



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Travaux publics

Spécialité : Voie et Ouvrages d'Art

Présenté par :

BADOUR Slimane

Intitulé du mémoire

***Utilisation des matériaux composites
pour la réparation parasismique des voiles
en béton armé***

Soutenu publiquement le 17/06/2018 Devant le jury composé de :

Mr. Zidour Mohamed	Président
Mr. Hassaine Daouadji Tahar	Rapporteur
Mr. Rabahi Abderezak	Examineur
Mr. Bensattalah Tayeb	Examineur
Mr. Saoula Abdelkader	Examineur

Promotion : 2017 /2018



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciement

En premier lieu on tient à exprimer mes remerciements les plus vifs et les plus sincères à : **ALLAH**, le **CLÉMENT** et le **MISÉRICORDIEUX** de nous avoir donné la force, le courage et la patience qu'il nous a accordé pour réaliser ce modeste travail.

Mes sincères remerciements s'adressent du fond du cœur à mon directeur de mémoire professeur **Tahar Hassaine Daouadji**, qui a accepté de me prendre en charge, et m'a dirigé étape par étape avec ces précieux conseils, aussi pour la confiance et l'attention qu'il m'a accordées tout au long de ce travail et pour ses grandes qualités pédagogiques ainsi que pour sa rigueur scientifique. Mes remerciements sincères s'adressent également à Monsieur **RABAHI Abderezak** pour sa collaboration, son aide, son écoute son sens de la motivation m'ont été très utile pour mener à terme ce travail.

Je tiens également à remercier tous les gens qui mon aidé de près ou de loin pendant mon parcours, je cite parmi eux **Mr. Bekki.H, Mr Adim.B, Mr Benferhat.R, Mr Draiche.K, M^{elle}. Rennak.**

On tient à remercier profondément les membres du jury **Mr ZIDOUR Mohamed, Mr BENSATALLAH Tayeb, et Mr SOULA. Abdelkader** pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger ce travail.

J'adresse mes sincères remerciement à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexion et ont accepté à me rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches.

Enfin, je tiens à remercier l'ensemble de mes amis, avec qui j'ai passé l'ensemble de ces six années. Je ne peux malheureusement pas faire de remerciement personnalisé pour chaque d'entre vous, mais sachez que j'ai énormément apprécié la bonne ambiance qui règne au sein de cette équipe.

Dédicace

﴿وما توفيقي إلا بالله عليه توكلت وإليه أنيب﴾

Rien n'est aussi beau a offrir que le fruit d'un labour qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.

❁ *Je dédie ce travail a :*

❁ *A mes défunte chers parents que dieu l'accepte dans son paradis éternel,*

❁ *Mes frères : **Yassine et Abdel wahid***

❁ *Toute la famille : **BADOUR***

❁ *A meilleur amie M^{lle} **BELBLIDIA Maroua**, et tous mes amis de la promotion de génie civil.*

❁ *Et en dernier, un grand merci à toutes celles et tous ceux qui d'une manière ou d'une autre m'ont aidé et soutenu et qui ont partagé ma joie en ce jour ci.*

❁ *Tous mes enseignants durant mon cycle d'étude universitaire.*

BADOUR Slimane

Résumé

Les éléments structuraux en génie civil sous sollicitation sismiques subi un endommagement, dont les murs voiles l'un de ces éléments et nécessitent un renforcement ou une réparation parasismique. Parmi les techniques de renforcement existantes, l'un des plus efficaces pour les désordres structurels est la réparation des structures dégradées par collage externe des matériaux composites en raison de leur haute résistance et rigidité spécifique. Le manuscrit présente une étude et une analyse du comportement des murs voiles en béton armé, renforcés par des matériaux composites sous sollicitations sismiques. D'une part, nous avons mené une analyse statique et en vibration libre des murs voiles renforcés par des plaques en matériaux composites et d'autre part, de proposer une présente méthode qui puisse aborder la réponse d'une grande variété de murs voiles renforcés, face à une excitation sismique et d'identifier les apports possibles d'une telle modélisation à la conception. Les divers résultats numériques obtenus sont discutés et les facteurs essentiels influençant la réponse sismique des murs voiles renforcés sont mis en relief.

Mots clés : Séisme, vibrations libres, murs voiles renforcés, éléments finis, matériaux composites.

Abstract

Structural elements in civil engineering under seismic pressure suffered damage, whose sails walls are one of these elements and require a consolidation or are medial repair. Among existing strengthening techniques, one of the most effective for structural disturbances is repair of degraded structures by external collage of composite materials due to their high resistance and specific rigidity. The manuscript presents a study and analysis of the behavior of the sails walls of reinforced concrete, reinforced by composite materials under seismic solicitation on the one hand, we conducted a static analysis and free vibration of the sails walls reinforced by composite materials plates, and on the other hand, propose a present method that con address the response of a wide variety of reinforced sails walls. In the response to seismic excitation and to identify possible inputs of such modeling to design.

The various numerical results obtained are discussed and the essential factors influencing the seismic response of reinforced sails walls are highlighted.

Key words: Earthquake, Free vibrations, Strengthened sails wall, Finite element analysis, Composite materials

عناصر المباني في الهندسة المدنية تتعرض إلى الإهتلاك والتخريب تحت تأثير قوى الإهتزازات الزلزالية الأسوار هي واحدة من هذه العناصر التي تحتاج إلى التعزيز أو الصيانة. من بين تقنيات التعزيز القائمة والموجودة والذي يمثل أحد الأساليب فعالية للإضطرابات الهيكلية و في إصلاح الهياكل المتدهورة بالإصااق الخارجي لصفائح المواد المركبة وذلك نظرا لمقاومتها الكبيرة وصلابتها المتميزة. يقدم هذا المخطوط دراسة وتحليل تصرف الأسوار بالخرسانة المسلحة معززة بالمواد المركبة تحت تأثير قوى الزلازل. لقد قمنا بتحليل ثابت في الاهتزاز الحر لهذه الأسوار المعززة بصفائح المواد المركبة هذا من جهة ومن جهة أخرى عرض لمنهجية أو طريقة التي بإمكانها التصدي لعدد كبير من الأسوار بالخرسانة المسلحة المعززة، أمام تأثير قوى الزلازل وتحديد العوامل الممكنة لهذه النمذجة في التصميم.

مختلف النتائج المحصل عليها تم مناقشتها مع تسليط الضوء على العوامل الأساسية والمؤثرة على ردة فعل الأسوار بالخرسانة المسلحة المعززة أمام قوى

الإهتزازات الزلزالية.

الكلمات المفتاحية: زلازل، اهتزازات حرة، أسوار بالخرسانة المسلحة المعززة، العناصر المجزئة، المواد المركبة.

Résumé	ii
Abstract.....	iv
Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux	xi
Liste des abréviations et des notations	xii
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Pathologie et renforcement des ouvrages en béton armé	
I.1. Introduction	5
I.2. Pathologies des ouvrages en béton armé.....	5
I.2.1. Pathologie d’origine chimique	5
I.2.2. Pathologie d’origine mécanique.....	8
I.2.3. Pathologie d’origine physique.....	9
I.2.4. Agressivité du milieu extérieur	10
I.2.5. Erreur de conception et défaut d’exécution.....	10
I.2.6. L’usure	11
I.3. Les différentes techniques de renforcement.....	12
I.4. Méthodes de réparation non structurale	13
I.5. Méthodes de réparation structurales.....	13
I.5.1. Réparation par béton projeté	14
I.5.2. Réparation par adjonction d’armature complémentaire	14
I.5.3. Réparation par précontrainte additionnelle	15
I.5.4. Réparation par collage de plats métalliques.....	15
I.6. Renforcement par collage des plats composites.....	17
I.6.1. renforcement des ouvrages en béton armé	17
I.6.2. renforcement des structures métalliques	18
I.7. Conclusions	19

Chapitre II : Généralité sur les matériaux composites	
II.1. Introduction.....	22
II.2. Définition des composites.....	22
II.3. Type de matériaux composites.....	24
II.4. Revue des différents renforts disponibles	25
II.5. Notion sur les matrices.....	29
II.6. Classification des composites	30
II.7. Avantages et inconvénients des matériaux composites	31
II.8. Domaines d'application des matériaux composites	32
II.9. Application des composites dans le génie civil	33
II.10. Conclusion	34
Chapitre III : Comportement mécanique des voiles renforcés par composites	
III.1. Introduction	36
III.2. Définition.....	36
III.3. Les principales caractéristiques du comportement des voiles	36
III.4. Revue bibliographique des murs voiles.....	37
III.5. Le rôle des voiles en béton armé	37
III.6. Types de structures contreventées par voiles en béton armé.....	38
III.7. Comportement des voiles en béton armé.....	39
III.8. Objectif de la vérification de voile en béton armé.....	40
III.9. Modes de rupture des voiles	40
III.9.1. Modes de rupture des voiles élancés	40
III.9.2. Mode de rupture des voiles courts	42
III.10. Renforcement des murs voiles.....	44
III.10.1. Introduction	44
III.10.2. Renforcement par placage en acier.....	44
III.10.3. Le mécanisme d'absorption d'énergie.....	44
III.11. Renforcement par les matériaux composites	47

III.11.1. Renforcement des murs voiles par des plaques en composite comportant de différentes fractions volumiques	47
III.11.2. Schéma illustrant la position des plaques composites (Patches en composite)...	47
III.12. Principe de calcul des voiles en béton armé	48
III.13. Méthodes d'analyse des murs voiles	52
III.14. Méthode de l'élément mur.....	52
III.15. Analyse des murs voiles par la méthode EF mixte.....	53
III.16. Calcul des déplacements.....	54
III.17. Présentation des données	55
III.18. Conclusion	55

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. Introduction	57
IV.2. Effet du changement de matériaux composites	57
IV.3. Effet de l'épaisseur d'adhésif	57
IV.4. Effet de l'épaisseur de la plaque de composite	60
IV.5. Effet de pourcentage de patch	61
IV.6. Modes de vibration.....	63
IV.7. Effet de rapport de W_{f1}	64
IV.8 Effet de la fraction volumétrique des fibres	65
IV.9 Effet de l'hygrothermique	65
IV.10. Conclusion.....	66
Conclusions générale.....	69
Références bibliographiques.....	71

Liste des figures

Chapitre I : Pathologie et renforcement des ouvrages en béton armé

Figure I. 1 : Structures atteintes par la carbonatation 5

Figure I. 2: Mécanisme de l'attaque des sulfates 6

Figure I. 3: Epaufrures dues à la l'alcali-réaction..... 6

Figure I. 4 : Poutre située en bord de mer sous de l'agression des chlorures..... 7

Figure I. 5: Influence de la corrosion des armatures 7

Figure I. 6: Dégradation de la structure du supermarché de Annaba 8

Figure I. 7 : Tassement différentiel..... 9

Figure I. 8 : Désordres dus au séisme 9

Figure I. 9: Les erreurs de conception, a. disposition incorrecte des cadres, b. poteaux courts
..... 11

Figure I. 10 : Les erreurs de conception, c. Maçonnerie non chaînée, d. poteaux de géométrie élancée a subi une flexion globale 11

Figure I. 11: Renforcement au moyen de béton projeté..... 14

Figure I. 12 : Réparation de poutre par adjonction d'armature 14

Figure I. 13: précontrainte additionnelle 15

Figure I. 14: renforcement par collage de plats métalliques..... 16

Figure I. 15: Différents schémas de renforcement d'une poutre métallique en I..... 18

Figure I. 16: Différentes méthodes de renforcement par le collage de plaque en composites. (Réhabilitation du Blanc d'El-Harrach, Alger (photo CTC\Est)..... 18

Figure I. 17: systèmes de renforcement Sika® CarboDure®..... 19

Chapitre II : Généralité sur les matériaux composites

Figure II. 1: Les structures géométriques des composites..... 23

Figure II. 2 : Tissu en fibres de carbone..... 26

Figure II. 3: Différents types de fibres de verre..... 27

Figure II. 4 : Tissus de verre, carbone et aramide 28

Figure II. 5: Organigramme illustrant les principaux matériaux de renfort..... 28

Figure II. 6: Organigramme illustrant les différentes familles de matrice..... 30

Chapitre III : Comportement mécanique des voiles renforcés par composites

Figure III. 1: Catégories des murs voiles 38

Figure III. 2 : Instabilité latérale des voiles en béton armé 39

Figure III. 3: Le comportement du voile est similaire à celui d'une console 39

<i>Figure III. 4: déformation des voiles dans une structure</i>	40
<i>Figure III. 5 : Modes de rupture des voiles élancés</i>	42
<i>Figure III. 6 : Modes de rupture des voiles courts</i>	43
<i>Figure III. 7: Renforcement par plaques en acier</i>	44
<i>Figure III. 8 : Position en V de l'amortisseur</i>	45
<i>Figure III. 9 : Position diagonale de l'amortisseur</i>	45
<i>Figure III. 10: Position horizontale de l'amortisseur</i>	45
<i>Figure III. 11 : Système d'amortissement hybride</i>	45
<i>Figure III. 12 : Détails de la structure d'un amortisseur</i>	46
<i>Figure III. 13: Choix d'emplacement des mécanismes d'amortissement Position diagonale</i>	
<i>Figure III. 14 : Schéma d'une plaque en composite (Patch en composite)</i>	47
<i>Figure III. 15: Perspective d'emplacement des plaques composites</i>	48
<i>Figure III. 16: Efforts internes et état de contraintes dans le voile</i>	49
<i>Figure III. 17: Modèle d'un voile sollicité en flexion composée</i>	50
<i>Figure III. 18 : Hauteur de la zone critique d'un voile</i>	51
<i>Figure III. 19: Détail de confinement des éléments de bords sur toute la hauteur du voile</i>	
<i>Figure III. 20: élément du voile selon Kwan : (a) élément original, (b) élément simplifier</i>	

Chapitre IV : Résultats et discussions

<i>Figure IV. 1 : Comparaison entre voile non renforcé avec voile renforcé</i>	57
<i>Figure IV. 2 : Influence de l'épaisseur de l'adhésif (t_a) ; a)Acier, b) GFRP, c)CFRP</i>	59
<i>Figure IV. 3 : Influence de l'épaisseur de plaque de renforcement en ; a) Acier, b) GFRP, c) CFRP</i>	61
<i>Figure IV. 4: Influence de pourcentage (%) de patch ; a) Acier, b) GFRP, c) CFRP</i>	62
<i>Figure IV. 5: Représente les 3 modes</i>	63
<i>Figure IV. 6 : Représente le mode 1</i>	64
<i>Figure IV. 7 : Effet du rapport de W_{f1} en Hybride</i>	64
<i>Figure IV. 8: Représente Variation de déplacement en fonction de fraction volumique</i>	65
<i>Figure IV. 9: Représente Variation de déplacement en</i>	66

Liste des tableaux

Chapitre I : Pathologie et renforcement des ouvrages en béton armé

Tableau I. 1: Classification générale des pathologies liées au bâtiment..... 12

Chapitre II : Généralité sur les matériaux composites

Tableau II. 1: les différents types de composites. 24

Tableau II. 2: Propriétés des fibres de carbone..... 26

Tableau II. 3: Propriétés des fibres de Verre 27

Tableau II. 4: Propriétés des Résines thermodurcissables 30

Chapitre III : Comportement mécanique des voiles renforcés par composites

Tableau III. 1 : Les dimensions de la structure étudiée 55

Tableau III. 2 : Caractéristiques géométriques et propriétés des matériaux utilisés. 55

Chapitre IV : Résultats et discussions

Tableau IV. 1 : Influence de l'épaisseur de l'adhésif 59

Tableau IV. 2 : Influence de pourcentage (%) de patch 62

*Tableau IV. 3: Représente Variation de déplacement en fonction des conditions
hygrothermique* 66

Liste des abréviations et des notations

Abréviations

CFRP: Carbon Fiber-Reinforced Plastic.

GFRP: Glass Fiber-Reinforced Plastic.

FRP : Fiber-Reinforced Plastic.

HR : Haute Résistance.

HM : Haut Module.

IM : Module Intermédiaire.

BA : Béton-armé.

Notations

h, h_w : Hauteur du voile

h_{cr} : Hauteur de la zone critique d'un voile

l_w, a, l : Largeur du voile

E : Module de Young

G : Module de cisaillement

u : Déplacement latérale du refend

v : Déplacement vertical du refend

D_w : Largeur du mur

$[K]$: Matrice de rigidité de l'élément mur

N : Effort normal dans l'élément

$[K_1]$: Matrice de rigidité de l'élément mur en distorsion

$[K_2]$: Matrice de rigidité de l'élément mur en flexion

C_0 : Coefficient d'amortissement

t_1 : Epaisseur du mur refend

t_2 : Epaisseur de l'adhésif

t_3 : Epaisseur de la plaque composite

b_1 : Largeur de la plaque composite

h_1 : Hauteur de la plaque composite

E_b : Module de Young du mur

E_{ad} : Module de Young de l'adhésif

E_{patch} : Module de Young de la plaque composite

E_f : Module de Young des fibres

E_m : Module de Young de la matrice

- ν_m : coefficient de poisson de la matrice.
- V_f : le taux de fibre dans la résine.
- V_m : teneur en volume de la matrice.
- W_{f1} : le pourcentage de la totalité de fraction volumique de fibre.
- G_b : Module de cisaillement du mur
- G_{ad} : Module de cisaillement de l'adhésif
- G_{patch} : Module de cisaillement de la plaque composite
- G_f : Module de cisaillement des fibres
- G_m : Module de cisaillement de la matrice
- y_1, x_1 : Coordonnées du patch par rapport au centre du mur
- $[M]$: Matrice masse du mur
- A : Section transversale du mur
- D_{max} : Déplacement maximal au sommet
- D_{sp} : Déplacement maximal du voile non renforcé
- D_p : Déplacement maximal du voile renforcé
- S_t : Surface totale du voile
- S_p, S_B : Surface renforcée du voile
- θ : Rotation nodale de l'élément de Kwan
- w : Déformation de l'élément de Kwan
- γ : Distorsion de l'élément mur
- ε_y : Déformation axiale dans l'élément mur
- ε_{y0} : Déformation axiale au centre de l'élément mur
- ν_f : Coefficient de poisson des fibres
- λ : Valeur propre
- ρ : Masse volumique du mur voile

Introduction Générale

Introduction générale

L'intensité des forces sismiques agissant sur un bâtiment lors d'un séisme est conditionnée non seulement par les caractéristiques du mouvement sismique, mais aussi par la rigidité de la structure sollicitée. Dans le passé, les structures relativement flexibles à base de portiques ou des cadres étaient censées se comporter mieux sous chargement sismique, dû au fait qu'elles attirent, généralement, des forces sismiques moins intenses. Cependant, les constatations faites dans le monde après les séismes destructeurs, ont montré que ce type de structure doit supporter d'importants déplacements relatifs entre deux étages consécutifs et par conséquent des dommages sévères sur des éléments non structuraux. De plus, les demandes excessives de ductilité et les effets de deuxième ordre générés par les grandes déformations, peuvent provoquer la ruine de la structure. Lors des séismes sévères, il a été constaté que de nombreux bâtiments à voiles en béton armé (cas du séisme de mai 2003 à Boumerdes), ont bien résisté sans endommagements exagérés. Mis à part leur rôle d'éléments porteurs vis-à-vis des charges verticales, les voiles de contreventement en béton armé correctement dimensionnés, peuvent être particulièrement efficaces pour assurer la résistance aux forces horizontales, permettant ainsi de réduire les risques. Notons, pour cela, les avantages importants que présente leur utilisation par rapport aux constructions à cadres ou portiques :

- Grâce à leur grande rigidité vis-à-vis des forces horizontales, ils permettent de réduire considérablement les dommages sismiques des éléments non structuraux, dont la valeur dépasse généralement les deux tiers de celle de l'ensemble du bâtiment.
- La masse élevée des voiles permet un bon isolement acoustique et la bonne capacité calorifique confère au bâtiment une inertie thermique appréciable.
- Une construction à voiles en béton armé est souvent plus économique qu'une construction à poteaux et poutres, puisque les murs remplacent à la fois les poteaux, les poutres et les cloisons.

Dans un bâtiment, les efforts horizontaux sont transmis aux voiles habituellement par les planchers qui jouent le rôle de diaphragmes. Entre chaque voile la sollicitation se répartit proportionnellement avec sa rigidité dans la direction de sollicitation. Les voiles transmettent ces efforts à la base du bâtiment et finalement au sol. Le mode de fonctionnement d'une structure comportant des murs de contreventement dépend donc fortement du comportement de chaque élément individuel. Le comportement d'un élément de mur est complexe puisqu'il dépend à la fois de son élancement, de la disposition en plan de l'ensemble des voiles, de l'importance des charges verticales et de la forme de sa section. De ce point de vue, il est

généralement reconnu que la modélisation du comportement des voiles est bien plus complexe que celle des éléments linéaires (tel-que les poutres et les poteaux). Ces murs de contreventement, sont dimensionnés pour une durée de vie déterminée. Toutefois, plusieurs types de désordres viennent réduire cette durée de vie prévisionnelle. La maintenance de ces éléments consiste à les protéger, aboutissant ainsi à une meilleure étanchéité ou limitant des fissurations. Parmi les techniques disponibles, l'une des plus efficaces pour les désordres structurales, est le renforcement et/ou la réparation par l'utilisation des plaques en acier (procédé de l'Hermite). L'inconvénient majeur de cette technique réside dans la difficulté de manipulation des plaques en acier compte tenu de leur poids, ainsi que le problème de corrosion. Une autre alternative de renforcement et de confortement parasismique à été proposée dans la dernière décennie et l'utilisation des matériaux composites collées extérieurement sur les murs voiles de contreventement. Ces matériaux composites, en particulier à base de fibres, présentent un grand intérêt, d'une part de leur poids réduit et d'autre part leur mise en œuvre facile et rapide.

L'étude dynamique des structures en béton armé tels que les poteaux, poutres et planchers, renforcées par des matériaux composites a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. Cependant, peu de travaux dans ce domaine ont concerné les murs voiles en béton armé.

Le présent mémoire est composé de quatre parties comme suit :

Une introduction générale rappelant le contexte général de la problématique ainsi que les objectifs à atteindre.

