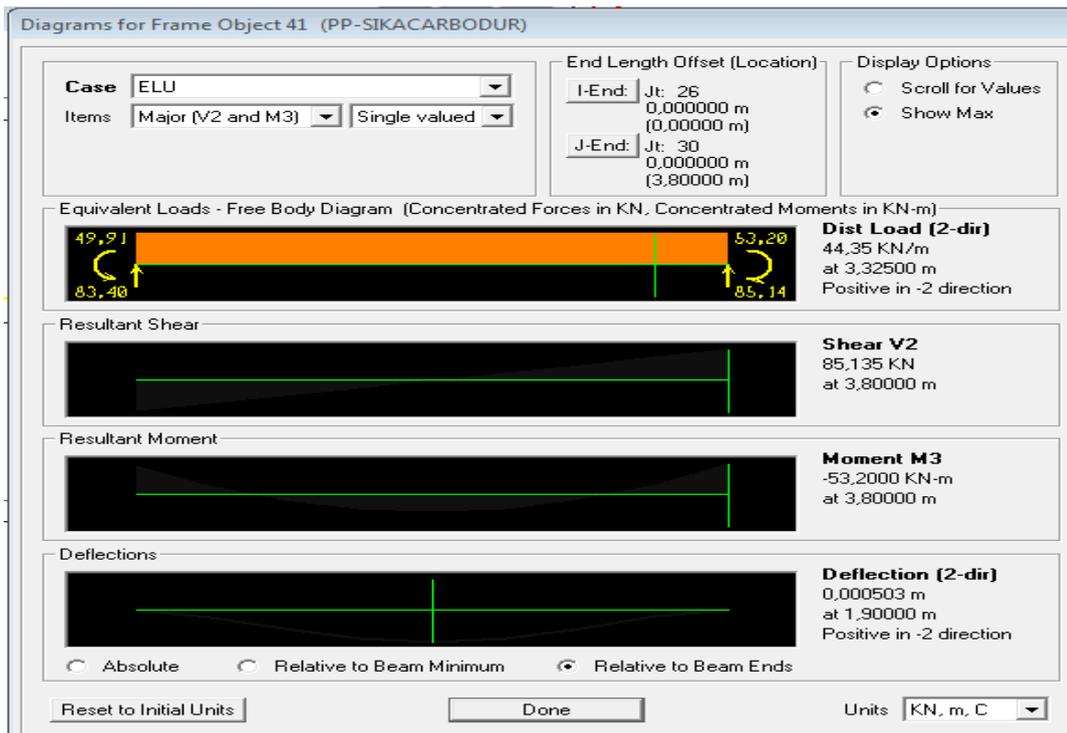


Figure IV.14: Diagramme de la flèche maximale de la poutre porteuse à ELU après renforcement

Chapitre V: Résultats et Discussion

V-1 – Introduction

Après avoir terminé la modélisation numérique avec et sans renforcement, Dans cette partie qui suit, nous allons essayer de voir quelles sont les améliorations apportées à notre structure après renforcement, en tenant compte uniquement des résultats obtenus selon le modèle proposé par ce travail.

V-2-Analyse statique

Concernant le moment fléchissant et l'effort tranchant, on remarque une légère diminution de l'ordre de 0.01 %, due à une faible augmentation du poids de la structure , qui revient au poids de la couche de PRFC appliquée .

L'amélioration qui nous intéresse le plus et l'amélioration apportée au niveau de la flèche , car elle fait intervenir le module de Young qui est la caractéristique la plus importante dans cette étude .

On trouve donc une amélioration de la flèche, preuve de l'augmentation du module de Young qui est inversement proportionnel à la flèche. Cette diminution de la flèche signifie aussi une amélioration de la capacité portante de notre ouvrage

Tableau V.1-diminutions des sollicitations en % après le renforcement

Chargement	Moment fléchissant	la flèche
ELU	0.13%	0.4%
ELS	0.13%	0.4%

V-3-Analyse dynamique

V-3-1-Analyse modale

Les résultats montrent qu'après application du PRFC , on note un changement au niveau des fréquences et des périodes , ceci est du à l'augmentation du module de Young qui est proportionnel à la rigidité , ainsi qu'à l'augmentation du moment d'inertie , on calcul que l'application d'une couche de PRFC (Tableau V-2) revient à rigidifier la structure , ce qui entraîne une diminution de la période qui est inversement proportionnel à la rigidité K .

Par la suite une augmentation de la fréquence $f = 1/T$.

Tableau V.2- Comparaison des fréquences et périodes de vibration

Modes	Avant renforcement		Après renforcement	
	Fréquences	Périodes	Fréquences	Périodes
1	1.41421	0.70711	1.453196	0.688138
2	1.611728	0.620452	1.616378	0.618667
3	1.691537	0.591178	1.704974	0.586519
4	4.434727	0.225493	4.518079	0.221333
5	4.828981	0.207083	4.842755	0.206494
6	5.080216	0.196842	5.112761	0.195589

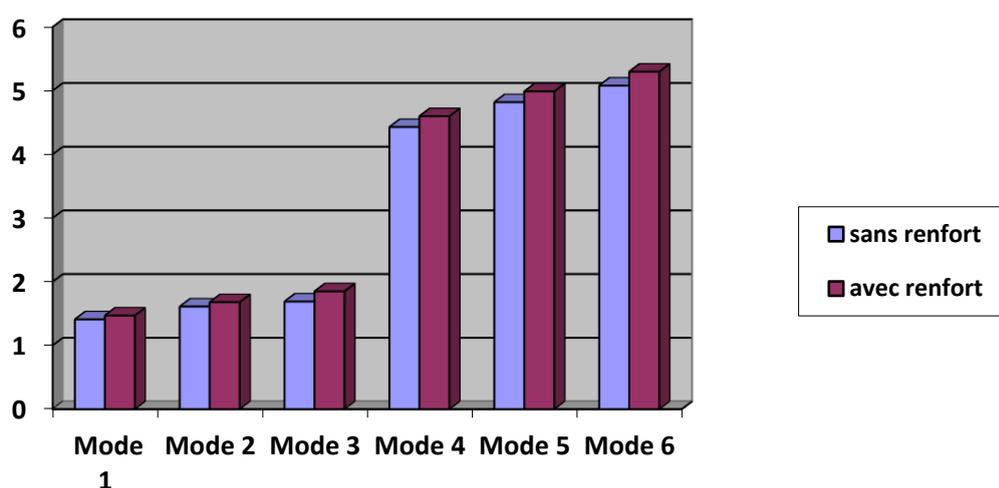


Figure V.1 : La variation de la fréquence avant et après le renforcement

V-3-2-Combinaisons sismiques

Tableau V.3- Comparaison de l'effort tranchant et le moment fléchissant avant et après renforcement

Chargement	Avant renforcement		Après renforcement	
	Fx	Mx	Fx	Mx
GQEX	999.378	42066.4436	1020.088	42013.8302
GQEY	1.987	50648.9662	2.037	50601.7852
GEX	999.378	28811.8436	1020.088	28769.7174
GEY	999.378	37394.3662	2.037	37357.6724

Conclusion Générale

L'étude réalisée nous a permis d'identifier les différentes techniques de réparation appliquées sur les structures en béton armé. Parmi ces techniques, qui représentent des solutions alternatives, la méthode de renforcement appelée "composites CFRP, appliquée pour les poutres porteuses (collage du tissu Sika Carbodur) d'un bâtiment à usage d'habitation, ainsi que pour les poteaux de cette structure (confinement d'un tissu de PRFC « Sika Wrap). Le procédé est simple à mettre en œuvre et relève parfaitement d'une application sur des structures en génie civil et qui a pour avantages : durabilité, rigidité et simplicité .

Ce travail nous a permis de réaliser des calculs statique et dynamiques par application du logiciel commercial " SAP 2000".

Pour l'ensemble des résultats obtenus lors de ce travail , nous avons pu constater un certain nombre de conclusions :

- Le renforcement des structures ou éléments structurels en béton armé au moyen de matériau composite (CFRP), apporte des gains appréciables peuvent atteindre les 60% en déformations et contraintes.
- Le gain sur la flèche est apparent, ce qui implique un gain sur la capacité portante de notre structure
- La diminution des périodes de vibration montre bien que l'application du matériau composite rigidifie d'avantage la structure et par conséquent, la structure renforcée par ce type de matériau peut résister aux mouvements dynamiques (vibrations, séisme,).

Nous recommandons pour futurs travaux de recherche, des études plus poussées telles que la prise en charge du comportement non linéaire des différents matériaux constitutants (béton, acier, composite,...) et même des études expérimentales pour valider le modèle mathématique choisi dans ce calcul numérique.

Références Bibliographiques

[1]-Mouloud Abdessemed « ETUDE EXPERIMENTALE ET MODELISATION DU COMPORTEMENT DES POUTRES EN BETON ARME RENFORCEES PAR DES MATERIAUX COMPOSITES SOUS FLEXION –CAS DES PONTS » , mémoire de doctorat , l'Ecole nationale polytechnique d'Alger , 2011 .