Le premier chapitre décrira, à travers une étude bibliographique les pathologies des ouvrages en béton armé ainsi que les différentes techniques de renforcement structurale et non structurale. Une des techniques de réhabilitations les plus utilisées ; l'utilisation des matériaux composites à fibre peut contribuer à la réparation rapide et efficace des structures.

Le deuxième chapitre sera consacré à une revue d'ensemble sur les matériaux composites et leurs différentes propriétés physiques et mécaniques à l'utilisation dans le domaine de la construction.

Le troisième chapitre présentera comportement mécanique des voiles en béton armé renforcés par composites et un développement analytique pour le calcul de déplacement des voiles renforcées.

Le quatrième chapitre une étude paramétrique a été présentée pour bien montrer l'influence des différents paramètres sur le comportement des murs voiles renforcés par composite

Chacun de ces chapitres est terminé par une conclusion partielle, dont le bilan est effectué en conclusion générale constituant une récapitulation de la présente étude, dans laquelle nous proposons des perspectives.

Chapitre I :

Pathologie et renforcement des ouvrages en béton armé

I.1. Introduction

En génie civil, la pathologie détermine les causes des symptômes et des maladies des constructions, dont l'objectif réside dans la recherche des remèdes pour ces signes de fatigue. La pathologie est le terme employé pour définir les dégradations subies par les ouvrages et les structures de leurs composantes. Avant de procéder à toute réparation, il est indispensable de procéder à un diagnostic et de rechercher les causes de dégradation lorsque celle-ci n'apparaissent pas de façon évidente. En effet cette étape est nécessaire pour le choix de la réparation la plus durable un panorama de l'essentielle des pathologies affectant les ouvrages en béton armé en les classant en fonction de leur origine.

I.2. Pathologies des ouvrages en béton armé

I.2.1. Pathologie d'origine chimique

a. Carbonatation

La carbonatation est une réaction chimique entre la chaux du béton et le dioxyde de carbone de l'air (CO_2). Les conséquences de cette réaction chimique sont très dommageables pour les armatures et peuvent alors se corroder Figure I.1 [NET 03].



Figure I. 1 : Structures atteintes par la carbonatation

b. Réactions sulfatiques

Les réactions sulfatiques sont provoquées par l'action des sulfates provenant du milieu extérieur (eaux souterraines, remblais contenant des sulfates, pluies acides avec la chaux et les aluminates de ciment) le produit final de la réaction est l'ettringite dont le développement au sein de béton provoque une expansion qui altère les caractéristiques mécaniques de béton.

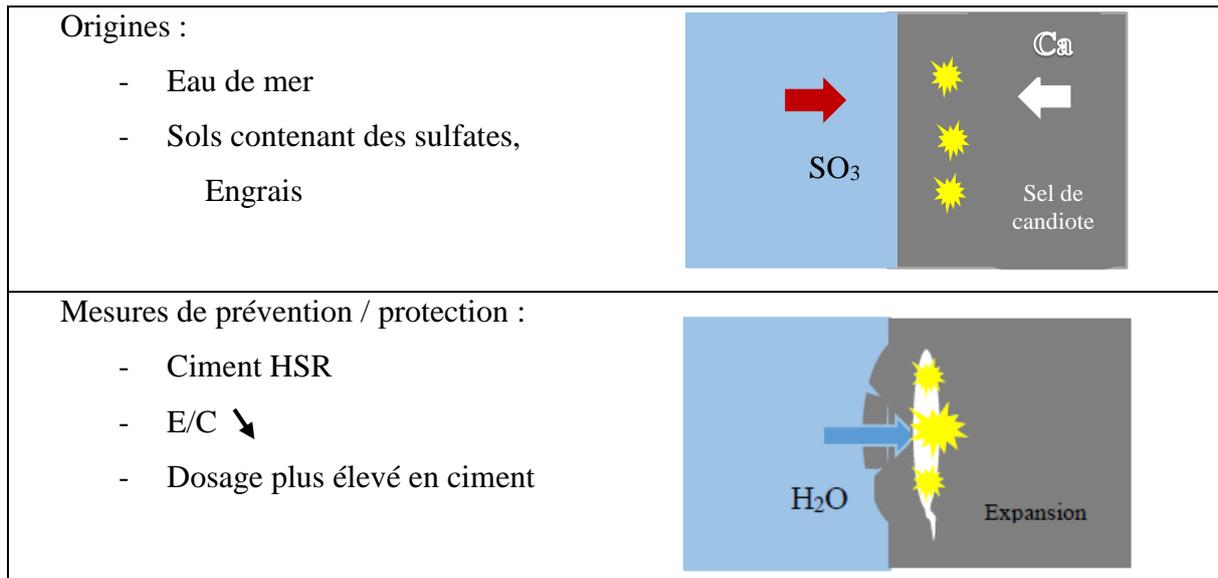


Figure I. 2: Mécanisme de l'attaque des sulfates

c. Alkali réaction

Alkali réaction sont des réactions chimiques entre certaine forme de silice et les alcalis du béton. La principale conséquence de cette réaction consiste en la formation d'un gel expansif, entrainant un gonflement du béton ce gonflement engendre à son tour des contraintes interne au sein de la structure.



Figure I. 3: Epaufrures dues à la l'alcali-réaction

d. Pénétration des chlorures :

Les ions chlorures peuvent provenir des constituants du béton : ciment, sable, eau de gâchage. Cependant, l'origine des chlorures est le plus souvent extérieure : l'eau de mer, des sels de déverglaçage. Dans ce cas-là, les ions chlorures pénètrent dans le béton par diffusion ou par absorption capillaire. De très faibles concentration en chlorures forment le composé Fe OOH sur la couche passive, puis les ions instables de FeCl^{-3} consomment les ions hydroxyles présent ce qui conduit à une diminution de PH Figure I.4 [NET 01].



Figure I. 4 : Poutre située en bord de mer sous de l'agression des chlorures

La circulation des électrons libérés par la réaction d'oxydation vers les sites cathodiques engendre des piles électrochimiques sur l'armature conduisant à la décomposition de l'acier dans les zones anodiques. Donc au niveau du béton rien n'est visible, et on ne voit au bout d'un certain temps que les conséquences : corrosion des armatures (Ould El Hacem, 2016).

e. Corrosions des armatures

Lors du coulage du béton, l'eau de gâchage réagit avec l'acier et forme une couche protectrice d'hydroxydes de fer $[Fe(OH)_2]$ et de calcium $[Ca(OH)_2]$. Ainsi, la solution interstitielle du béton aura un PH élevé, de l'ordre d 13.

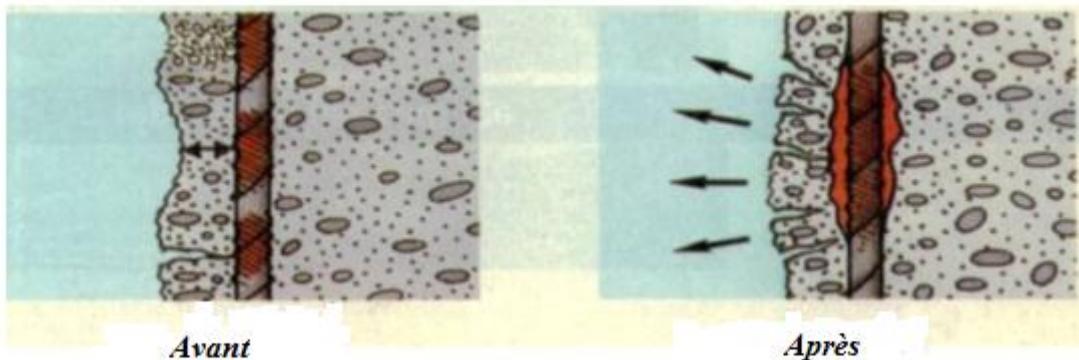


Figure I. 5: Influence de la corrosion des armatures

Si la solution interstitielle ne convient plus à un béton sain, comme dans le cas de la carbonatation et la pénétration des ions chlorent, cette couche protectrice disparaît. Les produits, oxydes et hydroxydes, des oxydations au niveau de la surface de l'acier s'accumulent, entraînant un gonflement, par suite la fissuration de l'enrobage.

I.2.2. Pathologie d'origine mécanique

a. Les chocs : Les désordres induits par l'exploitation d'un ouvrage constituent une cause non négligeable de dégradation du béton. Ils s'agit le plus souvent d'action accidentelle de type mécanique qui se concrétise par des chocs ; les chocs le plus fréquents sont ceux des poids lourds contre les piles des ponts, les chocs des bateaux ou d'objet flottant contre les piles en rivière. Ces chocs peuvent créer d'importante éclate de béton voir même des ruptures d'acier.

b. Incendie : L'incendie a pour effet d'élever de façon rapide la température au sein du béton. La vaporisation brutale de l'eau se combine à une altération interne du béton pour créer des micros-fissuration et des éclatements du béton sous l'effet de la chaleur les ferrailages se dilatent et perdent une partie importante de leur résistance. la Figure I.6 dégradation de la structure du supermarché de Annaba a. Violence de l'incendie b. Eclatement de l'enrobage de la poutre et du plancher (Maalem, 1998).



a



b

Figure I. 6: Dégradation de la structure du supermarché de Annaba

c. Ondes de chocs : Le béton est susceptible de s'épauprer 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).

d. Tassement différentiel : Lorsqu'un sol tasse d'une façon inégale sous les différents points d'une fondation, on dit qu'il y a un tassement différentiel. Il se manifeste soit par un basculement soit par de graves désordres dans les éléments non structuraux et parfois dans la structure elle-même si les efforts sont incompatibles avec la sécurité des matériaux. Les causes des tassements différentiels sont multiples, mais les plus fréquemment rencontrés sont :

- Les sols compressibles.

- Les remblais récents

- Le 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...la Figure I.7 représente un tassement différentiel. (Ould El Hacem, 2016)



Figure I. 7 : Tassement différentiel

I.2.3. Pathologie d'origine physique

a. Erosion, abrasion et choc : Les ouvrages les plus touchés par l'érosion se situent essentielle en milieu fluvial et maritime. Ils sont soumis au charriage d'éléments solides induits par les courants et à l'action des vagues à chaque marée. La dégradation du béton par frottement se traduit par la création de défauts géométriques de surface, l'apparition d'épaufrure et par des éclatements superficiels qui entraînent la mise à nu des armatures et l'accélération des risques de corrosion (Yahyaoui, 2006).

b. Séisme : Un séisme est une manifestation de la tectonique des plaques. Il se traduit en surface par une vibration du sol provenant d'un déplacement brutal de la roche. En surface, un séisme peut dégrader ou détruire des bâtiments, produire des décalages de la surface du sol de part et d'autre des failles.



Figure I. 8 : Désordres dus au séisme

Il peut aussi provoquer des chutes de blocs, une liquéfaction des sols meubles imbibés d'eau, des avalanches ou des raz de marée (tsunamis). La Figure I.8 désordres due au séisme (Séisme de Boumerdes, 2003).

c. Retrait du béton : L'élimination de la quantité d'eau en excédent dans la formulation d'un béton pour assurer des conditions d'ouvrabilité acceptables se traduit par des variations dimensionnelles du béton. Le retrait, gêné par la présence d'armatures, a tendance à solliciter le béton en traction de son plus jeune âge et, par conséquent, à créer des fissures. (Yahiaoui, 2006).

d. Humidité : La présence d'humidité favorise la prolifération des mousses, lichens, champignons et herbes. D'autre part, certains arbustes sécrètent des acides qui provoquent l'altération des joints et des pierres. Les végétaux présents sur des ouvrages peuvent détériorer les matériaux constitutifs en dégradant les propriétés mécaniques des matériaux.

Une autre source de problème provient de la pénétration et la croissance des racines dans la maçonnerie qui entraîne la désorganisation puis la dislocation de partie de l'ouvrage. La présence de la végétation est favorisée par l'humidité. Toutes les parties de la structure peuvent être concernées par ce type de pathologie.

I.2.4. Agressivité du milieu extérieur

- Cycle gel – dégel
- Sels de dévers-glaçage
- Action de l'eau de mer

I.2.5. Erreur de conception et défaut d'exécution

Ce type de désordres peut être induit par des erreurs intervenant soit au stade du dimensionnement de l'ouvrage, soit au stade de son exécution. Dans le premier cas, les causes de fissuration et de dégradation de la structure sont généralement induites par de graves erreurs dans la vérification de la stabilité de l'ouvrage et des conditions de résistance ou, plus simplement, par la prise en considération d'hypothèses erronées au niveau des conditions de chargement, d'environnement ou de fonctionnement de l'ouvrage. Ces erreurs sont à l'origine, généralement, d'un mauvais dimensionnement des sections et d'une disposition non satisfaisante des armatures qui se traduisent par des localisations des fissures ou des ruptures non acceptables. Aussi, une évaluation imparfaite des conditions des sollicitations cycliques des ouvrages et des lois de comportement en fatigue des matériaux est susceptible de remettre en cause les résultats de calcul et le dimensionnement pour une durée de vie escomptée (Rafik, 2011).



a.



b.

Figure I. 9: Les erreurs de conception, **a.** disposition incorrecte des cadres, **b.** poteaux courts



c.



d.

Figure I. 10 : Les erreurs de conception, **c.** Maçonnerie non chaînée, **d.** poteaux de géométrie élancée a subi une flexion globale

I.2.6. L'usure

L'utilisation et l'exploitation de tout ouvrage ou structure même inévitablement à l'usure (naturelle) de celle ce qui entraîne les dégradations totale ou partielle de celle-ci avec le temps.

L'étude de ces pathologies constitue une étape majeure dans le processus de la réhabilitation- que nous aborderons en aval- notamment au stade de l'élaboration du diagnostic, étape déterminante dans la définition des interventions à mener sur le bâtiment. Le tableau I.1 définit la classification des pathologies (Monjo, 2011).

Tableau I. 1: Classification générale des pathologies liées au bâtiment

Famille	Lésions	Types
Physique	Humidité	Capillaire/De filtrage/De condensation/Accidentelle/De travaux
	Saleté	Par dépôt / Par nettoyage différentiel
	Erosion	Météorologique
Mécanique	Déformations	Tassement/Effondrement/Flambement/Gauchissement/Flèche
	Fissures	Par charge / Par dilatation - contraction
	Fissures superficielles	Par support / Par finition
	Détachements	Finitions continues / Finitions par éléments
	Erosion	Coups / Frottements
Chimique	Efflorescence	Sels solubles cristallisés/Réaction chimique avec les sels
	Oxydation	Oxydation superficielle
	Corrosion	Oxydation préalable/Immersion/Aération différentielle/Paire galvanique
	Organismes	Présence et attaque d'animaux/Présence de plante
	Erosion	Pollution

I.3. Les différentes techniques de renforcement

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. Le choix de la méthode de réparation et des matériaux à mettre en œuvre est défini en fonction de la nature et de l'importance des désordres constatés, en tenant compte des critères économiques des matériaux de construction, des conditions de chantier et des contraintes de site. Le principe de renforcement ou de réparation consiste en adjonction de matière dans les zones où les sections sont trop sollicitées. Une section devient trop sollicitée si, du fait même des dispositions adoptées ou du changement des conditions d'exploitations, les efforts appliqués sont supérieurs à ceux pris en compte dans les calculs (problème de renforcement), ou bien si la résistance a diminué par suite de dégradation (problème de la réparation). Il est possible de définir la maintenance comme l'ensemble des interventions qui

ont pour but de prolonger la durée pendant laquelle l'ouvrage va procurer des avantages à la collectivité. Parmi les interventions de maintenance, on peut distinguer :

- Les interventions qui visent à maintenir l'ouvrage à l'état neuf : ce sont les interventions d'entretien qui ont un caractère préventif.
- Les interventions qui améliorent l'état de l'ouvrage lorsque le processus de dégradation a déjà commencé : il s'agit des interventions de réparation et/ou de renforcement.

Selon les cas étudiés, il est nécessaire de faire intervenir la notion de protection de l'ouvrage visent à assurer par exemple des fonctions d'étanchéité ou à limiter les phénomènes de corrosion, la notion de réparation visent à restituer les caractéristiques initiales de portance (rigidité – résistance) et éventuellement, la notion de renforcement ayant pour objectif d'améliorer les performances de la structure vis-à-vis de conditions d'exploitation modifiées ou d'augmenter la durée de vie de l'ouvrage. Différentes méthodes et techniques de renforcement des ouvrages sont couramment utilisées depuis de nombreuses années.

I.4. Méthodes de réparation non structurale

Des solutions de réparation graduelles peuvent être envisagées. Lorsque les désordres sont peu importants, des méthodes non structurales sont utilisées. Ces techniques de réparation dites « légères » consistent en une reprise du béton dégradé par ragréage ou injection. Le traitement du béton peut faire l'objet d'opération de ragréage par application de couches de peinture ou de mortier hydraulique après traitement de la poutre dégradée. La réparation par injection des fissures se fait bien évidemment à l'aide de produits aux caractéristiques bien définies et contrôlées, les conditions de mise en œuvre des produits de ragréage sont précisées dans la norme NF P95-101.

I.5. Méthodes de réparation structurales

Les réparations et/ou renforcement structuraux des ouvrages en béton armé peuvent être effectués soit par ajout de forces (cas de la précontrainte additionnelle), soit par ajout de matière (béton projeté, adjonction d'armature complémentaire et renfort collés (plaques d'acier ou composites)).

I.5.1. Réparation par béton projeté

Cette technique, très au point, utilisée tant pour le renforcement de structures insuffisantes ou défailtantes que pour la réparation d'ouvrage endommagés, exige pour sa mise en œuvre un personnel spécialisé. Le béton peut être, ou non, combiné avec l'adjonction d'armatures complémentaires. Après durcissement, le béton projeté possède les propriétés d'un béton coulé, puis vibré. La projection est possible dans toutes les directions. La figure I.11 représente renforcement par béton projeté (Belhannachi, 2009).



Figure I. 11: Renforcement au moyen de béton projeté

Les réparations superficielles et les réparations profondes. Grâce à son adhérence au support, à ses caractéristiques très proches de celle du béton coffré, aux possibilités de mise en place et d'enrobage d'armatures de renfort qu'il procure, le béton projeté permet de réaliser économiquement de telles réparations. La difficulté de l'emploi de cette méthode provient essentiellement du mode d'application et de mise en œuvre (matériels, main d'œuvre et problème d'hygiène et de sécurité).

I.5.2. Réparation par adjonction d'armature complémentaire

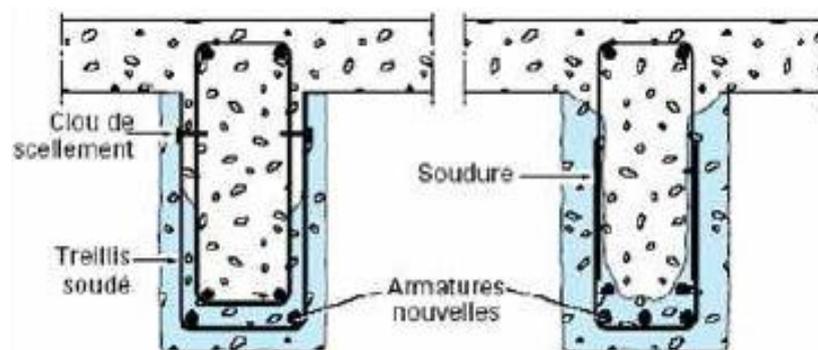


Figure I. 12 : Réparation de poutre par adjonction d'armature

Des armatures complémentaires sont à prévoir lorsqu'il s'agit de remplacer des aciers corrodés ou coupés accidentellement ou lorsqu'il s'agit de renforcer une structure. Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration, et participer à la résistance des sections

renforcées. La protection de ces armatures est assurée par un béton coulé ou projeté et leurs jonctions avec les armatures existantes peuvent se faire par des procédés classiques (recouvrement, soudure, manchonnage) (Ould El Hacem, 2016).

I.5.3. Réparation par précontrainte additionnelle

Contrairement aux techniques présentées ci-dessus qui consiste en l'ajout de matière (béton ou acier), la précontrainte additionnelle consiste en un ajout de force dans des ouvrages existants en vue soit de leur redonner leur état de service initial, soit de leur donner un nouvel état de service. Elle permet, en effet, d'appliquer des efforts d'une intensité connue, en des points et suivant des directions bien définies, capables de s'opposer aux efforts générateurs des désordres. Elle est réalisée le plus souvent par la mise en œuvre d'armatures de précontrainte (câble ou barres). La précontrainte additionnelle peut être employée pour traiter une grande variété d'ouvrage (ponts, barrages, réservoirs, bâtiments). Cette méthode est particulièrement adaptée au renforcement en flexion et vis-à-vis de l'effort tranchant par l'emploi d'étriers actifs (figure I.15) (Ould El Hacem, 2016).



Figure I. 13: précontrainte additionnelle

Cette méthode de renforcement bien que très efficace présente quelques difficultés de mise en œuvre (Cussin, 1992). En effet, elle nécessite de dimensionner soigneusement les 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. Enfin il faut s'assurer que la précontrainte additionnelle se répartisse dans la structure et surtout dans les zones fissurées.

I.5.4. Réparation par collage de plats métalliques

Le renforcement de structure par plats métalliques, mieux connues sous le nom de procédé l'Hermite, consiste à coller des plats en acier sur les faces tendues de structures en béton armé.

Ce procédé consiste en un apport d'armature extérieure soit pour consolider un élément dont les dégradations mettent en péril la résistance, soit pour remplacer des aciers oubliés (Sharif, 1994) ou mal positionnées. Ainsi, l'Hermitte (l'Hermitte, 1967) s'est intéressé, dès le début des années soixante, à l'utilisation des composé adhésifs de type époxy polymérisant à froid pour associer béton et acier (Luyckx, 1999).



Figure I. 14: renforcement par collage de plats métalliques

En effet, cette technique a été particulièrement étudiée par l'Hermitte et Bresson (Bresson J. 1971) afin d'assurer la réparation et le renforcement de structure en béton armé présentant des insuffisances à la flexion et s'est développée suite à l'apparition sur le marché de colles, en particulier des résines époxy possèdent des caractéristiques d'adhésion élevées, susceptibles de transmettre des efforts non négligeables. D'après Theillout J.N (Theillout J.N 1997), trois problèmes mécaniques se posent lors de l'utilisation de tôles extérieures collées au béton pour le renforcement des structures :

- La mise en flexion locale de la tôle au voisinage des fissures qu'elle recouvre.
- La réparation des efforts entre tôles dans le cas d'un empilement.
- La réparation des déformations entre les aciers internes au béton et les aciers collés extérieurement.

L'acier de renfort est constitué, dans la plupart des cas, de tôle d'acier de nuance E24 d'épaisseur de 3 à 4 mm La colle utilisée est, généralement, une résine époxyde, son épaisseur est de 0.5 à 1mm. Pour que l'adhérence entre l'acier et la colle ait une bonne tenue, les tôles utilisées doivent subir toute leur préparation en usine (découpage, sablage...). La réparation ou le renforcement par les tôles collées est aujourd'hui une technique maîtrisée et parfaitement au point cependant elle présente aussi quelque difficulté :

- Sensibilité de l'acier à l'oxydation (corrosion), nécessitant une protection et entretien quotidien (peinture anticorrosives).
- Impossibilité de mobilisation de toute la résistance en traction des tôles, mêmes sous faible épaisseur.
- Nécessite d'un collage sous pression (vérins), pour assurer une adhésion suffisante et éviter les bulles d'air dans la couche de résine.
- Impossibilité de généraliser cette technique à des surfaces importantes (masse manipulation trop importante), ce qui limite d'autant la possibilité de réparation.

C'est pourquoi la recherche s'est orientée vers les matériaux composites moins lourds, plus performant mécaniquement plus facile à mettre en œuvre et pour lesquels le problème de la corrosion ne se pose pas.

I.6. Renforcement par collage des plats composites

Les enjeux économiques ont été à l'origine de la prise de consciences de l'importance de la maintenance et, ainsi, au développement des techniques de renforcement et/ou réparation. Les techniques traditionnelles ont montré leurs limites au comportement à long terme (oxydation des tôles d'acier, durabilité du béton projeté, etc.). En même temps, la rentabilité d'une opération de maintenance est conditionnée par sa durabilité, et donc par la baisse des fréquences d'intervention. La recherche dans le domaine de renforcement s'est orientée vers l'utilisation de nouveaux matériaux capables de répondre aux différents critères exigés par les opérations de la maintenance des ouvrages.

I.6.1. renforcement des ouvrages en béton armé

La majorité des dommages des structures en béton sont causés par des déficiences au niveau de détails de construction des éléments structuraux. Bien que les causes qui conduisent à un renfort structurel soient aussi nombreuses que le nombre de structures elles-mêmes. Citons par exemple : l'accroissement des charges qui sollicitent la structure, la rénovation des structures anciennes, le changement de la forme de la structure, les dégâts dans la structure, la nécessité d'améliorer les conditions en service. Les travaux de réhabilitation ou de réparation des colonnes ont conduit à la recherche de nouvelles méthodes de renforcement à partir de méthodes connues, telles que l'installation des chemises en acier (*steel jacket*) autour des colonnes en béton. L'intérêt pour des matériaux composites collés offre des avantages évidents. Entre autres, ils permettent une facilité d'installation et une durabilité accrue comparativement à l'enveloppe d'acier conventionnelle (Badour, 2018).

I.6.2. renforcement des structures métalliques

L'utilisation des matériaux composites dans le renforcement des structures métalliques à l'aide de profilés ou plats métalliques est la solution la plus naturelle. Elle peut consister en un remplacement pur et simple d'une partie endommagée ou en l'addition à la partie endommagée d'éléments complémentaires (Belblidia, 2018).

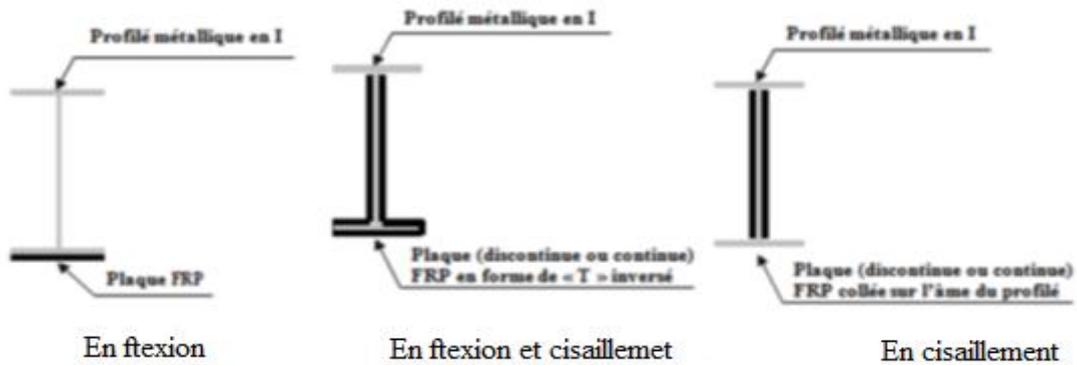


Figure I. 15: Différents schémas de renforcement d'une poutre métallique en I

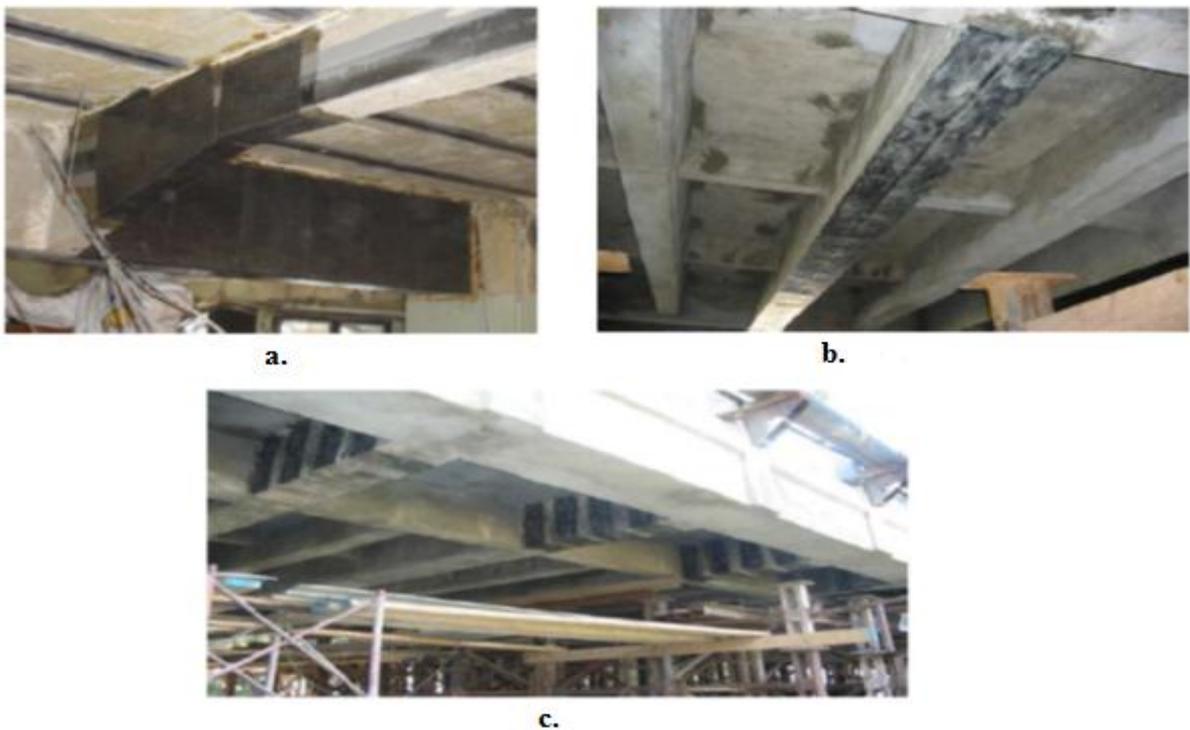


Figure I. 16: Différentes méthodes de renforcement par le collage de plaque en composites. (Réhabilitation du Blanc d'El-Harrach, Alger (photo CTC\Est))

Les matériaux composites utilisés en génie civil sont essentiellement des composites carbone-époxyde ou verre-époxyde. Leurs performances mécaniques spécifiques sont en effet supérieures à celles de l'acier, principalement la résistance à la traction et en compression, Ils

se présentent, généralement, sous la forme de tissus ou de plaques stratifiées préalables fabriquées. Aujourd'hui, plus de vingt ans après, la recherche s'intensifie dans ce domaine, et les applications de ces matériaux dans le génie civil se diversifient. La figure I.15 représente renforcement par collage de composite (**a.** Renfort à l'effort tranchant, **b.** Renforcement en flexion et **c.** Renforcement en cisaillement) [NET 03].

La Figure suivante illustré le système de renforcement [NET 02].

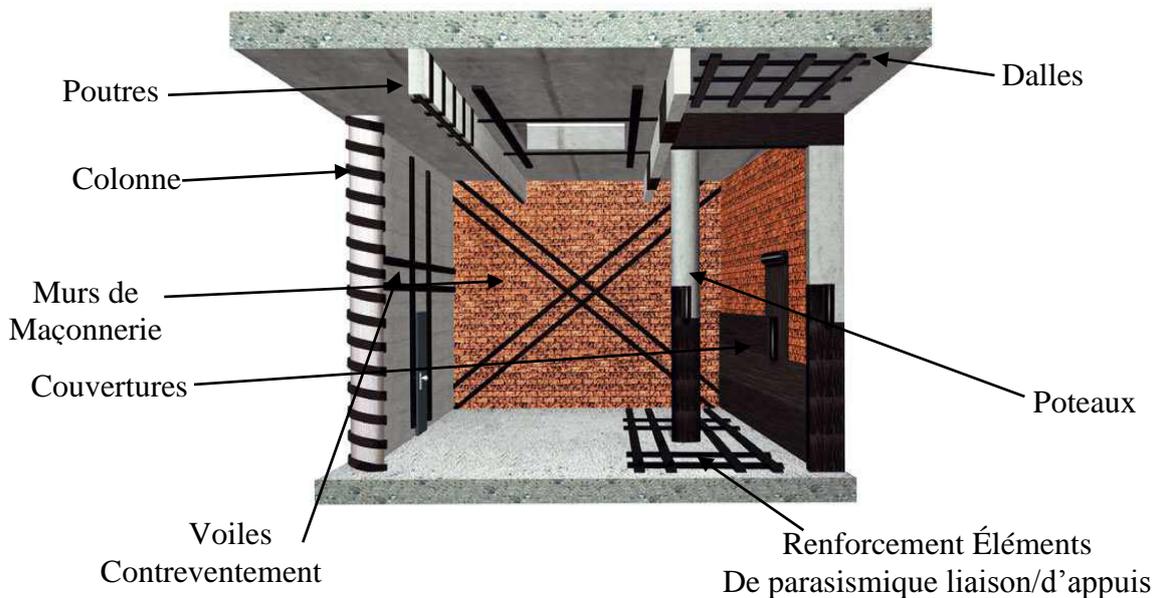


Figure I. 17: systèmes de renforcement Sika® CarboDure®

On a vu les principales méthodes de réparation d'un ouvrage en béton armé, mais n'importe qu'elle méthode est utilisée, le but est de rendre les sections d'acier et de béton initial ou de satisfaire cette condition par l'ajout d'un autre matériau. On cherche à ce que la structure puisse reprendre les charges qui lui sont appliquées et même un supplément de charge si c'est nécessaire pour que l'ouvrage réponde à l'évolution des besoins des propriétaires [NET 02].

I.7. Conclusions

Toutes ces étapes peuvent être nécessaires au confortement d'un ouvrage en béton armé. Afin de mieux les appréhender et de bien les appliquer, j'ai effectué un recueil de fiche décrivant le phénomène et le mode opératoire à suivre. Ceci a été possible en s'appuyant sur les travaux de réfection du bâtiment « la Saline » ainsi que d'autres affaires traitées. Vu que les matériaux composites aient une grande flexibilité en s'adaptant aux formes géométriques les plus complexes des éléments renforcés, et pour leur légèreté par rapport aux aciers, leur facilités de manutention, de transport et de mise en œuvre sur site, ainsi que leurs résistance mécanique assez importante que les autres moyens de renforcements. Ces multiples avantages, mécanique

et physico-chimique permet l'utilisation des matériaux composites comme méthode de renforcement et de réhabilitation des structures en béton armé, l'application de tissus ou lamelles en polymère renforcé en fibre de carbone (PRFC) est une alternative intéressante aux méthodes de réparation conventionnelle. C'est pour cette raison que Le choix de renforcement à l'aide de matériaux composites (Polymère Renforcé en Fibre de Carbone) de l'élément à renforcer dont a fait l'objet de cette étude est jugé favorable.

Chapitre II :
Généralités sur les
matériaux composites.

II.1. Introduction

L'intégration des matériaux composites dans le domaine du génie civil s'est avéré une source de plusieurs nouvelles applications. Les recherches récentes sur les composites ont amené les ingénieurs à s'intéresser à l'utilisation de ces nouveaux matériaux dans le domaine de la construction. Depuis peu, on retrouve des cas pratiques de leur application dans différents ouvrages de génie civil. La première utilisation importante de matériaux composites dans le renforcement des structures remonte à 1991, en Suisse, pour la réhabilitation du pont d'Ibach. Ce pont est constitué d'une poutre caisson alors que des plaques de composites ont été appliquées sur la surface tendue. 6,2 kg de feuilles de composite de 2 mm d'épaisseur et de 150 mm de largeur ont remplacé 175 kg d'acier. Le pont de Kattenbusch, en Allemagne, est aussi constitué de poutres caissons continues sur 11 portées. L'effet des gradients de température a amené une fissuration prématurée au niveau de certains joints. Un renforcement avec des plaques de fibre de verre a été utilisé. L'utilisation des matériaux composites pour la réhabilitation et le renforcement devient une solution préconisant un remplacement tout aussi efficace que l'acier. Compte tenu de ses avantages, Les matériaux composites représentent un très bon investissement en ce qui a trait au renforcement et à la réhabilitation des structures en béton armé. Les seuls inconvénients sont le coût du matériau et le manque de connaissances autant sur son comportement à long terme sur les structures que sur les techniques de conception. Cependant, le coût des matériaux ne représente généralement que 20% du coût total pour une construction conventionnelle. En éliminant les coûts se rattachant à la main-d'œuvre et à l'équipement, les matériaux composites devraient très bien concurrencer les méthodes traditionnelles de réparation. Cependant, les proportions du coût du matériel sur le coût de la main-d'œuvre seraient grandement modifiées.

II.2. Définition des composites

Dans un sens large, le mot " composite " signifie, constitué de deux ou plusieurs parties différentes. En fait l'appellation "matériau composite" ou "composite" est utilisée dans un sens beaucoup plus restrictif, qui sera précisé tout au long de ce travail. Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Des exemples de matériaux composites pris au sens large sont donnés au tableau. Et dans un sens plus précis, un matériau composite utilisé dans la réparation des structures est par définition, toute matière première comportant un renfort sous forme filamenteuse et nécessite l'association intime d'au moins deux composants : le renfort et la

matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser, ce qui introduit la notion d'un agent de liaison. Contrairement aux matériaux classiques dont on connaît à l'avance les caractéristiques mécaniques, celles des composites ne sont réellement connues qu'après fabrication, car on réalise en même temps, le matériau et le produit bien définis.

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

Les matériaux composites structuraux sont principalement constitués de deux phases :

- **Le renfort** : son rôle est d'assurer la fonction mécanique. Il se présente généralement sous la forme des fibres dont l'orientation au sein du composite dépend de la sollicitation mécanique qu'elle doit supporter.
- **La matrice** : son but est de réaliser la liaison entre les renforts, leur protection vis-à-vis des agents agressifs et la prévention contre une rupture catastrophique.

D'une manière générale, les matériaux composites structuraux de par la nature du renfort sont fortement anisotropes, c'est-à-dire que leurs propriétés sont très différentes suivant la direction considérée. D'autre part, les matériaux composite sont légers, c'est-à-dire que les masses volumiques de leurs constituants sont de l'ordre de 1 à 3.5 g / cm³ (Berthelot, 1996).

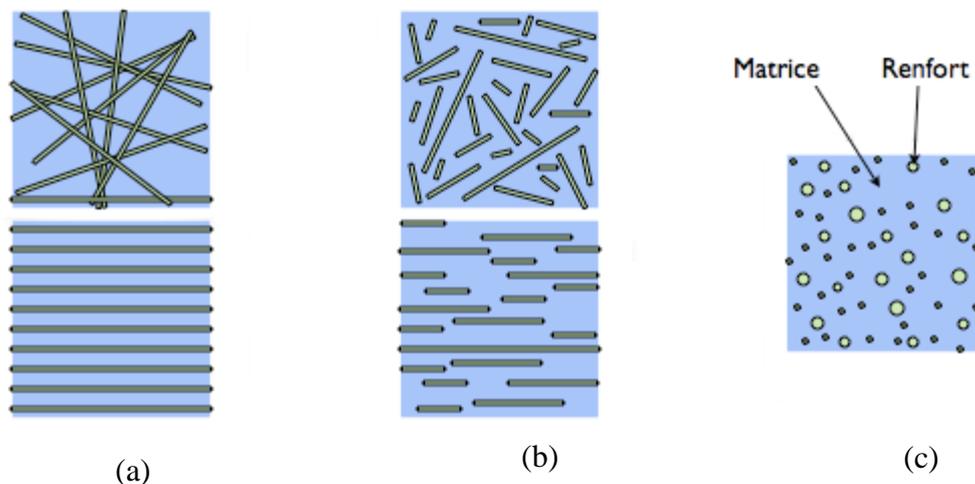


Figure II. 1: Les structures géométriques des composites

(a) fibres longues, (b) fibres courtes, (c) particules.

Tableau II. 1: les différents types de composites.

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

Le principal intérêt de l'utilisation des matériaux composites provient de ses excellentes caractéristiques. Ils disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels :

- légèreté
- grande résistance à la fatigue
- liberté de formes
- maintenance réduite
- faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion (sauf alu carbone)
- insensibles aux produits chimiques sauf les décapants de peinture qui attaquent les résines.
- Une bonne isolation électrique.

Leur faible taux d'utilisation vient de leur coût.

II.3. Type de matériaux composites

On distingue deux types de composites : les composites grandes diffusions et les composites hautes performances.

- Grande diffusion :

Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiel, qui sont : optimisation des coûts par diminution des prix de revient, sa composition de polyester avec des

fibres de verre longues ou courtes (sous forme de mat ou tissu) et la simplicité du principe d'élaboration des matériaux (moulage par contact, SMC et injection).

- **Hautes performances :**

Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine d'aéronautique où le besoin d'une grande performance déduite des hautes valeurs ajoutées. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%.

Ces composites sont élaborés par les procédures suivantes :

- drapage autoclave, enroulement filamentaire, RTM.
- beaucoup de procédés encore manuels.
- CMM, CMC.

II.4. Revue des différents renforts disponibles

Les fibres (renforts) contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet directif (Berreur, 2002).

Les propriétés des composites sont principalement influencées par le choix des fibres (Teng, 2002, Carolin, 2003). Parmi les fibres les plus connues en génie civil, on peut citer : le carbone (haut module élastique et résistances mécaniques importantes à la fatigue), le verre (résistances moyennes, très utilisé pour renforcer les bétons) et l'aramide (de haute résistance à la traction, utilisée en câbles de hautes performances).

Les principales fibres utilisées sont :

- Fibre de Carbone ;
- Fibre de Kevlar ;
- Fibre de Bore ;
- Fibre de Verre.

a. Fibres de carbone :

Les fibres de carbone ont un haut module d'élasticité, de 200 à 800 GPa.

L'allongement ultime est de 0,3 à 2,5 %. Les fibres de carbone n'absorbent pas l'eau et elles résistent à plusieurs solutions chimiques. Elles présentent une résistance excellente à la fatigue, et une faible relaxation comparée à celle des aciers extensibles précontraints. La fibre de carbone est un conducteur électrique et, par conséquent, peut donner la corrosion galvanique si elle est en contact direct avec l'acier. Il faut signaler également le mauvais comportement au choc et à l'abrasion des stratifiés renforcés par des fibres de carbone.

Les fibres de carbone se différencient par le taux de carbone plus ou moins élevé qui modifie les allongements et les contraintes à la rupture et les modules d'élasticité. On trouvera des fibres dites « à haute résistance » HR et des fibres « à haut module » HM ou même « à très haut module » THM, et des fibres intermédiaires (Chatain, 2001)

D'un fabricant à l'autre, les propriétés mécaniques varient suivant les propriétés physiques et mécaniques moyennes. Elles sont données dans le tableau ci - dessous :

Tableau II. 2: Propriétés des fibres de carbone

Propriétés en traction	HR		IM	HM	
	R_t (MPa)	3000 à 5000		4000 à 4500	47000 à 52000
E_{oT} (MPa)	220000 à 240000	235000 à 250000	275000 à 300000	350000 à 400000	450000 à 500000
A_R (%)	1.2 à 1.5	1.6 à 1.8	1.4 à 1.6	0.5 à 0.7	0.3 à 0.5
Masse volumique (g / cm ³)	1.75 à 1.8	1.75 à 1.8	1.7 à 1.8	1.8 à 1.85	1.9 à 1.95

R_t : Résistance à la rupture ;

E_{oT} : Module de Young ;

A_R : l'allongement à la rupture.

Une particularité importante de ces fibres est leur coefficient de dilatation thermique négatif ou quasi nul dans le sens de la fibre, c'est-à-dire que les fibres se raccourcissent quand on les chauffe et s'allongent quand on les refroidit.



Figure II. 2 : Tissue en fibres de carbone.

b. Fibres de Verre :

Les fibres de verre sont moins chères que les fibres de carbone et les fibres d'aramide. Par conséquent, les composites en fibres de verre sont devenus la solution la plus utilisée dans plusieurs applications, tel que le génie civil, l'industrie des bateaux et d'automobiles. Les modules d'élasticité des fibres sont de 70 à 85 GPa avec un allongement ultime de 2 à 5 % selon la qualité. Par contre les fibres de verre peuvent avoir des problèmes de relaxation. Elles sont aussi sensibles à l'humidité, mais avec le choix correct de matrice les fibres sont protégées. Il existe une multitude de fibres de verre dont les propriétés dépendent de leur composition.