[2]- Dahmani Abderrahmane / Rahmaoui AISSA , « ANALYSE NUMERIQUE DU COMPORTEMENT STATIQUE ET DYNAMIQUE D'UN TABLIER MIXTE RENFORCE PAR TFC » , Mémoire de fin d'étude , Ecole national polytechnique , Alger , (Juin2012).

[3]-A.coïn « OSSATURES DES BATIMENTS » Edition EYROLLE 1981 .

[4]-Réparation et protection des ouvrages en béton armé (bâtiment et génie civil) , note d'information technique 231 (CSTC) [W.de Caluwé (FERB) M. le begge (CFE)] Septembre 2008.

[5]- Par micha4125 dans Maçonnerie et carrelage le 20 Février 2012 à 12:38

<http://bien-bricoler.maison.com/maconnerie-bien-reparer-les-lezardes-d-un-mur-qui-s-affaisse-a121371746>

[6]- MATIERE (Le retrait des bétons) [Christophe Carde, directeur technique du LERM] Septembre/Octobre 2006

<http://doc.lerm.fr/wp-content/uploads/2013/08/retrait-carde.pdf>

[7]-LES SOLUTIONS TECHNIQUES DE REPARATION ET DE RENFORCEMENT DES OUVRAGES EN GENIE CIVIL EN BETON ARME (2011).

[8]-Khobizi Sena « REHABILITATION DES STRUCTURES EN BETON ARME » , mémoire de master , Université 08 Mai 1945 Guelma (Juin 2007).

[9]- http://www.memoireonline.com/07/12/6023/m_Rehabilitation-des-ouvrages-en-beton-arme10.html

[10]-Maizi Ibtissem , Bendjoudi Mouslam , « Réhabilitation des structures en béton armé » , mémoire de master , Université 08 Mai 1945 , Guelma . année 2013 .

[11]-Document scientifique et technique « Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion , Novembre 2003 »

[12]-Ouazaa Kheira , « REHABILITATION DES STRUCTURES » , Polycopié , université des sciences et technologies Oran , (2015)

[13]-Joseph Abou Zeid « Méthodes de réparation et protection des ouvrages en béton armé » , mémoire , Institut des sciences appliquées et économiques , Université Libanaise (2016).

[14]-Mohcen Boukheza « Réhabilitation et renforcement des poutres au moyen des matériaux composites » , thèse de magister , université Mentouri , Canstantine(2009).

[15]- « COMPOSITES A FIBRES DE CARBONE DANS LE G2NIE CIVIL »
Techniques de l'ingénieur , traité plastiques et composites AM5.620.

[16]-Senhadj Linda « Les NANOS-COMPOSITES DANS LE DOMAINE DE GENIE CIVIL ,APPLICATION ET OBJECTIFS » , mémoire de fin d'étude , université Saad Dahlab , Blida 1(2015).

[17]- LAIB ABDELGHANI« Réparation et Renforcement des structures en béton armé » , Thèse de magister 2006, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene

[18]-Ould El Hacem Zein El Abidine « RENFORCEMENT DU BETON PAR DES MATERIAUX COMPOSITES» , mémoire de fin d'étude , thèse de magister 2009 . université Mentouri , Canstantine (2009).

[19]- Benaissa Med Abdelaziz et Menasri Lyes « Renforcement de la salle de conférence de l'université de BOUMERDES avec des Matériaux composites T.F.C »
Mémoire de fin d'études 2007, Ecole Nationale des Travaux Publics E.N.T.P

[20]-Fouzi Messai « Effet du taux de l'agent de traitement de surface et de comptabilisant sur des propriétés des composites à matrice thermoplastique» , Thèse de Magister 2015 , Université SETIF 1 .

[21]-Caroline , A, « CARBON FIBRE REINFORCED POLYMERS FOR STRENGTHENING OF STRUCTURAL ELEMENTS » , doctorate thesis , Lulea university of technology , 178 P , (2003) .

[22]-Logiciel de calcul des structures (220) ANALYSE AUX ELEMENTS FINIS (MEF) , Dlubal Software SARL , 93464 Tiefenbach Allemagne .

[23]-RPA VERSION 2003 .

[24]- Avis Technique 3/16-875 (2012), "Sika CarboDur SikaWrap", Annule et remplace l'Avis Technique 3/10-669 ,(arrêté du 21 mars 2012).

[25]-ESSAIS NON DESTRUCTIVES DU BETON . Chapitre-3 .