Actuellement, trois types de fibres de verre sont commercialisés sous forme de files. Ce sont les variétés E, S et R. Ces deux derniers sont très voisines (l'une est Américaine et l'autre est Française). Les propriétés de ces fibres sont présentées dans le tableau III.3

Tableau II. 3: Propriétés des fibres de Verre

Propriétés en traction	Verre E	Verre R	Verre S
R_T (MPa)	3400	4400	4900
E_{oT} (MPa)	73000	86000	87000
A_R (%)	4.9	5.2	-----
Masse volumique (g / cm ³)	2.54	2.55	2.54



b. Tissu de verre



a. fibre de verre



c. Mat de verre

Figure II. 3: Différents types de fibres de verre

c. Fibre d'Aramide :

Appelés aussi polyamide aromatique, une marque bien connue des fibres d'aramide est « kevlar » mais il existe d'autres marques aussi tel que « Twaron », « Technora », et « SVM ». Les modules d'élasticité de ces fibres sont de 70 à 200 GPa avec une haute énergie de fracture et un allongement ultime de 1,5 à 5 % selon la qualité. Les fibres d'aramide sont sensibles aux températures élevées, à l'humidité et aux radiations « ultraviolet » et par conséquent, ne sont

pas largement utilisées dans les applications de génie civil. Plus loin, les fibres d'aramide ont des problèmes avec la relaxation et la corrosion, mais avec une bonne résistance au choc et à la fatigue (Berreur, 2002).



Figure II. 4 : Tissus de verre, carbone et aramide

d. fibre de bore :

Un filament de tungstène (= 12 µm) 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 u/s. Fibres de haut module et insensibles U l'oxydation U hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse du un substrat en tungstène.

Ont présenté les principaux matériaux de renfort comme suit (Figure)

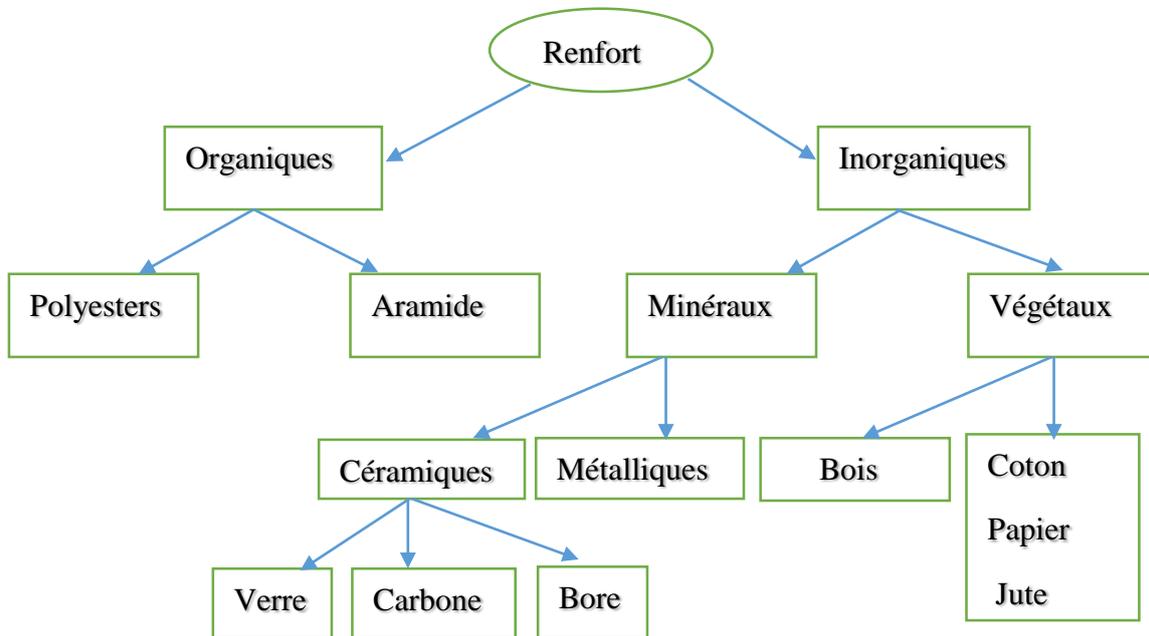


Figure II. 5: Organigramme illustrant les principaux matériaux de renfort

II.5. Notion sur les matrices

La matrice fournit le mécanisme nécessaire au transfert de la charge de part et d'autre des fibres. Elle protège également les fibres des risques d'abrasion et des autres attaques environnementales et chimiques (Foo, 2001). Il existe deux types principaux de matrices :

a. Les matrices organiques :

Un très grand nombre de matériaux plastiques peut être utilisé comme matrice dans les matériaux composites. Elles peuvent aussi bien appartenir à la famille des résines « Thermodurcissables » qu'à celles des résines « thermoplastiques » ces deux grandes familles de résines polymères existent :

- **Résine thermoplastique (TP) :** polymère pouvant être alternativement ramollie 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 transformation est réversible. Actuellement, on distingue deux catégories de matrices :

- Les matrices organiques (résines synthétiques) ;
- Les matrices métalliques.

- **Résines thermodurcissables (TD) :**

Les résines thermodurcissables sont employées comme matrice des matériaux composites structuraux. Comme leur nom le laisse indiquer, ces produits durcissent après un cycle de chauffage appelé « cycle de polymérisation ». A l'issue de celui-ci, le matériau est un solide relativement rigide qui ne fond pas et ne se ramollit pas en température. De ce fait, ils ne peuvent être mis en forme qu'une seule fois et ceci avant qu'ils ne durcissent, donc avant l'accomplissement du cycle de polymérisation. Les résines thermodurcissables les plus répandues sont les polyesters, les époxydes, les polyamides et les phénoliques. Le tableau III-4 présente les propriétés physiques et mécaniques de ces résines après polymérisation. (Berthelot, 1996).

Tableau II. 4: Propriétés des Résines thermodurcissables

Propriétés en traction	Polyester	Epoxyde	Polyamide	Phénolique	Silicone
EoT (MPa)	30 à 90	30 à 100	Environ 90	20 à 60	20 à 60
A_R (%)	2000 à 3000	2500 à 4000	Environ 3000	1000 à 5000	Environ 3000
Densité (g / cm ³)	1.1 à 1.3	1.1 à 1.3	Environ 1.3	1.2 à 1.4	1 à 1.1

b. Les matrices métalliques :

L'utilisation de matériaux composites à des températures supérieures à 3000 °C interdit pratiquement l'usage des matrices organiques et suppose donc que l'élément de renforcement soit noyé au sein d'une matrice métallique. Les plus employées sont les métaux légers et leurs alliages en particulier l'aluminium, le titane et le nickel (Berreur, 2002).

Les différentes familles de matrice sont résumées dans le schéma de la Figure II.6.

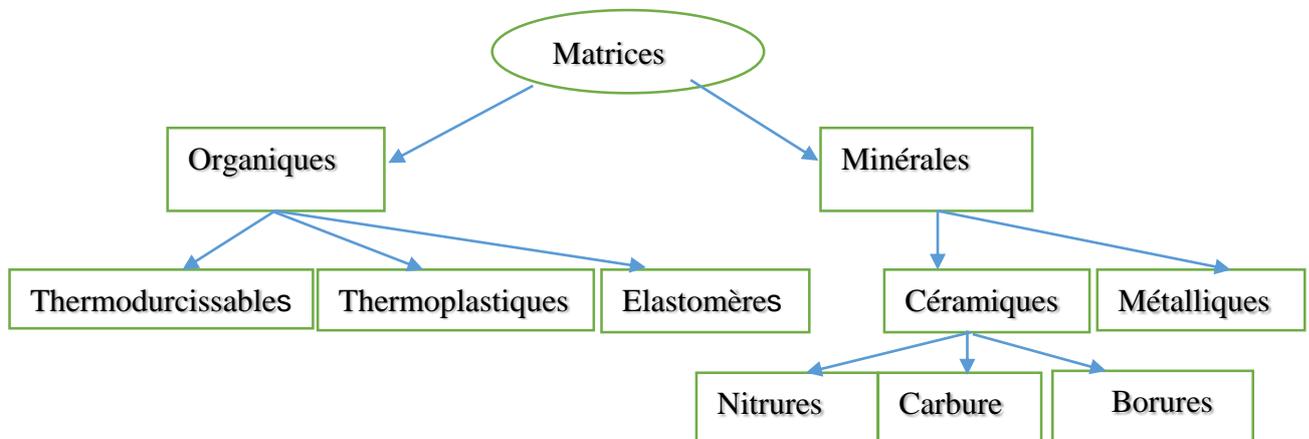


Figure II. 6: Organigramme illustrant les différentes familles de matrice

II.6. Classification des composites

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés suivant des composites à matrices organiques, à matrice métallique ou à matrice minérale. Parmi ces composites, on peut citer :

- a. Composites à matrice organique (résine), avec :
 - des fibres minérales : verre, carbones, etc.
 - des fibres organiques : kevlar, polyamides, etc.

- des fibres métalliques : bore, aluminium, etc.
- b. Composites à matrices métallique (alliages légers et ultralégers d'aluminium, de magnésium, de titane), avec :
 - des fibres minérales : carbones, carbure de silicium (SiC).
 - des fibres métalliques : bore,
 - des fibres métallo-minérales : fibres de bore revêtues de carbure de silicium.
- c. Composites à matrice minérale (céramique), avec :
 - des fibres métalliques : bore,
 - des particules métalliques : cermets,
 - des particules minérales : carbures, nitrures, etc (Foo, 2001).

II.7. Avantages et inconvénients des matériaux composites

Avantages : Les matériaux composites présentent des avantages tels que :

- Résistance mécanique : pour une même section d'acier, la résistance des fibres de composites est plus élevée ;
- Poids : la densité des matériaux composites représente 20% de celle des platines d'acier ; pour une même résistance ultime le poids de PRF (Polymère Renforcé en Fibre) est inférieure de 10% au poids des platines d'aciers.
- Maniabilité : les bandes des matériaux composites présentent une large flexibilité qui facilite la mise en œuvre et son application dans les zones confinées.
- 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
- Le 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'aciers.
- 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'aciers 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 plates de précontrainte des composites est appliquée afin de compenser la perte de tension dans l'élément structurel et réduire ainsi les fissures.

Inconvénients

- Vieillesse sous l'action de l'eau et de la température.
- Attention aux décapants de peinture qui attaquent les résines époxydes.
- Tenue à l'impact moyenne par rapport aux métalliques.
- Meilleure tenue au feu que les alliages mais émission de fumées parfois toxiques pour certaines matrices.
- Coût parfois prohibitifs, le gain en coût est surtout valable pour des grandes séries.

II.8. Domaines d'application des matériaux composites

Les excellentes performances mécaniques des matériaux composites fibres résine en terme de caractéristiques spécifiques en font des matériaux attrayants pour l'utilisation dans les structures. En outre, l'intérêt de ces matériaux réside dans leur anisotropie aisément contrôlable par le concepteur qui peut ainsi ajuster la rigidité et la résistance en fonction des sollicitations extérieures. Ainsi l'immense avantage des matériaux composites est de pouvoir être optimisé pour chaque application : on peut placer le renfort exactement où il est nécessaire. Cette optimisation résulte en une grande performance de ces matériaux, qui sont souvent de loin les plus légers pour une résistance mécanique spécifiée. Cependant ils restent très chers à fabriquer ! D'où leurs domaines d'application ?

L'éventail des applications des matériaux composites est très large :

- Electricité et électroniques : isolants, supports de disjonctions et de circuits imprimés...
- Bâtiments et travaux publics : habitation, cheminées d'usine, piscines, coffrages, cloisons, portes, sanitaires...
- Transports routiers : pièces de carrosseries, roues, calandres, ressorts de suspension, sièges...

- Transports ferroviaires : voitures, avant de motrices, gaines de ventilation...
- Transports maritimes : hovercrafts, vedettes, voiliers de compétition...
- Transports aériens : avion de tourisme, pièces d'avion : bords d'attaque, volets, dérives, pales d'hélicoptères, disques de freines d'avion...
- Transport spatial : corps de propulseurs, réservoirs...
- Mécanique générale et divers : bras de robots manipulateurs, corps de vérins, tuyauteries, bouteilles de gaz sous pression.

Ainsi on note que les matériaux composites sont surtout utilisés pour des applications où une haute performance est recherchée et où le prix n'est pas le facteur primordial (Calgaro, 1999).

II.9. Application des composites dans le génie civil

Composite dans le bâtiment : Les performances recherchées dans ce domaine sont :

- Mécanique :** L'amélioration des qualités des mortiers et béton de ciment par l'adjonction de fibres divers, a donné le béton armé et précontraint, l'amiante, ciment et le béton plaqué etc. Le renforcement n'est efficace que si certaines conditions de déformabilité relative permettent de transmettre aux fibres des efforts en rapports avec leur résistance, les conditions thermiques extrêmes, doivent être compatibles avec les coefficients de dilatation, modules d'élasticité et résistances mécaniques des matériaux associés. L'amélioration de la résistance du béton à l'usure peut être obtenue par des revêtements superficiels de plastique chargés ou l'adjonction de poudres très dures (carborundum) au béton.
- Amélioration de la sécurité :** La rupture d'un produit utilisé dans le bâtiment peut ou non être dangereuse. Il est souvent nécessaire pour diverses raisons, que la mise hors service d'un élément de structures ne se traduit pas par la chute de pièces ou de morceaux dangereux. Dans cette classe, on peut trouver les verres armés, les vitrages de sécurité, divers produits verriers destinés aux alliages de fenêtres.
- Amélioration de certaines propriétés physique :** Dans cette catégorie, on trouve les associations de matériaux capables de remplir une fonction déterminée. Par exemple, le panneau d'alliage qui est imperméable à l'eau et à l'air, il a un coefficient de transmission thermique K donné, une bonne résistance mécanique aux efforts statiques et aux chocs ainsi qu'un aspect décoratif, tant pour la face intérieure que pour la face extérieure. Il a aussi une bonne résistance aux agents agressifs extérieurs et une bonne tenue au gel et aux efforts de l'insolation.

- d. Recherche d'effet décoratif* : La recherche de couleurs, de forme, d'états de surfaces particulières, peut conduire à des associations particulières de matériaux, tels qu'enduis plastiques, contre collage de matériaux divers, marbres et pierre reconstituées.

II.10. Conclusion

D'une manière générale, les matériaux composites augmentent considérablement la résistance et la ductilité des éléments structuraux en béton armé. Ils sont des matériaux très variés, disponibles partout, dans la nature. Cette diversité mérite d'effectuer des investigations dans le choix des constituants (la matrice, le renfort, les charges et les additifs) afin d'avoir les meilleurs qualités qui dépendent :

- Des propriétés des matériaux constituants
- Des distributions géométriques des constituants.
- De l'interaction entre les différents constituants, etc.

Le choix de ces matières, la technique et le procédé de fabrication à une influence directe sur l'architecture et le comportement mécanique du matériau. Vu les performances du tissu composite en fibres de verre, sa disponibilité sur le marché Algérien, son cout mois prohibitif par rapport aux autres fibres, nous avons opté pour son utilisation pour la réparation et le du renforcement des corps d'épreuves en béton armé.

Chapitre III :
Comportement mécanique
des voiles renforcés par
composites

III.1. Introduction

Les murs en béton armé font généralement partie intégrante de la structure primaire résistante des bâtiments. Plusieurs études ont mis en évidence leur importance dans la limitation des dommages issus des séismes. En effet, ils permettent de dissiper l'énergie sismique. Les principales causes de dommages peuvent être l'apparition d'une activité sismique plus forte que prévue, une mauvaise conception ou encore des défauts de construction. La réponse d'un mur en béton armé dépend dans une large mesure du rapport entre sa hauteur et sa largeur. Les murs dont le rapport est inférieur à 2 sont considérés comme étant des voiles courts, dans le cas contraire ils sont considérés comme élancés. Les murs courts peuvent supporter de fortes contraintes de cisaillement. Les modes de défaillance peuvent être un glissement à la liaison avec la fondation ou encore une fissure diagonale de cisaillement dans le plan du mur. L'objectif de ce chapitre est de définir le comportement mécanique des voiles en béton armé sous sollicitations Il est désigné par murs ou voiles en béton , des parties d'ouvrages verticales supportant principalement des charges verticales et résistant aux charges horizontales .Elles peuvent être préfabriquées ou coulées directement à leur élément définitif dans la construction. Le mur en béton peut être considéré comme un élément voile lorsque son épaisseur « a » est au moins égale à 4 fois la longueur.

III.2. Définition

Il est désigné par murs ou voiles en béton, des parties d'ouvrages verticales supportant principalement des charges verticales et résistant aux charges horizontales. Elles peuvent être préfabriquées ou coulées directement à leur emplacement définitif dans la construction. Le mur en béton peut être considéré comme un élément voile lorsque son épaisseur « a » est au moins égale à 4 fois la longueur « l » (RPA, 2003).

III.3. Les principales caractéristiques du comportement des voiles

Les principaux paramètres influents sur le comportement des voiles en béton armé sont :(Davidovici, 2003).

- L'élancement qui est le rapport de la hauteur sur la largeur du voile : h/L ,
- Les caractéristiques géométriques des éléments (sections rectangulaires, en U ou en I),
- La disposition et le pourcentage des armateurs,
- L'intensité de l'effort normal,
- Type du chargement : chargement statique, statique monotone, statique cyclique alterné, et chargement dynamique.

Les refends ou voiles en béton armé peuvent être subdivisés en trois catégories du point de vue comportement mécanique qui dépendant principalement du rapport géométrique de la hauteur sur la largeur (h/L) :

- Voiles élancés : $h/l > 1.5$
- Voiles courts : $h/l \leq 1.5$
- Voiles moyennement élancé : $1.5 < h/l \leq 1.5$

III.4. Revue bibliographique des murs voiles

Les voiles sont des éléments en béton armé, ayant deux dimensions grandes par rapport à la troisième appelée épaisseur, généralement verticaux et chargés dans leur plan. Ils sont chargés de :

- reprendre les charges permanentes et d'exploitation apportées par les planchers ;
- participer au contreventement de la construction (vent et séisme) ;
- assurer une isolation acoustique entre deux locaux et une protection incendie ;
- servir de cloisons de séparation.

Les voiles peuvent être utilisés en façade (en pignon), ou à l'intérieur (murs de refend) des constructions. Les murs voiles pleins ou comportant des ouvertures comportent un minimum d'armatures :

- Au droit des ouvertures (concentration de contraintes) ;
- A leur jonction avec les planchers et
- A leurs extrémités.

Remarque : des voiles en acier ont été très rarement utilisés pour des contreventements de structures métalliques (steel shear walls) pour des bâtiments de grande hauteur aux Etats-Unis, à la place des traditionnelles diagonales.

III.5. Le rôle des voiles en béton armé

Les voiles jouent un rôle primordial dans le comportement global des structures :

- Augmentent la rigidité de l'ouvrage ;
- Diminuent les dommages des éléments non porteurs dont le coût de réparation est souvent le plus grand de celui des éléments porteurs ;
- Apaisent les conséquences psychologiques sur les habitants de hauts bâtiments dont les déplacements horizontaux sont importants lors des séismes ;
- Diminuent aussi l'influence des éléments non porteurs sur le comportement de la structure.

III.6. Types de structures contreventées par voiles en béton armé

Les voiles ou murs de contreventement peuvent être généralement définis comme des éléments verticaux à deux dimensions dont la raideur hors plan est négligeable. Dans leur plan, ils présentent 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. A cet égard, on peut rencontrer les catégories suivantes :

- Structures mixtes avec des voiles associés à des portiques (Figure III-1.a) ;
- Structures à noyau central (Figure III-1.b) ;
- Structures uniquement à voiles en béton armé (Figure III-1.c).

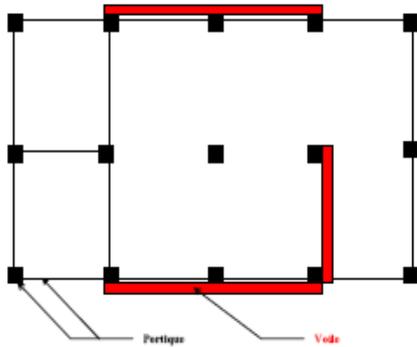


Figure III.1.a : Structures mixtes avec des voiles couplés à des portiques

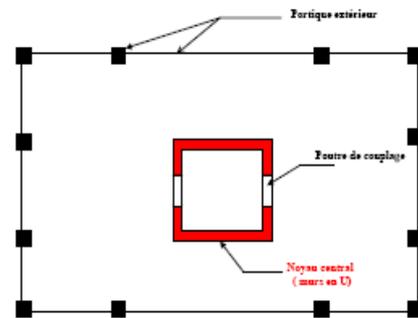


Figure III.1.b : Structures à noyau central

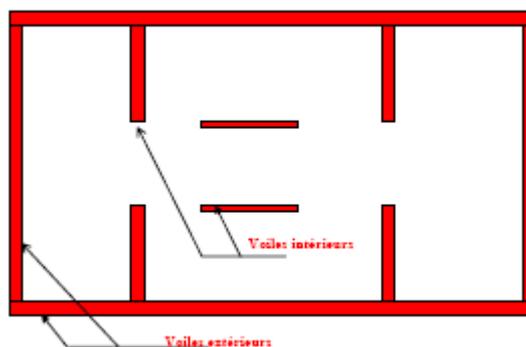


Figure III.1. c : Structures uniquement à voiles

Figure III. 1: Catégories des murs voiles

III.7. Comportement des voiles en béton armé

Sous l'action sismique, des parties plus ou moins importantes de l'extrémité du voile en béton armé, sollicité en compression, peuvent se trouver dans le domaine inélastique, cette situation peut être à l'origine d'une instabilité latérale.

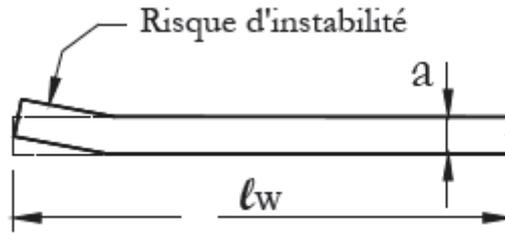


Figure III. 2 : Instabilité latérale des voiles en béton armé

- Déformation d'un voile indépendant

Compte tenu de cette éventualité, les règlements parasismiques imposent une épaisseur minimale de l'âme à 15 cm. De Plus, et à partir d'un certain niveau de contraintes, il y a lieu de prévoir aux extrémités de ces voiles des renforts conçus comme des poteaux, ou des voiles en retour. Le modèle le plus simple d'un voile est celui d'une console encastrée à sa base, soumise à un effort normal, un effort tranchant et un moment de flexion qui est maximal dans la section d'encastrement.

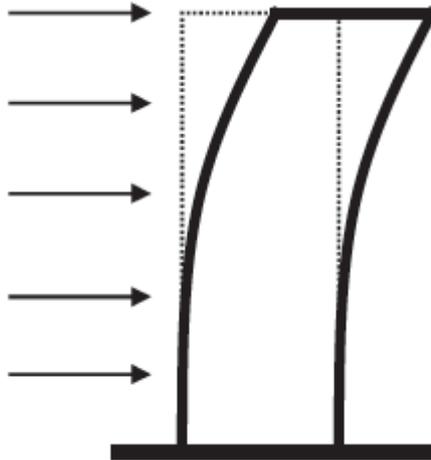


Figure III. 3: Le comportement du voile est similaire à celui d'une console.

- Déformation des voiles dans une structure :

Dans un premier temps, les voiles, plus rigides, reprennent presque la totalité des charges sismiques et les déformations restent faibles. Avec l'apparition de zones plastifiées sur les voiles, un report de charges se fait sur les portiques dont la ductilité permet une dissipation

d''énergie importante. La période propre du système s'allonge permettant la sortie du système d'une éventuelle résonance avec le sol. La figure suivante montre la déformation des voiles dans une structure :

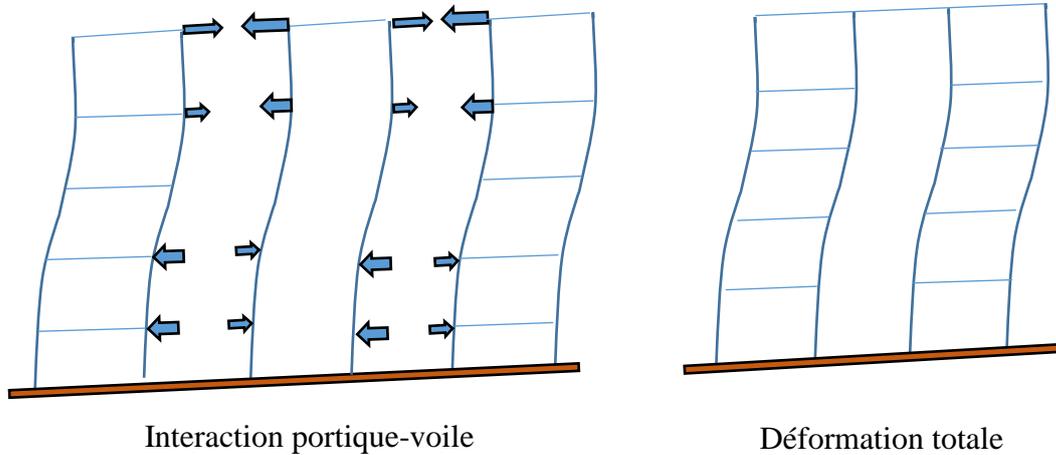


Figure III. 4: déformation des voiles dans une structure

Selon les règlements parasismiques, il convient que les armatures verticales nécessaires pour la vérification de la résistance à l'E.L.U, en flexion composée soient concentrées dans les éléments de rives, aux 02 extrémités de la section transversale du voile ou du trumeau.

A la base du voile sur une hauteur critique, des cadres sont disposés autour de ces armatures afin d'assurer la ductilité de ces zones. Les armatures de l'âme horizontales et verticales assurent la résistance à l'effort tranchant.

III.8. Objectif de la vérification de voile en béton armé

Le voile en béton armé doit faire l'objet des vérifications suivantes

- Justification de la stabilité de forme (résistance au flambement) ;
- Résistance à l'effort tranchant ;
- Résistance en flexion composée ;

III.9. Modes de rupture des voiles

III.9.1. Modes de rupture des voiles élancés

1. Ruptures en flexion :

- a. *Mode f1* : Rupture par plastification des armatures verticales tendues et écrasement du béton comprimé. C'est le schéma de ruine le plus satisfaisant correspondant à la formation d'une rotule plastique dans la partie inférieure du voile avec une importante

dissipation d'énergie. On observe ce mode de ruine dans les voiles très élancés, soumis à un effort normal de compression faible et à un cisaillement modéré (Figure III.5.a).

- b. Mode f_2** : Rupture par écrasement du béton. Ce mode de ruine se rencontre pour les voiles assez fortement armés soumise à un effort normal important. Le mode f_2 est moins ductile que le mode f_1 , surtout dans le cas d'une section rectangulaire (Figure III.5.a).
- c. Mode f_3** : Rupture fragile par ruptures des armatures verticales tendues. C'est un mode de rupture qui se rencontre dans les voiles faiblement armés, lorsque les armatures verticales sont uniformément réparties et non concentrées aux extrémités. La ductilité et la capacité d'absorption d'énergie peuvent être améliorées en concentrant les armatures verticales aux extrémités (Figure III.5.a).

2. Ruptures en flexion – effort tranchant :

a. Mode f/t : Rupture par plastification des armatures verticales de flexion et des armatures transversales. C'est ce qui se produit dans les voiles moyennement élancés où la flexion n'est plus prépondérante et où les armatures horizontales sont insuffisantes (Figure III.5.a).

3. Rupture par effort tranchant :

a. Mode t : Rupture des bielles de compression développées dans l'âme du voile. On l'observe dans les voiles munis de raidisseurs, fortement armés longitudinalement et transversalement et soumis à des cisaillements élevés (Figure III.5.b).

b. Mode g : Rupture par glissement au niveau des reprises de bétonnage. Ce mode de rupture, qui est plutôt caractéristique aux voiles courts, a été observé dans les cas des voiles moyennement élancés. Ce type de rupture peut apparaître lorsque les armatures verticales réparties sont insuffisantes, la qualité des reprises de bétonnage est mauvaise et la valeur de l'effort normal est faible (Figure III.5.b) (Four, 1985).

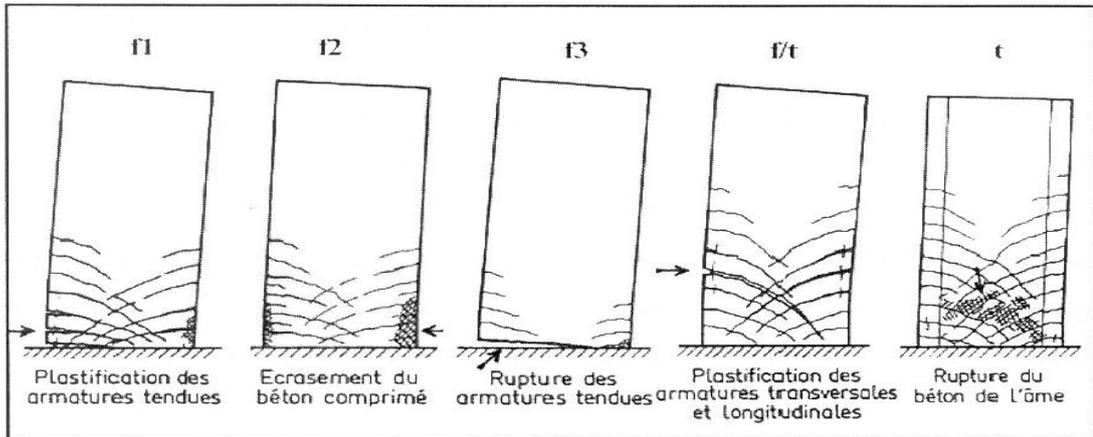


Figure III.5.a : Rupture en flexion –effort tranchant

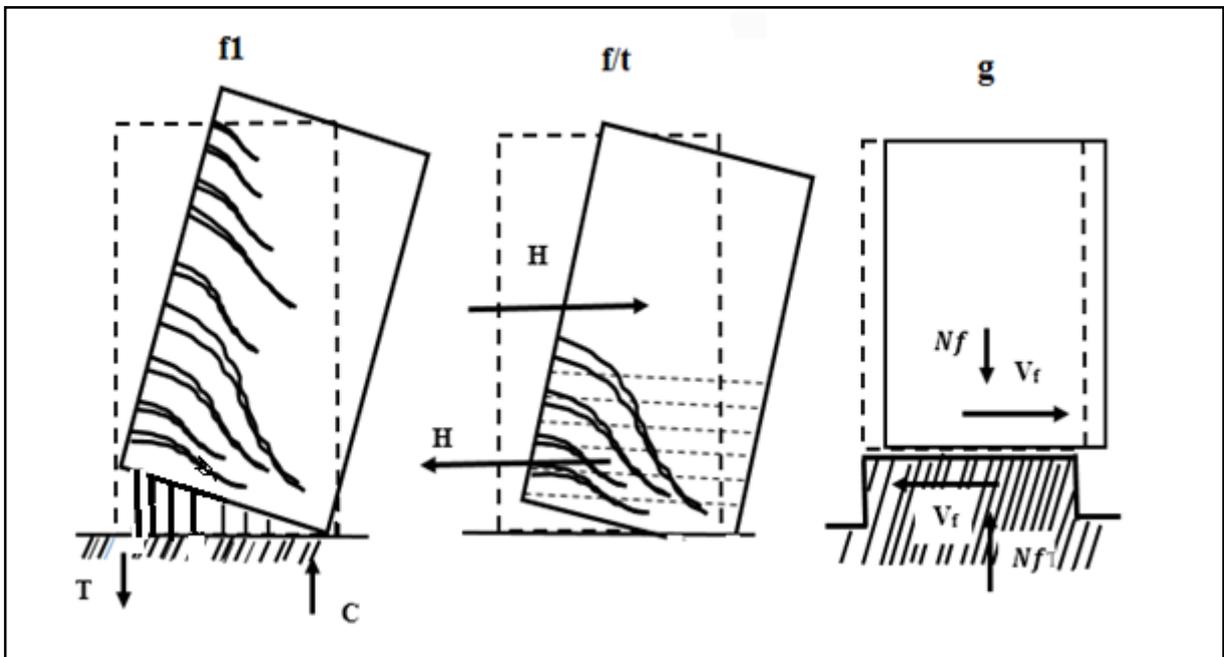


Figure III.5.b : Rupture par effort tranchant

Figure III. 5 : Modes de rupture des voiles élancés

III.9.2. Mode de rupture des voiles courts

Dans ce cas, l'effort tranchant est généralement prépondérant que la flexion. Les principaux modes de rupture sont ceux de la figure III.6. On distingue trois cas : (Paulay, 1992)

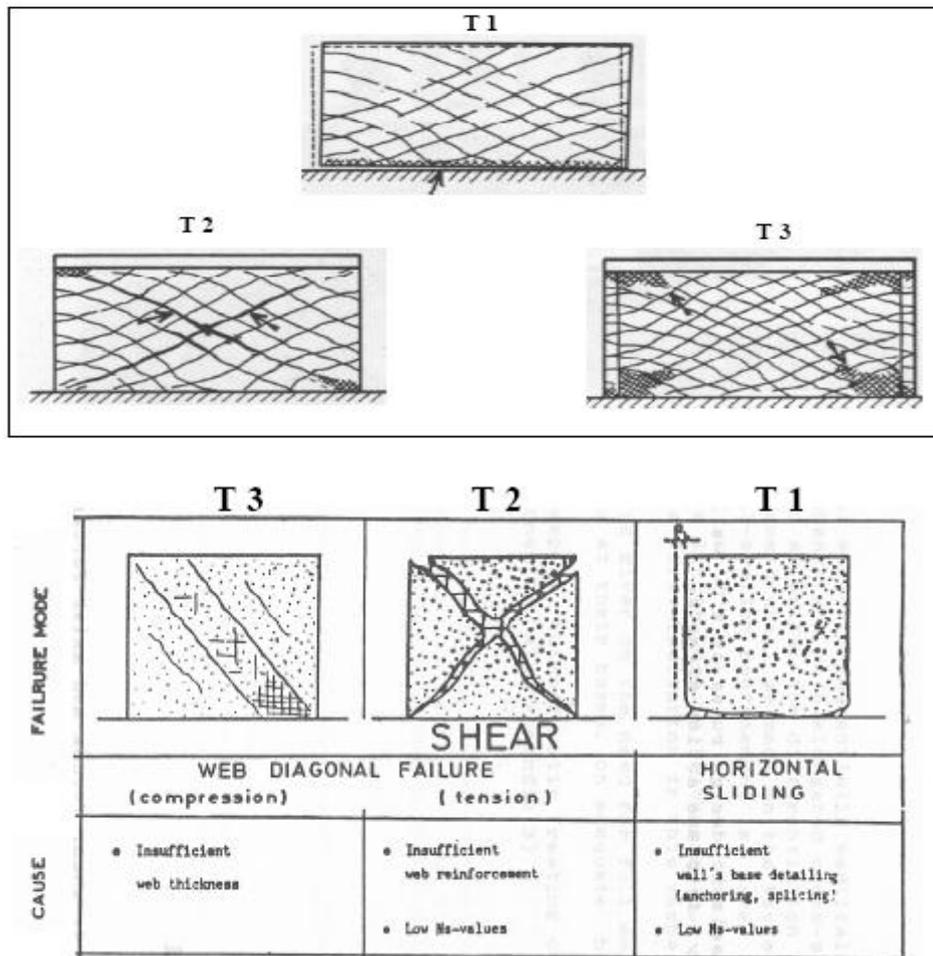


Figure III. 6 : Modes de rupture des voiles courts

a. Mode T1 : Rupture par glissement « sliding shear » à l'encastrement. Ce mode de rupture, conséquence de la plastification progressive des armatures verticales, est accompagné d'importants glissements qui réduisent d'une façon significative la raideur et la dissipation hystérétique. Ce type de rupture peut être aussi obtenu lorsque les armatures verticales réparties sont insuffisantes (Figure III.6).

b. Mode T2 : Rupture diagonale « diagonal tension failure » avec plastification ou rupture des armatures le long des fissures diagonales. Ce mode est rencontré dans les voiles moyennement armés, sollicité par un faible effort normal (Figure III.6).

c. Mode T3 : Rupture par écrasement « diagonal compression failure » du béton de l'âme, à la base des bielles transmettant les efforts de compression. C'est un mode de ruine caractéristique des voiles fortement armés, surtout s'ils sont associés à des raidisseurs sur leur bord (Figure III.6).

III.10. Renforcement des murs voiles

III.10.1. Introduction

Afin de protéger les murs voiles des dommages éventuels lors d'un chargement dynamique, de nombreux modèles étaient conçus afin de minimiser l'effet d'endommagement non attendu de ces murs ou même surmonter ces obstacles et lacunes.

Parmi les techniques utilisées actuellement pour assurer le renforcement des murs voiles, afin de prévoir d'éventuels désordres, on peut citer :

- Renforcement par placage en acier ;
- Le mécanisme d'absorption d'énergie ;
- Renforcement par les matériaux composites (présente étude).

III.10.2. Renforcement par placage en acier

Le mur voile peut être renforcé horizontalement ou verticalement dans les 02 directions

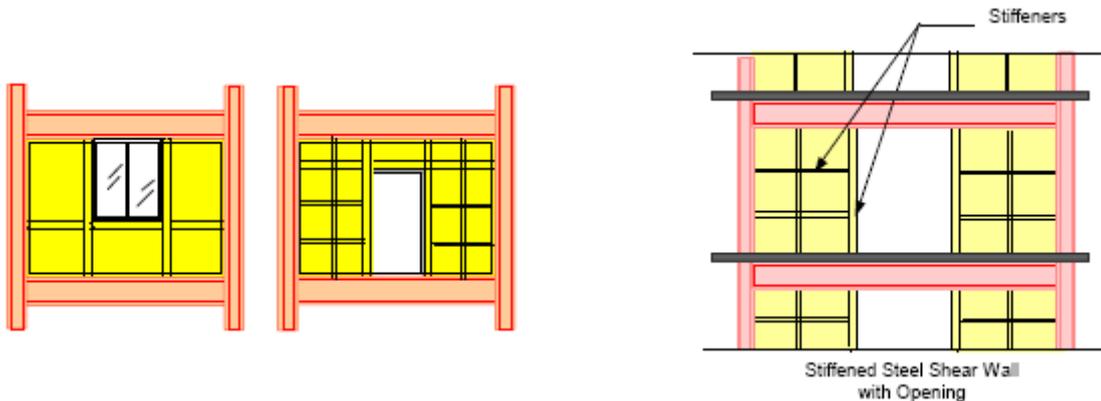


Figure III. 7: Renforcement par plaques en acier

III.10.3. Le mécanisme d'absorption d'énergie

1. Description du modèle :

L'utilisation d'un mécanisme d'absorption d'énergie (isolation mécanique) est trop efficace mais coûteuse à la fois. Ce dernier est capable d'absorber les efforts engendrés par une excitation sismique. Il est à base d'un fluide visqueux ou même à gaz, doté d'un coefficient d'amortissement défini par le constructeur (C_0).

2. Description du modèle amorti :

Le mécanisme d'amortissement est placé soit au niveau des ouvertures contenues dans le voile soit au niveau du trumeau. Toutefois, il existe plusieurs configurations d'emplacements :

- a. *Position en V de l'amortisseur* : Le système est configuré en position de V défini comme suit :

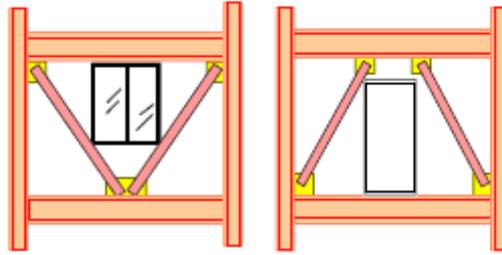


Figure III. 8 : Position en V de l'amortisseur

- b. *Position diagonale de l'amortisseur* : Le système est placé sur la diagonale, comme il est illustré sur la figure III.9 :

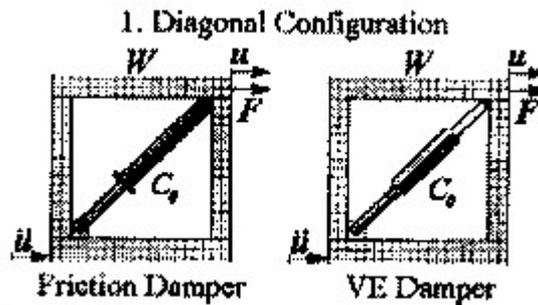


Figure III. 9 : Position diagonale de l'amortisseur

- c. *Position horizontale de l'amortisseur* : L'amortisseur est placé horizontalement. (Voir figure III.10)

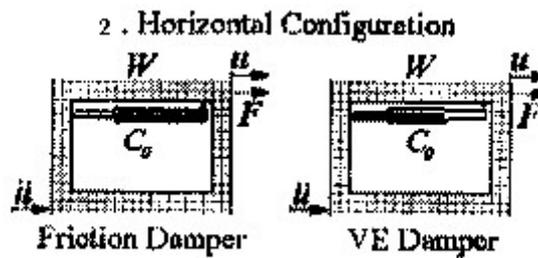


Figure III. 10: Position horizontale de l'amortisseur

- d. *Position hybride* : Ce modèle combine les deux modèles su cités, (voir figure III.11).

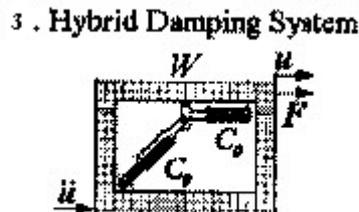


Figure III. 11 : Système d'amortissement hybride

3. Détail d'un amortisseur placé en diagonale

Dans ce qui suit (figure III.12), on donne aperçu sur la structure d'un amortisseur placé sur la diagonale : (Kelly, 1972).

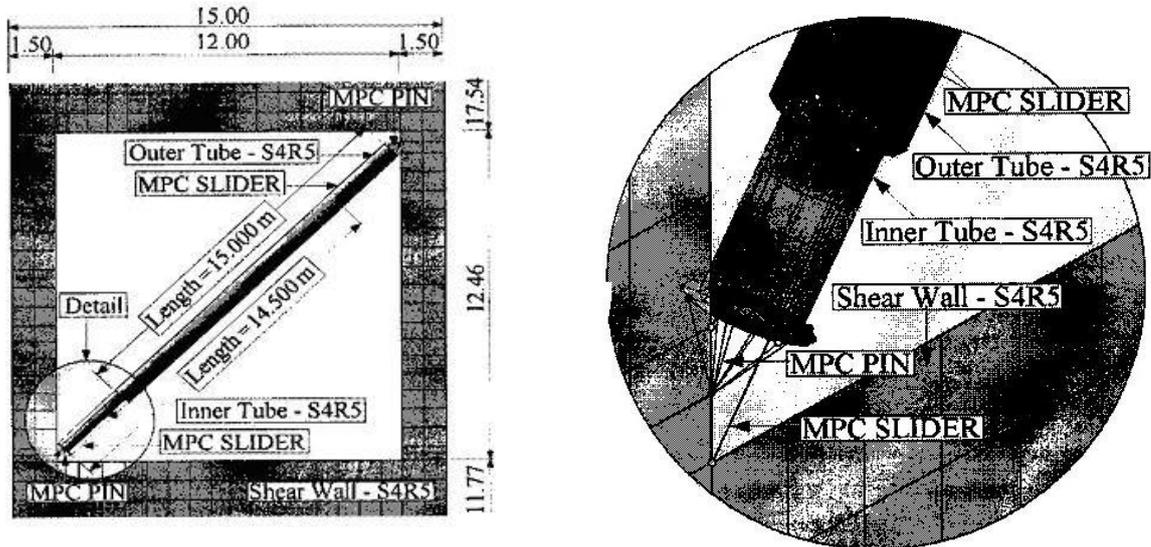


Figure III. 12 : Détails de la structure d'un amortisseur

4. Perspectives d'emplacement des mécanismes d'amortissement :

Dans ce qui suit, on expose les divers emplacements des amortisseurs au sein de la structure comportant des ouvertures, conservant la position diagonale du système dissipatif d'énergie.

- Modèle amorti à la base (figure III.13.a)
- Modèle amorti au centre (figure III.13.b)
- Modèle amorti au sommet (figure III.13.c)
- Modèle multi amortis (figure III.13.d)

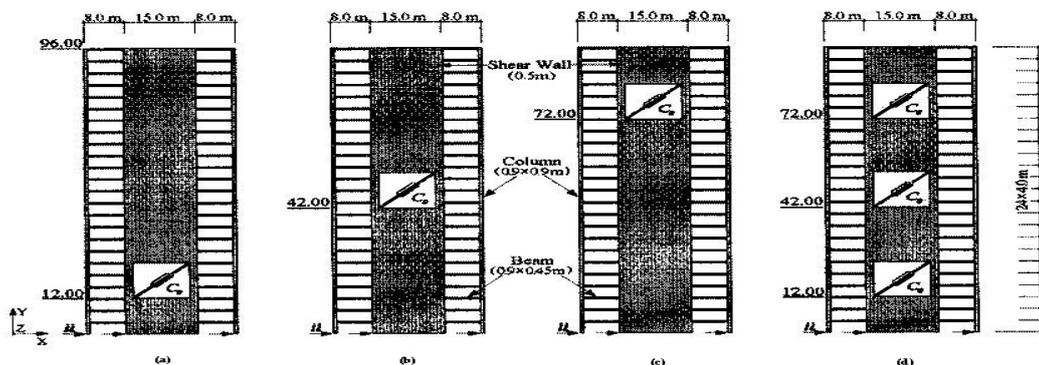


Figure III. 13: Choix d'emplacement des mécanismes d'amortissement Position diagonale

Après analyse des structures précédentes, il s'est avéré que celle dotée d'un amortisseur à la base possède les meilleures performances (déplacements et fréquences naturelles).

5. Inconvénients du modèle :

L'inconvénient du présent modèle réside dans sa difficulté d'emplacement, ce qui nécessite un perçage au niveau du mur en refend (créer une ouverture pour installer le dispositif), provoquant, éventuellement, l'évacuation des habitants pour l'exécution des travaux.

III.11. Renforcement par les matériaux composites

III.11.1. Renforcement des murs voiles par des plaques en composite comportant de différentes fractions volumiques

Usuellement, dans un stratifié ou élément en composite, les fibres sont incorporées dans une matrice avec le respect d'un certain nombre de condition (espacement régulier des fibres,...etc.). Cependant, en faisant varier cet espacement, en augmentant ou en diminuant leur densité dans la région de l'élément étudié, peut-on affecter une ou certaines propriétés du matériau ?

En effet, il existe des centaines de travaux publiés dans ce sens, les plus réputés sont cités ultérieurement. En agissant sur l'espacement des fibres dans le composite, l'analyse est plus complexe en la comparant à celle des fibres espacées uniformément, ce qui conduit à juger que le matériau résultant va être non homogène à l'échelle macroscopique, menant à des équations différentielles comportant des coefficients variables.

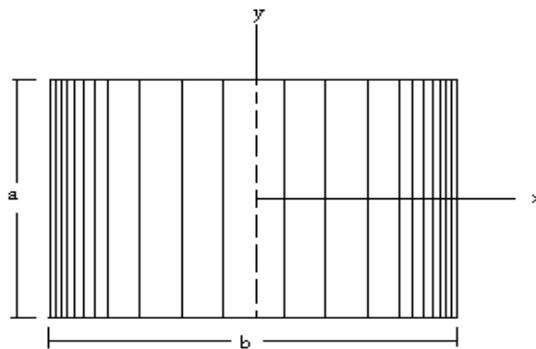


Figure III. 14 : Schéma d'une plaque en composite (Patch en composite)

III.11.2. Schéma illustrant la position des plaques composites (Patches en composite)

Dans les schémas ci-dessous (figure III-11), on montre une perspective sur l'emplacement des patches en composite sur les deux faces du mur refend.

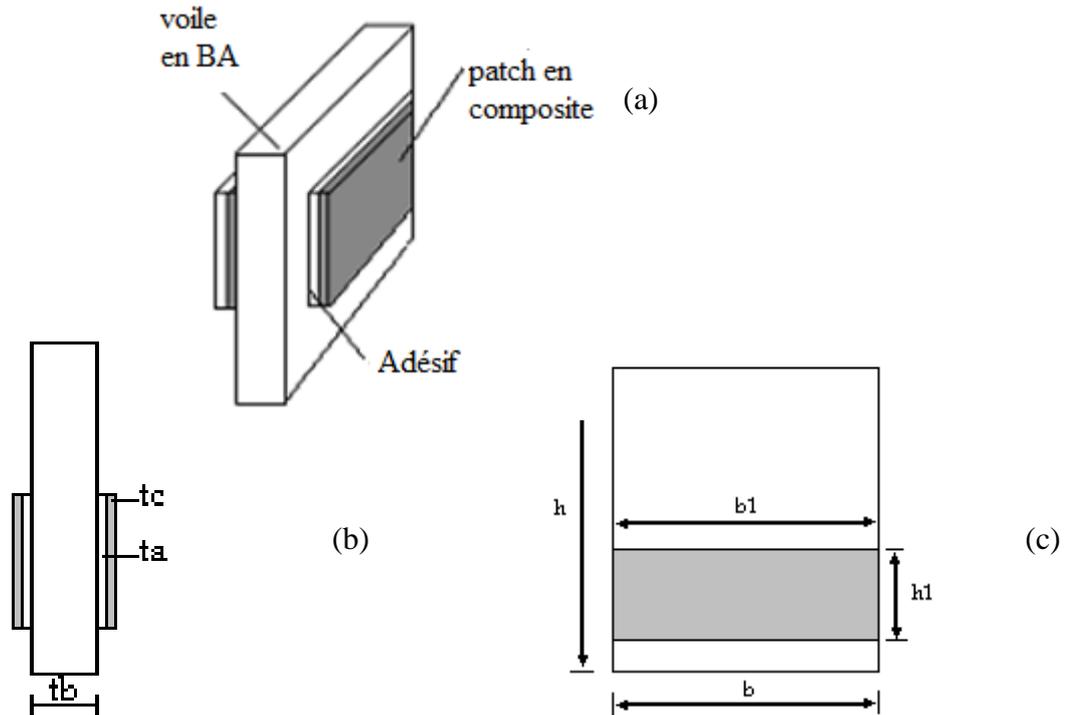


Figure III. 15: Perspective d'emplacement des plaques composites

(a) Emplacement des patches, (b) Vue de face, (c) Vue latérale

III.12. Principe de calcul des voiles en béton armé

Le calcul d'un voile ou trumeau est effectué en flexion composée, il convient que les armatures verticales nécessaires pour la vérification de la résistance sous la combinaison sismique la plus défavorable, soient concentrées dans les éléments de rive, aux 02 extrémités de la section transversale du voile. Les résistances à la flexion sont calculées de façon classique, en utilisant la valeur de l'effort normal et le moment fléchissant, résultant de l'analyse dans la situation sismique de calcul. Elles visent à éviter les modes de ruine par cisaillement. Le mode rupture par plastification des armatures verticales tendues et écrasement du béton comprimé est le schéma de ruine le plus satisfaisant qui correspond à la formation d'une rotule plastique dans la partie inférieure de voile avec une importante dissipation d'énergie.

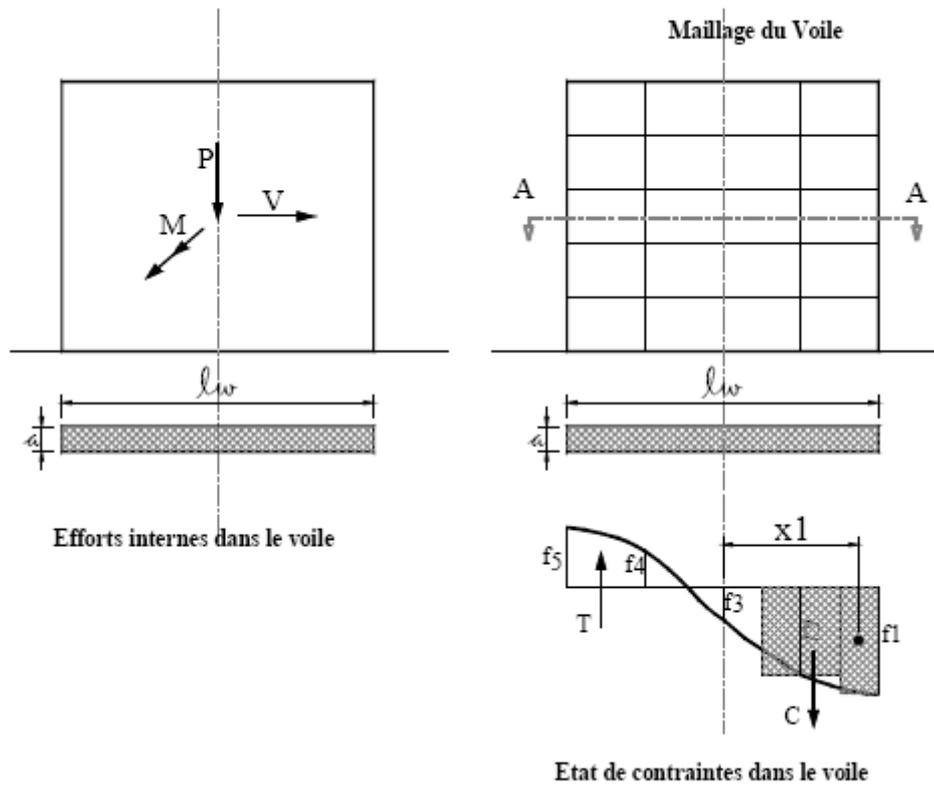


Figure III. 16: Efforts internes et état de contraintes dans le voile

$F_i = A_i * f_i$: Effort normal dans la A_i de la section AA.

$P = \sum F_i$: Effort normal axial obtenu au niveau de la section AA.

$M = \sum F_i * x_i$: Moment fléchissant obtenu au niveau de la section AA.

$V = \sum V_i * A_i$: Effort tranchant au niveau de la section AA.

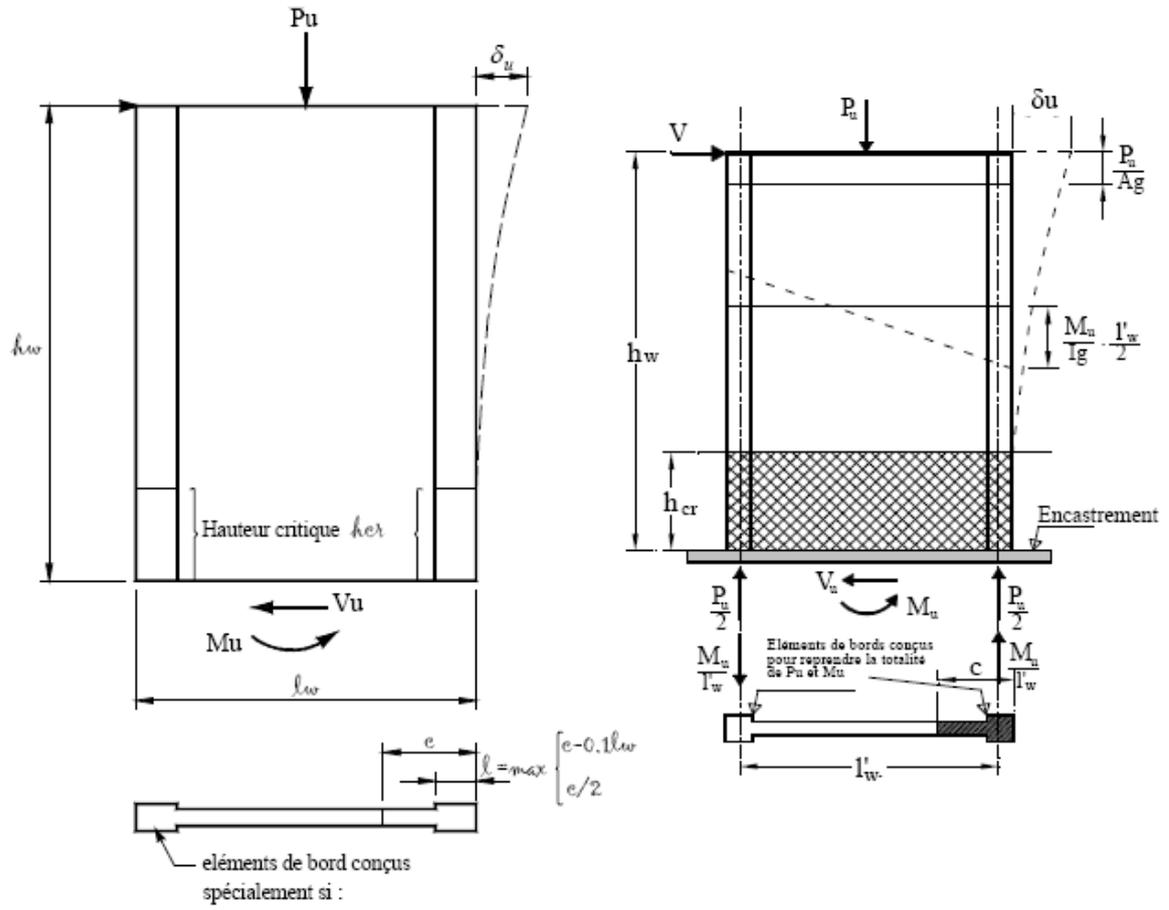


Figure III. 17: Modèle d'un voile sollicité en flexion composée

La hauteur critique h_{cr} , où se produisent les déformations plastiques, ou appelée zone de la « rotule plastique » en pied de mur est estimée par :

$$h_{cr} = \max \left(l_w, \left(\frac{M_w}{4.V_u} \right) \right)$$

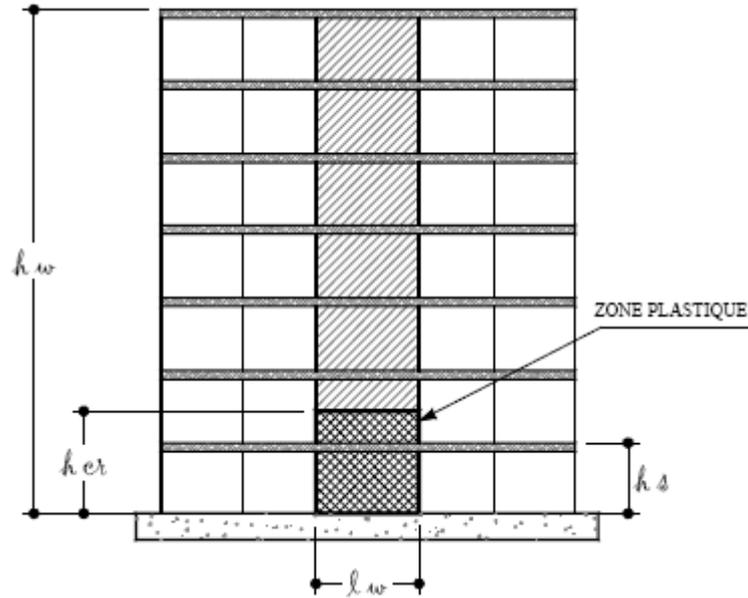


Figure III. 18 : Hauteur de la zone critique d'un voile.

Ces éléments de rive constituent des membrures latérales plus résistantes et plus ductiles que le reste du voile. Comme ces zones sont les plus sollicitées, c'est à cet endroit que se produirait en premier lieu l'éclatement du béton. On empêche donc la ruine en commençant par le renforcement de ces zones. Les armatures de confinement sont des cadres ou des épingles similaires à ceux des poteaux. On définit les zones confinées de rive de la façon suivante :

- *En élévation*, les armatures de confinement doivent être présentes sur toute la hauteur h_{cr} de la zone critique ;
- *En plan*, la zone à confiner s'étend horizontalement sur une longueur mesurée depuis la fibre de compression extrême du mur jusqu'au point où le béton non confiné peut éclater à cause de déformations de compression importantes (Figure II-9).

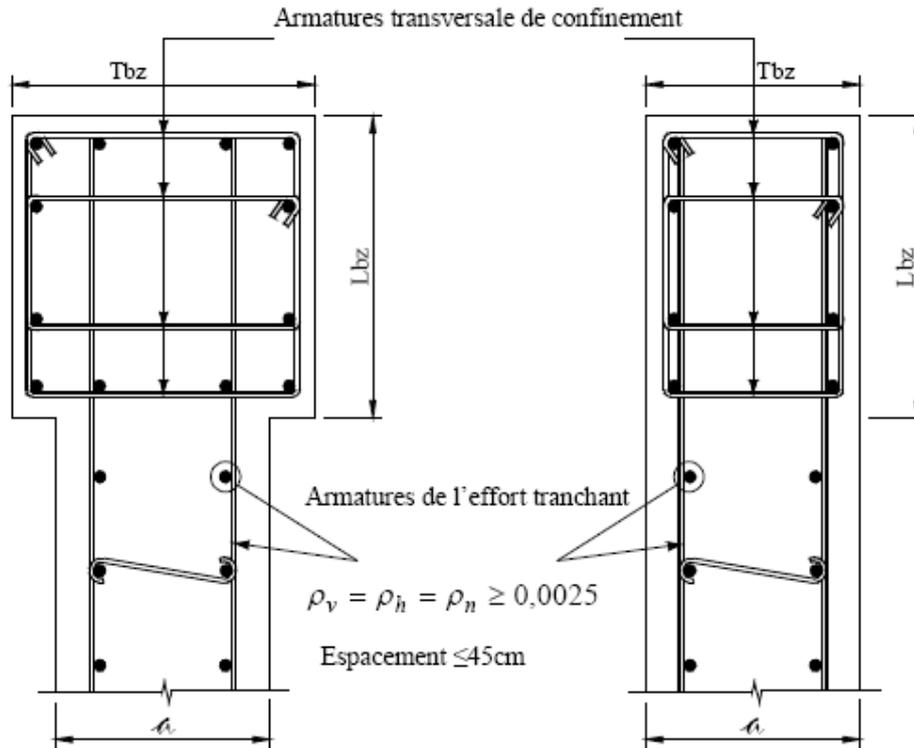


Figure III. 19: Détail de confinement des éléments de bords sur toute la hauteur du voile

III.13. Méthodes d'analyse des murs voiles

Comme les autres formes de structure, les murs voiles pleins ou comportant des files d'ouvertures peuvent être analysés par les deux types de méthodes suivantes :

- **Méthode analytique**, dite du modèle continu, élaboré grâce aux travaux de Smith 2002, Coull 1987.
- **Méthodes numériques**, dites de l'analogie portique qui a donné naissance à la méthode de l'analogie du poteau large et de l'élément mur suite aux travaux de Smith 2002, Coull 1987.

III.14. Méthode de l'élément mur

L'incorporation des deux bras rigides dans la matrice de rigidité de l'élément dans la méthode de l'analogie du poteau large est à l'origine de la distribution discontinue de la déformation de cisaillement le long de la hauteur H du refend. Afin de régler le problème une autre méthode a été proposée : la méthode de l'élément mur. Cette méthode est basée sur l'utilisation des fonctions de déplacement garantissant une variation linéaire de la distorsion le long de la hauteur du refend.

III.15. Analyse des murs voiles par la méthode EF mixte

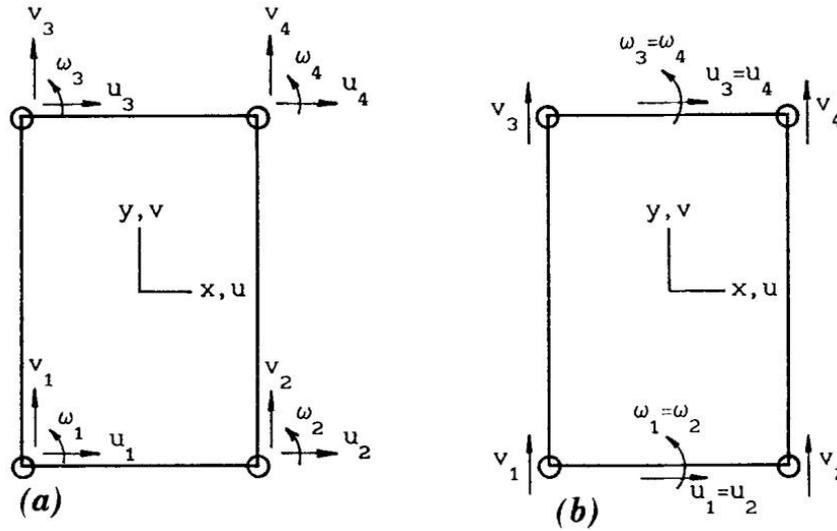


Figure III. 20: élément du voile selon Kwan : (a) élément original, (b) élément simplifié.

En exploitant les translations et les rotations nodales de l'élément de Kwan simplifié (figure (V.1)), on peut obtenir, en fonction des degrés de liberté, les expressions suivantes :

$$u = u_1 \left(\frac{1}{2} - \frac{3}{2} \left(\frac{y}{h} \right) + 2 \left(\frac{y}{h} \right)^3 \right) + \omega_1 h \left(-\frac{1}{8} + \frac{1}{4} \left(\frac{y}{h} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{y}{h} \right)^2 - \left(\frac{y}{h} \right)^3 \right) + u_2 \left(\frac{1}{2} + \frac{3}{2} \left(\frac{y}{h} \right) - 2 \left(\frac{y}{h} \right)^3 \right) + \omega_2 h \left(\frac{1}{8} + \frac{1}{4} \left(\frac{y}{h} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{h} \right)^2 - \left(\frac{y}{h} \right)^3 \right) \quad (\text{III.1})$$

$$v = v_1 \left(\frac{1-x}{2} - \frac{x}{b} \right) \left(\frac{1-y}{2} - \frac{y}{h} \right) + v_2 \left(\frac{1+x}{2} + \frac{x}{b} \right) \left(\frac{1-y}{2} - \frac{y}{h} \right) + v_3 \left(\frac{1-x}{2} - \frac{x}{b} \right) \left(\frac{1+y}{2} + \frac{y}{h} \right) + v_4 \left(\frac{1+x}{2} + \frac{x}{b} \right) \left(\frac{1+y}{2} + \frac{y}{h} \right) + \left(\frac{6}{h} (u_1 - u_2) - 3(\omega_1 + \omega_2) \right) \left(\frac{1}{4} - \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right) \left(\frac{x}{2} - \frac{b}{4} \right) \quad (\text{III.2})$$

Une fois les déplacements de l'élément déterminés, il sera donc possible de calculer la matrice de rigidité du voile à partir de l'équation (3) :

$$K = \int B'.E.Bd(\text{vol}) \quad (\text{III.3})$$

Avec :

B : la matrice de déformation donnée comme suite :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -12xy & 6xy & -b+2x & -b-2x & 12xy & 6xy & b-2x & b+2x \\ h^3 & h^2 & 2bh & 2bh & h^3 & h^2 & 2bh & 2bh \\ 0 & -h+2y & -h+2y & h-2y & 0 & -h-2y & -h-2y & h+2y \\ 0 & 2h & 2bh & 2bh & 0 & 2h & 2bh & 2bh \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ \omega_1 \\ v_1 \\ v_2 \\ u_2 \\ \omega_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

Sachant que :

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} ; \quad \varepsilon_y = \frac{dv}{dy} \quad \text{Et} \quad \gamma_{xy} = \frac{dv}{dx} + \frac{du}{dy} \quad (\text{III.5})$$

La matrice E donnée par :

$$E = \begin{bmatrix} E & 0 & 0 \\ 0 & E & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

Pour la matrice de rigidité du mur voile renforcé par plaque composite, on fait la sommation des trois matrices (matrice du voile + matrice l'adhésive + matrice du composite)

$$K = K_{voile} + K_{adhésive} + K_{composite} \quad (\text{III.7})$$

III.16. Calcul des déplacements

L'analyse statique était étendue au problème de vibrations libres en utilisant l'hypothèse des masses concentrées à chaque niveau du bâtiment. Ceci conduit à adopter des matrices masses diagonales. Les forces d'inertie considérées se limitent aux composantes latérales et verticales en raison de leurs importances comparées à celles de rotation.

La matrice masse pour un tel système peut être donnée par :

$$[M] = \text{diag}[m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, \dots, m_n] \quad (\text{III.8})$$

Où : m_i ($i=1,2,\dots,n$) sont les masses concentrées à chaque niveau le long de la hauteur de la structure et n le nombre des masses concentrées.

Pour obtenir les valeurs propres, il faut résoudre l'équation suivante :

$$[K] - w_n^2 [M] = 0 \quad (III.9)$$

Et pour les déplacements :

$$([K] - w_n^2 [M]) X_i = 0 \quad (III.10)$$

III.17. Présentation des données

Dans cette partie, on calcule le déplacement d'un bâtiment de 15 étages sous chargement latéral uniforme équivalent à 25 KN/m, la masse concentrée par étage vaut 120 t, la surface du renfort par rapport à la surface totale du voile est égal à 20 % ($S_r/S_t = 0.2$), les dimensions du bâtiment étudié est représenté dans le tableau 1, et les caractéristiques des matériaux utilisés sont représentées dans le tableau 2.

Tableau III. 1 : Les dimensions de la structure étudiée

Modèle de la structure	Dimensions			
	Hauteur totale H (m)	Hauteur d'étage (m)	Largeur du mur (m)	Epaisseur du mur (m)
15 étages	45	3	15	0.25

Tableau III. 2 : Caractéristiques géométriques et propriétés des matériaux utilisés.

Matériaux	E_{11} (MPa)	E_{22} (MPa)	G_{12} (MPa)	ν_{12}
Plaque CFRP	140000	10000	5000	0.28
Plaque GFRP	50000	10000	5000	0.28
Voile en béton	30000	30000		0.18
Couche d'adhésive	3000	3000		0.35

III.18. Conclusion

L'amélioration apportée à la méthode de l'analogie portique (élément mur) par KWAN réside dans le fait qu'on considère le mur un élément continu au lieu d'un élément discret. Pour le calcul statique des murs voiles pleins par la méthode de l'élément mur qui vient d'être exposée, il est nécessaire de proposer une matrice de rigidité de l'élément. Celle-ci devrait être compatible avec celle de l'élément mur élaboré par Kwan. Vu les déformations et les déplacements subis par les murs voiles, il est nécessaire d'y remédier ces derniers qui posent actuellement d'énormes dégâts et désordres au sein des structures construites. Ces remèdes se présentent sous plusieurs formes et aspects.

Chapitre IV :
Résultats et discussions

IV.1. Introduction

Puisque divers paramètres influent sur le renforcement des murs voiles, une étude paramétrique était menée dans ce chapitre pour objectif de concevoir une approche meilleure de renforcement. Notre travail se base sur la méthode de l'élément mur élaborée par Kwan. Les résultats numériques obtenus dans le but de montrer l'effet de renforcement des murs voiles par des plaques en matériaux composites sur les déplacements latéraux. Dans cette étude on prend en considération l'influence de l'épaisseur de la plaque de composite et de l'adhésif ainsi que l'utilisation des différents renforts tels que le CFRP, GFRP, plaque en Acier et hybride. En outre, l'effet de l'hygrothermique et la fraction volumique sont également considérées dans cette étude.

IV.2. Effet du changement de matériaux composites

Dans la (figure IV.1) une comparaison entre voile non renforcé avec des voiles renforcées par différents matériaux. L'utilisation des différents renforts tels que CFRP, GFRP et l'acier affectera sur le déplacement de voiles au sommet.

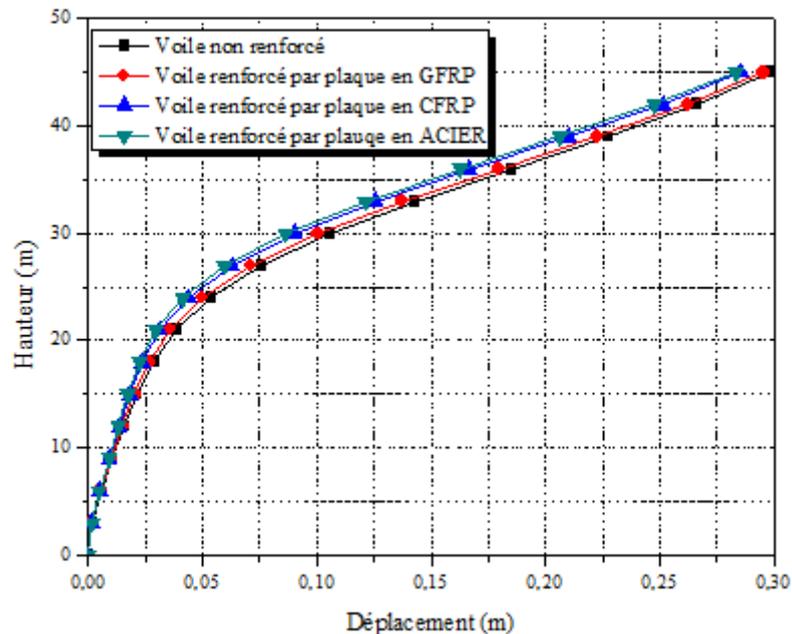
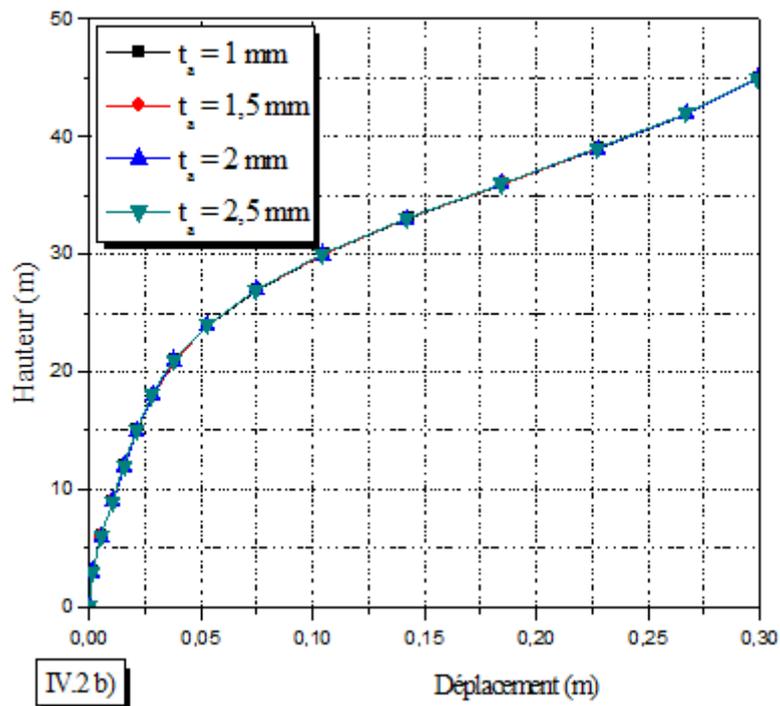
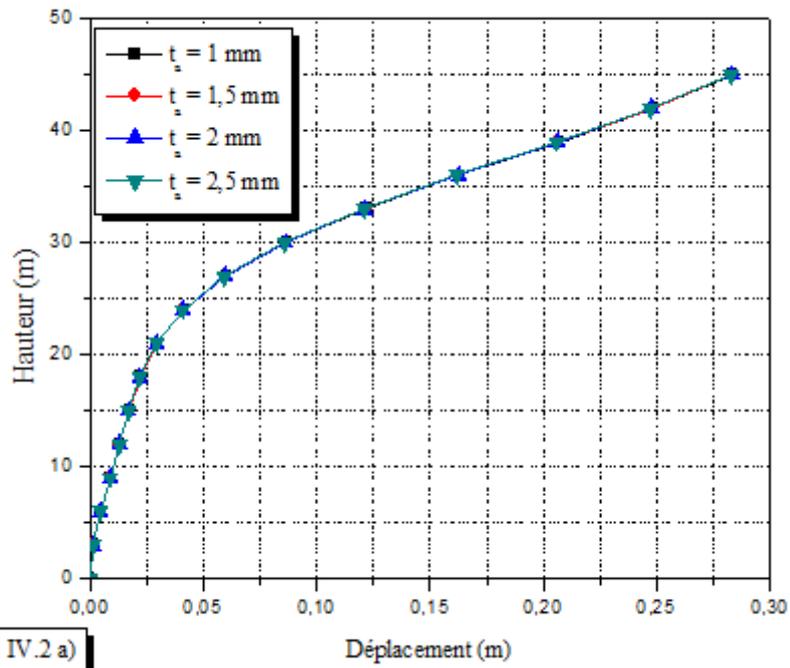


Figure IV. 1 : Comparaison entre voile non renforcée avec voile renforcée

IV.3. Effet de l'épaisseur d'adhésif

La figure IV.2, et le tableau IV.2, représentent l'effet de l'épaisseur de l'adhésif pour différents cas de renfort (Acier, GFRP, CFRP respectivement). L'augmentation de l'épaisseur de l'adhésif réduit le déplacement du bâtiment renforcé au sommet.



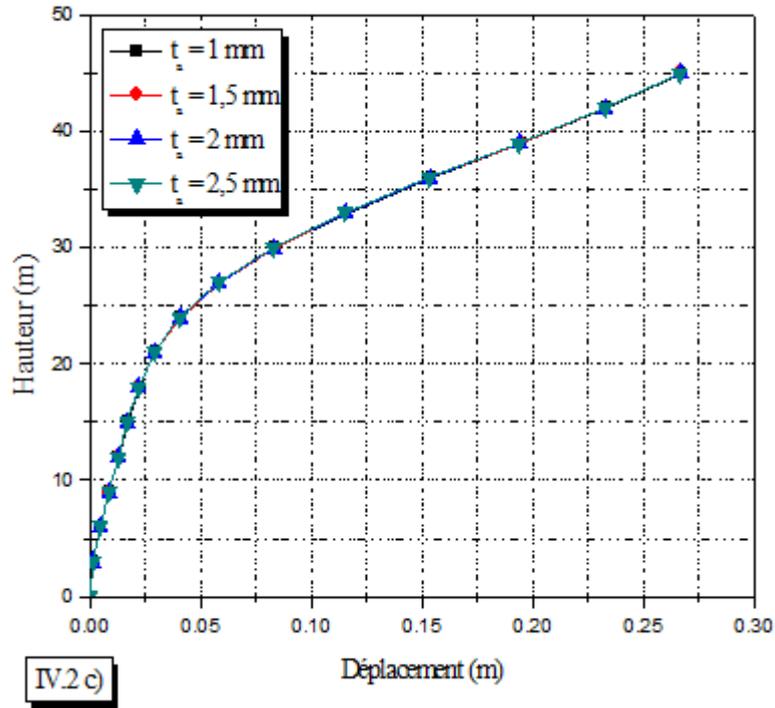


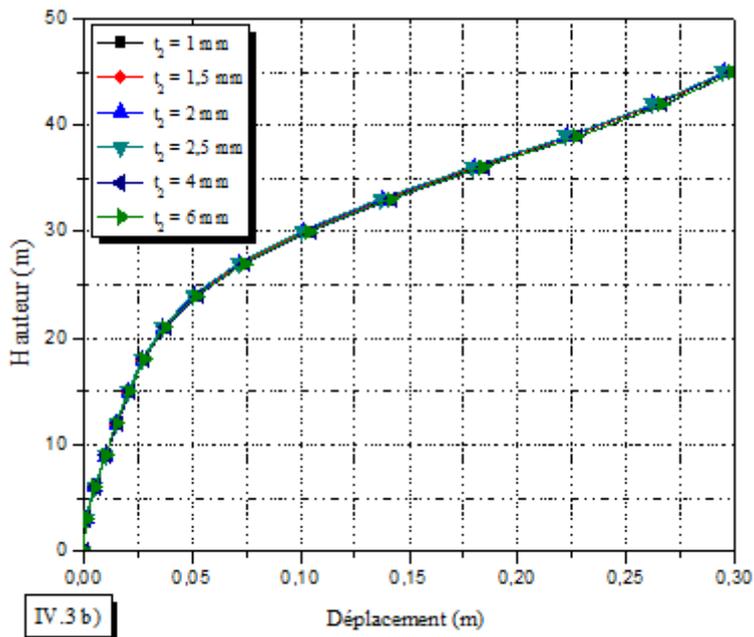
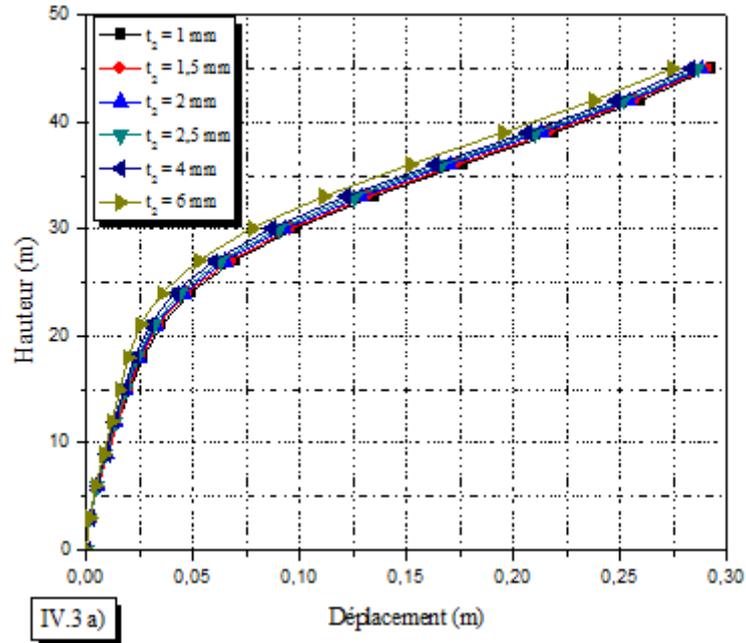
Figure IV. 2 : Influence de l'épaisseur de l'adhésif (ta) ; a)Acier, b) GFRP, c)CFRP

Tableau IV. 1 : Influence de l'épaisseur de l'adhésif

Plaque de renforcement en Acier				
H	ta			
	ta= 1mm	ta= 1,5mm	ta=2mm	ta= 2,5mm
15	0,01737	0,01729	0,01722	0,01715
30	0,08705	0,08671	0,08637	0,08603
45	0,28357	0,28325	0,28294	0,28262
Plaque de renforcement en GFRP				
H	ta			
	ta= 1mm	ta= 1,5mm	ta=2mm	ta= 2,5mm
15	0,02142	0,02133	0,02124	0,02116
30	0,10540	0,10501	0,10463	0,10425
45	0,29981	0,29949	0,29916	0,29884
Plaque de renforcement en CFRP				
H	ta			
	ta= 1mm	ta= 1,5mm	ta=2mm	ta= 2,5mm
15	0,01721	0,01714	0,01707	0,01700
30	0,08396	0,08363	0,08330	0,08298
45	0,26738	0,26705	0,26672	0,26639

IV.4. Effet de l'épaisseur de la plaque de composite

Il est important de vérifier l'effet de l'épaisseur du composite sur le déplacement de bâtiment donc il faut bien noter que l'augmentation de l'épaisseur de la plaque réduit le déplacement de bâtiment renforcé. La Figure IV.3 et le tableau IV.3 représentant clairement de l'effet avec divers renfort (Acier, GFRP, CFRP respectivement).



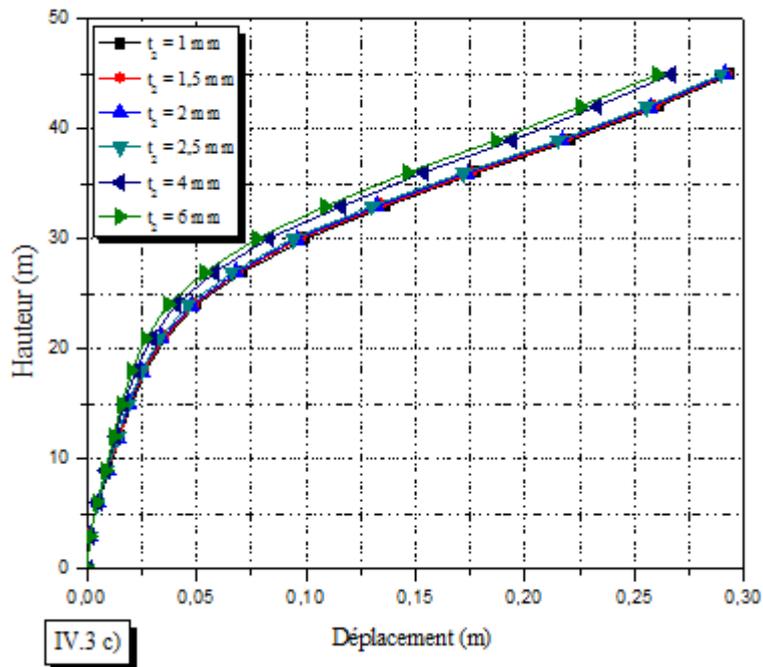


Figure IV. 3 : Influence de l'épaisseur de plaque de renforcement en ; a) Acier, b) GFRP, c) CFRP

IV.5. Effet de pourcentage de patch

Dans la figure IV.4 on a choisi le rapport de (S_B/S_T) le pourcentage de la surface de la plaque composite par rapport à la surface de voile. En note que le pourcentage de patch aussi va réduire le déplacement au sommet de bâtiment.

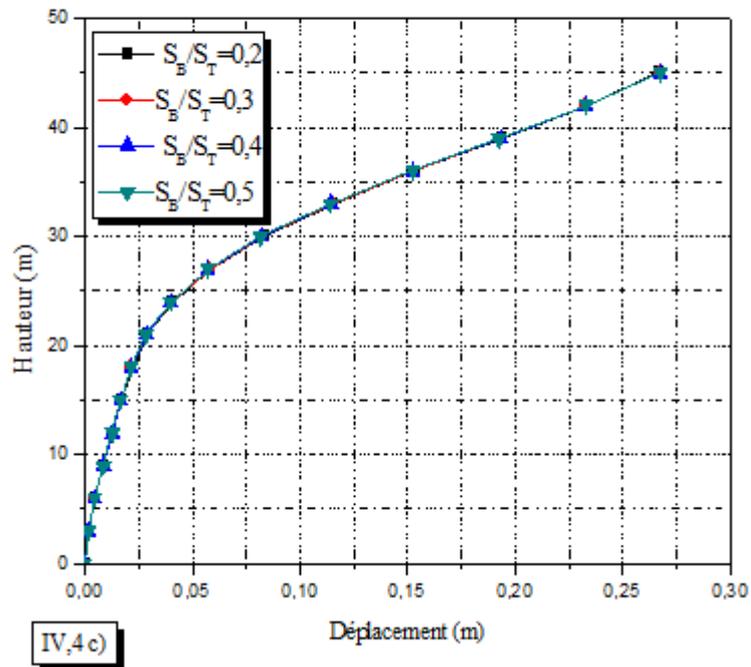
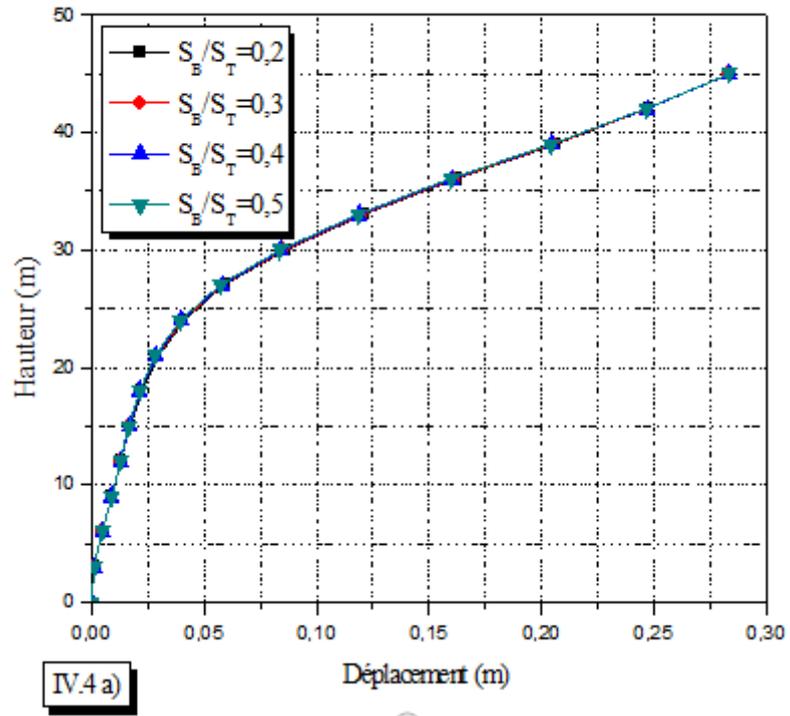


Figure IV. 4: Influence de pourcentage (%) de patch ; a) Acier, b) GFRP, c) CFRP

Tableau IV. 2 : Influence de pourcentage (%) de patch

Plaque de renforcement en Acier	
H	SC

	20%	30%	40%	50%
15	0,01722	0,01695	0,01677	0,01669
30	0,08637	0,08513	0,08426	0,08372
45	0,28294	0,28336	0,28361	0,28340
<i>Plaque de renforcement en GFRP</i>				
H	SC			
	20%	30%	40%	50%
15	0,02124	0,02121	0,02119	0,02117
30	0,10463	0,10448	0,10437	0,10430
45	0,29916	0,29923	0,29927	0,29924
<i>Plaque de renforcement en CFRP</i>				
H	SC			
	20%	30%	40%	50%
15	0,01707	0,01689	0,01677	0,01665
30	0,08330	0,08253	0,08202	0,08172
45	0,26672	0,26712	0,26754	0,26624

IV.6. Modes de vibration

Il est important d'étudier l'influence de modes de vibration, Comme nous le remarquons les divers trois premier modes (Figure IV.5) et La sélection a été faite selon la méthode choisie. Le mode sélectionné c'est le premier mode. la Figure IV.6.

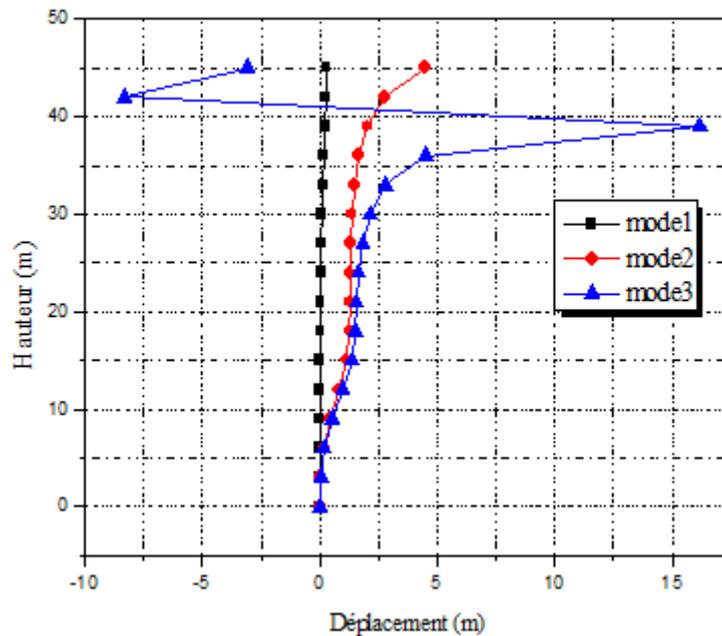


Figure IV. 5: Représente les 3 modes

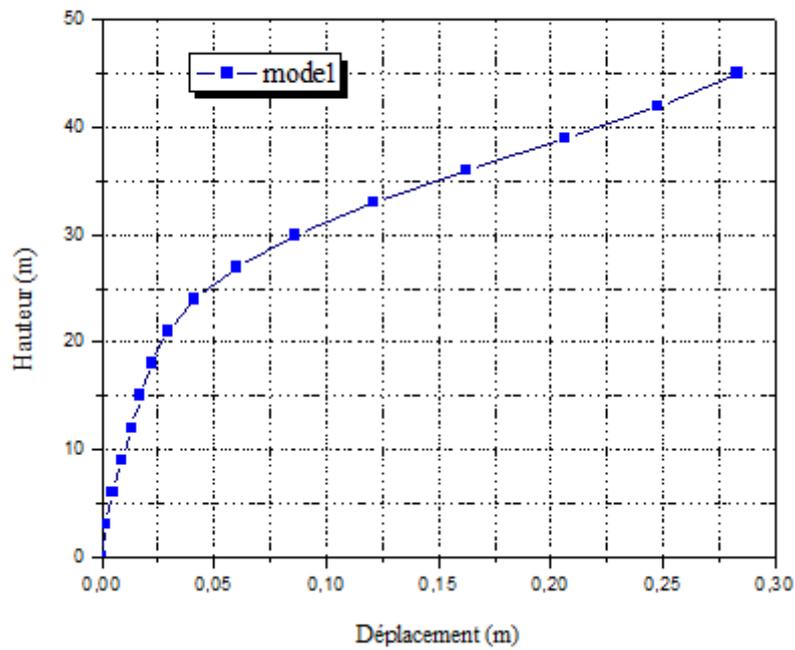


Figure IV. 6 : Représente le mode 1

IV.7. Effet de rapport de W_{f1}

La figure IV.7 montre que lorsque le pourcentage de fibre de carbone augmente par rapport au pourcentage de fibre de verre le déplacement réduit et l'inverse.

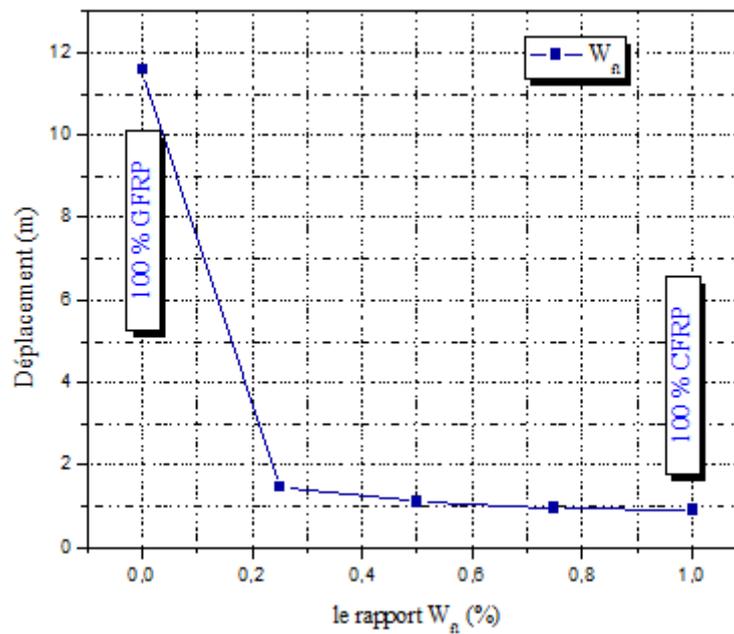


Figure IV. 7 : Effet du rapport de W_{f1} en Hybride

IV.8 Effet de la fraction volumétrique des fibres

La figure (IV.8) illustre la variation de déplacement en fonction de la fraction volumique des fibres. Ces dernières nous ont permis de montrer le lien tangible entre la fraction volumique des fibres V_f et l'évolution de déplacement.

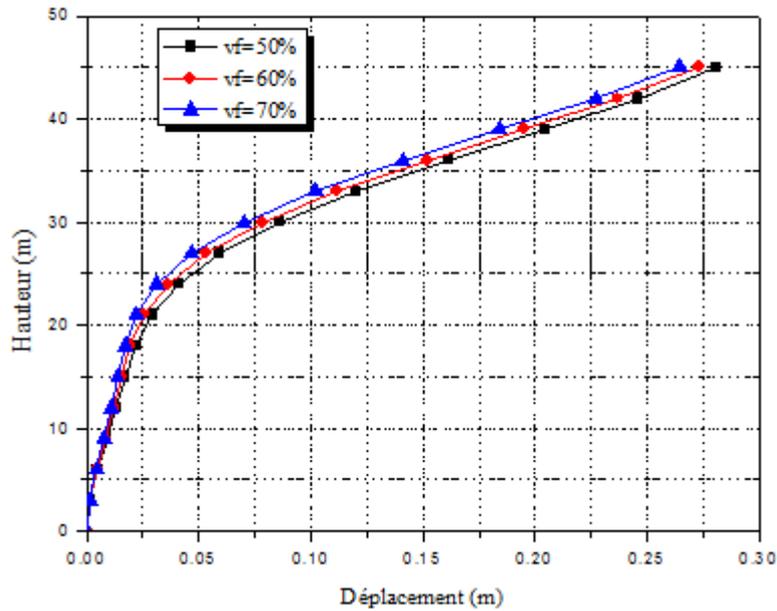


Figure IV. 8: Représente Variation de déplacement en fonction de fraction volumique

IV.9 Effet de l'hygrothermique

Il est important d'étudier l'influence de l'hygrothermique sur le déplacement de bâtiment. Il est observé sur la figure IV.9 et apparaitre clairement dans le tableau IV.3 que l'hygrothermique n'a aucun effet sur le déplacement de bâtiment.

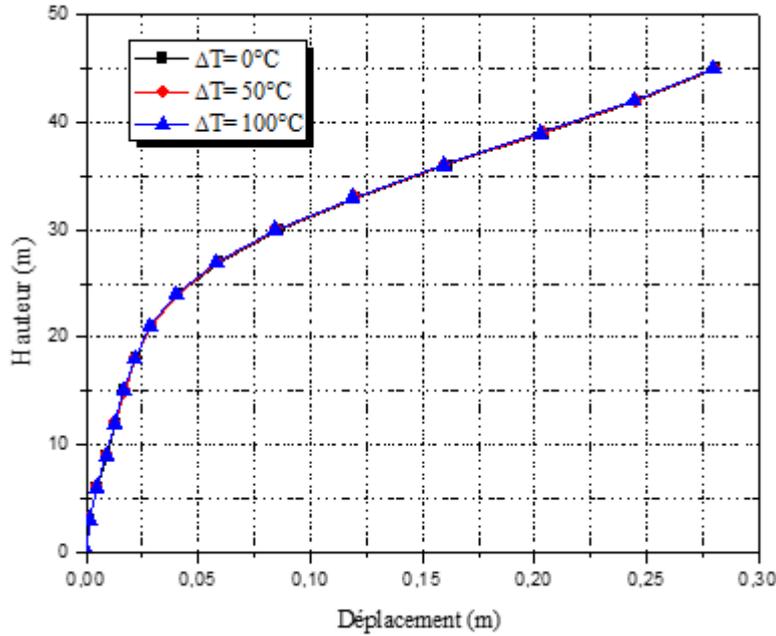


Figure IV. 9: Représente Variation de déplacement en fonction de la hauteur pour différentes conditions de température. **Tableau IV. 3:** Représente Variation de déplacement en fonction de la hauteur pour différentes conditions hygrothermique

H	Température		
	(0°)	(50°)	(100°)
15	0,01714	0,01697	0,01680
30	0,08573	0,08493	0,08413
45	0,28109	0,28028	0,27948

IV.10. Conclusion

Dans la présente étude, une nouvelle analyse théorique de déplacement de bâtiment au sommet a été présentée avec les plaques de composites collées. Après la validation de cette nouvelle méthode dans ce chapitre, il a été alors possible d'appliquer cette première. Différents arrangements sont pris en considération et qui influent sur le déplacement de bâtiment au sommet tel que le changement de renfort et dans notre étude on a pris en le GFRP, CFRP, et l'acier et on a remarqué que l'acier donne des résultats par rapport aux autres. Il faut noter que l'augmentation de l'épaisseur de la plaque composite et de l'adhésif réduit le déplacement de bâtiment au sommet néanmoins il est recommandé de ne dépasse pas la limite. On constate également que l'augmentation de pourcentage de patch réduit le déplacement de bâtiment au sommet.

L'étude paramétrique prouvée que l'effet de l'hygrothermique n'a aucune influence sur le déplacement de bâtiment et aussi l'effet de rapport Wf1 (le pourcentage des fibres de carbone par rapport aux fibres de verre) sachant que si on augmente les fibres de carbone le déplacement réduit et l'inverse.

Conclusion Générale

Conclusions générale

L'objet de la présente recherche était le renforcement des voiles en béton armé par collage externe des plaques en matériaux composites. Cette recherche vient de confirmer et de compléter certains points précédemment menés sur le sujet de réhabilitation des ouvrages en béton armé.

Le présent manuscrit comporte deux points fondamentaux ; d'une part de proposer une modélisation fiable qui puisse être appliquée à une grande variété de structures, à voiles en béton armé renforcés par composite sous sollicitation sismique, d'autre part de montrer l'efficacité du modèle de voile renforcé par des composites sur le comportement des murs refends, précisant l'influence des caractéristiques géométriques et mécaniques des plaques en composites.

Nous avons évalué la pertinence des différentes techniques de renforcement des murs voiles en béton armé afin de dégager une approche de modélisation sur laquelle il nous a paru prioritaire de porter notre effort. Les résultats obtenus lors de la présente étude nous ont amené à conclure qu'il était nécessaire de renforcer les murs voiles en béton arme, par des plaques en composites dans le but d'éviter l'état d'endommagement et surtout d'essayer de prédire les différents modes de ruine.

Une méthode d'analyse des murs voile renforcé par des plaques en matériaux composites à base de fibres, était proposée dans le cadre de cette mémoire de master, par l'utilisation de la méthode des éléments finis mixtes. Des programmes de calcul étaient établis afin de montrer la capacité du modèle à traduire des grandeurs globales telles que les déplacements des murs voiles à leurs sommets et leurs fréquences propres de vibration devant les chargements dynamiques (excitations sismiques). Les résultats obtenus démontrent l'effet d'une part, des caractéristiques géométriques et mécaniques des plaques composites et d'autre part, la redistribution de leurs fibres sur le renforcement des murs refends en béton armé étudiés.

Cette étude peut être étendue au calcul sismique des structures murs refends en béton armé situées dans les pays à risques sismiques, exemple l'Algérie, Iran, Turquie, Grèce,...etc. Toutefois, pour réussir à tirer des conclusions satisfaisantes sur le comportement des murs voiles en béton armé, renforcés par les matériaux composites, il faut que le modèle et la modélisation employés doivent être valides sur des exemples d'essais plus variés. Il conviendrait donc de poursuivre et d'enrichir les recherches dans la voie numérique et de les compléter par des essais expérimentaux menant ainsi à maîtriser la problématique de renforcement des murs voiles devant les chargements accidentels.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abbas H., JM. Kelly, (1993) "Methodology for design of viscoelastic dampers in earthquake resistant structures», Technical report UCB/EER C-93/09, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Anjami M., (2013) "Analyse du comportement mécanique des poutres métalliques renforcées par collage externe des plaques composites" mémoire de master université de Tiaret.
- ASTM C39/C39M-03 (2003) "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens", *ASTM International*.
- Badour S., Hassaine Daouadji. T, Rabahi A., Belblidia M., (2018) "Utilisation des matériaux composites dans le renforcement des voiles en béton armé", 1st International Conference on Vulnerability and Rehabilitation of Structures, USTHB Alger.
- Belblidia. M, Hassaine Daouadji. T, Rabahi A., Badour S., Abbes B., "Analyse des contraintes d'interface dans les poutres métallique renforcées par collage externe des matériaux composites", (2018). 1st International Conference on Vulnerability and Rehabilitation of Structures, USTHB Alger.
- Belhannachi H., (2009) "Réhabilitation et renforcement des poteaux en béton armé", mémoire de magister université de Constantine.
- Berreur, L., De Maillard, B., et Nösperger, S. (2002) "L'industrie française des matériaux composites", Etude stratégique réalisée par Nodal Consultants pour le compte de la DiGITIP / SIM, Rapport final, Révision 2 du 13 mai 2002.
- Bertero, V., (1982) "State of the art in seismic resistant construction of structures", Proceedings of the third international earthquake microzonation conference, University of Washington, Seattle, Washington, Volume II, pp. 767-805.
- Berthelot J. M., (1999) "Matériaux Composites-comportement mécanique et analyse des structures", 3^{eme} édition, pp5-30, p642.
- Berthelot J.M., (2002) "matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures", TEC et DOC 4eme édition.
- Bertholot.J.M. Ferrier, E., Hamelin, P., (2006) "Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets". Part B: modeling. *Construction and building materials* 20. pp. 338-347.
- Bresson, J., (1971) "Nouvelles recherches et applications concernant l'utilisation des collages dans les structures- Béton plaqué", *Annales de l'ITBTP*, série béton et béton armé ; N° 278.

- Calgaro, J.A. et Lacroix, R., (1997) "Maintenance et réparation des ponts", *Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC)*, 666 p.
- Coull A., Adams N.W., (1983) "Variable stiffness elastic base mechanic for model shear wall structures", *Journal of strain analysis*, Vol. n° 15, 1983, p.145-149.
- Coull A., El Talibi E.B., (1987) "Dynamic behaviour of stiffened shear walls on flexible foundations", *Proceeding of international conference on behaviour of slender structures*, Vol. n° 1 , pp. 1-18.
- Coull A., Irwin A.W., (1968) "Load distribution in multi-storey shear wall structures», extrait du rapport final du huitieme congres de l'association des ponts et charpente, pp. 995-1004
- Coull A., Mohamed T.H., (1983) "Simplified analysis of lateral load distribution in structures consisting for frames coupled shear walls and cores", *Journal of Structures Engineering*, Vol. n° 61 B, pp.1-8.
- Coull A., Subedi N.K., (1972) "Coupled shear walls with two and three bands of openings", Pergamon Press, Vol. n° 7, pp. 81-86
- Cussin .F., (1992) "Tôles collées. Précontraintes additionnelles". *Annales de l'ITBTP*, 501, 85-88.
- Davidovici V., (2003) "Séisme de BOUMERDES-21 mai 2003", Rapport préliminaire, Ministère de l'Habitat, république algérienne démocratique et populaire.
- Foo S., Naumoski N., et Saatcioglu, M. (2001) "Aléas sismiques, codes du bâtiment et opinions d'atténuation des risques pour les immeubles canadiens", *Bureau de la Protection des Infrastructures Essentielles et de la Protection Civil*, Ministère des Travaux Publics et Service Gouvernementaux, N° du Catalogue : D 82-73/2002F-IN.
- Four B., (1985) "Prise en compte du comportement du béton, cas particulier des voiles plans en béton armé», *Presse de l'ENPC*, pp.605-616.
- Hamelin, P. (2002) "Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites", AM 5 615, *Technique de l'ingénieur*, Traité Plastiques et Composites, Vol. AM 6.
- Hassaine Daouadji T, Ait Amer M, Tounsi A, Adda Badia E A., (2009) 1er symposium méditerranéen de geoingeneering SMGE 09, "Réparation des ouvrages en béton armé par collage des plaques en matériaux composites", faculté de génie civil, université des sciences et technologie USTHB Alger, Algérie.
- Kelly J.M., Skinner R., Heine A., (1972) "Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures", *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake*, Vol. n°5, pp.63-88.

- Kwan A.K.H., (1991) "Analysis of coupled shear walls/frame structures by frame method with shear deformation allowed», *Journal of Structural Engineering*, part2, pp. 273-297
- Kwan A.K.H., (1992) "Reformulation of frame method", *Journal of structural Engineering*, paper 9809, pp.103-116.
- Kwan A.K.H., (1995) "Equivalence of finite elements and analogous frame modules for shear/core wall analysis", *Computers and structures*, Vol.57, n°2, pp.193-203.
- L'Hermite, R. (1967) "L'application des colles et résines dans la construction", *Annales de l'ITBTP*, série béton et béton armé, N° 239.
- Luyckx, J. (1999) "Composites à fibres de carbone dans le génie civil", *Technique de l'ingénieur*, Traité Plastiques et Composites, AM 5 620.
- Maalem H., (1988) "*Expertise du supermarché de la ville de Annaba*", Agence de Annaba, CTC\Est.
- Marko J., Thambiratnam D., perera N., (2004) "Influence of damping systems on building structures subject to seismic effects", *Engineering Structures*, pp.1939-1956
- Mcleod A., (1969) "New rectangular Finite Element for shear wall analysis", *Journal of Structure Division*, Vol.n°2, pp.452-461.
- Mcleod A., (1973) "Analysis of shear wall building by the frame method", *Department of Civil Engineering. University of Glasgow*, part 2, pp.593-603.
- Paulay T., Priestley M., «*Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*», New York; 1992, p 744.
- Poyodi T., (2014) "Analyse et modélisation de l'efficacité de l'utilisation des matériaux composites pour le renforcement des structures métalliques" mémoire de master université de Tiaret.
- Rabahi A., M, Hassaine Daouadji. T, Abbas B., Belkacem A., (2016) "Analytical and solution of the interfacial stress in reinforced-concrete beams reinforced with bonded prestressed composite plate".
- Rafik M., Guenfoud M., (2011) "Techniques de renforcement des bâtiments en béton armé vis-à-vis du séisme ", XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen.
- RPA, (2003) "Réglement parasismiques algériens", Document technique réglementaire D.T.R.-B.C, pp2.48.
- Sika. (1998) "Renforcement par le procédé Sika Carbodur", *Cahier des Clauses Techniques*, CCT 37.
- Smith, S.T. ET Teng, J.G. (2002) "FRP-strengthening RC beams. I: review of debonding strength models", *Engineering Structures*, Vol. 24, pp. 385-395.

- Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T. ET Lam, L. (2002) "FRP strengthened RC structures", *John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK*, 245 p.
- Teng, J.G., Smith S.T., Yao, J. ET Chen J.F., (2003) "Intermediate crack-induced debonding in RC beams and slabs", *Construction and Building Materials*, Vol. 17, pp. 447-462.
- Theillout, J-N. (1997) "Renforcement des structures à l'aide de plats métalliques collés", In : Calgaro, J.A. et Lacroix, R. : Maintenance et Réparation des Ponts, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 666 p.
- Yahiaoui S., (2006) "Etude expérimentale de la durabilité des éléments en béton armé rigidifiés par les matériaux composites "mémoire de magister université de Boumerdes.

Neto graphie

[NET 01] <http://www.concretecorrosion.net>

[NET 02] <http://www.sika.com>

[NET 03] <http://gc1.insa-tlse.fr/insagc/perso/raoul/gr2-2001.html>