

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



---

Université Dr Tahar Moulay Saïda  
Faculté des Sciences et Technologie  
Département de Génie Civil et Hydraulique



**Mémoire présenté par**

**BOULEFRAKH Laid**

En vue de l'obtention du diplôme de

**Magister en Génie civil**

École Doctorale Science de l'Environnement Eau et Construction

*Option: Géomatériaux*

Intitulé du mémoire :

---

***Étude et modélisation des murs en béton armé réhabilités par des  
plaques en fibres de carbone***

---

***Soutenue Devant le jury :***

<b>P<sup>r</sup> M. GHALI</b>	Professeur	Université de SAIDA	<b>Président</b>
<b>D<sup>r</sup> A. MEDJBER</b>	Maître de conférences A	Université de SAIDA	<b>Rapporteur</b>
<b>D<sup>r</sup> R. YEGHNEM</b>	Maître de conférences B	Université de SAIDA	<b>Co-Rapporteur</b>
<b>D<sup>r</sup> I. MECHAB</b>	Maître de conférences A	Université de MASCARA	<b>Examineur</b>
<b>D<sup>r</sup></b>	Maître de conférences A	Université de	<b>Examineur</b>

## ***Remerciements***

- *Je remercie en premier lieu **D<sup>R</sup> MEDJBER Abdellah** maître de conférences A à l'université de SAIDA, de m'avoir fait confiance en me proposant ce sujet de thèse, ces conseils bénéfiques et son aide précieuse dans l'aboutissement de cette thèse.*
- *Je remercie Monsieur **YEGHNEM. Réda** maître de conférences B à l'université de SAIDA, de m'avoir aidé dans l'accomplissement de cette thèse, la qualité de ses conseils et son soutien scientifique qui m'a apporté à ma thèse.*
- *Je tiens à exprimer ma gratitude à Monsieur **M. GHALI** Professeur à l'université de SAIDA, pour l'honneur qu'il me fait de présider mon jury.*
- *Mes remerciements les plus sincères à messieurs **I. MECHAB**, maître de conférences A à l'université de MASCARA et \_\_\_\_\_ maître de conférences A à l'université de SAIDA, d'avoir accepté de juger ma thèse.*

## ***Dédicace***

***Je dédie ce modeste travail à :***

- *Mon père.*
- *Ma mère.*
- *Mes frères.*
- *Ma sœur*
- *Mes amis*

## **Résumé**

*L'évolution des règles de dimensionnement impose un renforcement des structures en béton armé. Un procédé constructif, consistant à l'application de renfort externe par collage de matériaux composites, s'est particulièrement développé ces dernières années et paraît prometteur pour le renforcement parasismique des bâtiments. Parmi les composants de structures pouvant remettre en cause la stabilité de l'ouvrage en cas de séisme, les murs en béton armé nécessitent plusieurs cas un renforcement adéquat.*

*Le présent travail traite une étude du comportement des murs de contreventement en béton armé, réhabilités par des matériaux composites. Ce travail comporte Une introduction générale et cinq chapitres clôturé par une conclusion générale. Dans le premier chapitre nous traitons le Comportement des murs-voiles. Le deuxième chapitre sera consacré aux techniques de renforcement des ouvrages en béton armé, le troisième chapitre représente une généralité sur les matériaux composites. L'avant dernier chapitre présente l'étude et la modélisation des murs voiles en béton armé renforcées par des plaques composites d'une part, et des murs voiles en béton armé non renforcées d'autre part. Les divers résultats numériques obtenus sont discutés et interprétés au dernier chapitre.*

**Mot clé:** murs-voiles en BA ; matériaux composites ; éléments finis, déplacement des murs-voiles.

## Abstract

*The evolution of design rules requires a strengthening of reinforced concrete structures. A constructive process, consistent of the application of external reinforcement by bonding of composite materials, has been particularly developed in recent years and seems promising for seismic strengthening of buildings. Among the components of structures that could affect the stability of the structure in case of earthquake, reinforced concrete walls require a building several cases.*

*The présent work deals with a study of the behavior of shear walls of reinforced concrete, composite materials rehabilitated. This work contains a general introduction and five chapters close with a general conclusion. In the first chapter we treat the behavior of sail walls. The second chapter is devoted to the techniques of building reinforced concrete structures, the third chapter is a generalization of composite materials. The penultimate chapter presents the study and modeling of walls reinforced concrete walls reinforced with composite plates on the one hand, and walls reinforced concrete walls not reinforced on the other hand. The various numerical results are discussed and interpreted in the last chapter.*

**Key word:** BA shear-walls; composite materials; finite elements, displacement of shear-walls .

## خلاصة

إن تطور قواعد التصميم يقتضي تعزيز الهياكل الخرسانية المسلحة , هناك عملية تعزيز تتمثل في لصق المواد المركبة. من بين عناصر الهياكل التي يمكن أن تؤثر على اتزان الهيكل في حالة الزلزال , الجدران الخرسانية بكميات مناسبة ووضعيات ملائمة.

ويتناول العمل الحالي دراسة لسلوك الجدران الخرسانية المعززة بالمواد المركبة ، وهذه المذكرة تتضمن مقدمة عامة و خمسة فصول مع الاستنتاج العام. الفصل الأول نعالج فيه سلوك جدران الخرسانة المسلحة. ويخصص الفصل الثاني لتقنيات تعزيز الهياكل الخرسانية المسلحة، والفصل الثالث هو عبارة عن عموميات عن المواد المركبة. الفصل ما قبل الأخير يقدم دراسة تحليلية للجدران الخرسانية المعززة ببلوحات من المواد المركبة بواسطة نظرية العناصر المتناهية . في الأخير مناقشة مختلف النتائج العددية وتفسيرها.

**الكلمات المفتاحية :** الجدران الخرسانية المسلحة , المواد المركبة , العناصر المتناهية , تنقل وتشوه الجدران الخرسانية

المسلحة

## **Liste des Notations**

$N$	<i>Effort normal (charge verticale) .</i>
$V$	<i>Effort tranchant (charge horizontale) en tête du voile.</i>
$A_0$	<i>Aire des armatures verticales concentrées.</i>
$A$	<i>Aire des armatures verticales réparties.</i>
$A_t$	<i>Aire des armatures horizontales réparties.</i>
$\rho_0$	<i>Pourcentage d'armatures verticales concentrées.</i>
$\rho$	<i>Pourcentage d'armatures verticales réparties.</i>
$\rho_t$	<i>Pourcentage d'armatures horizontales réparties.</i>
$e$	<i>Épaisseur de voile.</i>
$t$	<i>Espacement des armatures horizontales.</i>
$B$	<i>Aire de l'aille du voile.</i>
$h$	<i>Hauteur de voile.</i>
$l$	<i>Largeur du voile.</i>
$\gamma$	<i>Déformation de distorsion.</i>
$w$	<i>Rotation.</i>
$u$	<i>Vecteur de déplacement horizontale.</i>
$v$	<i>Vecteur de déplacement vertical.</i>
$\varepsilon$	<i>Déformation longitudinale.</i>
$U_{def(e)}$	<i>Énergie de déformation</i>
$E$	<i>Module d'élasticité des murs en BA.</i>
$E_C$	<i>Module d'élasticité du composite.</i>
$E_f$	<i>Module d'élasticité de la fibre.</i>
$E_m$	<i>Module d'élasticité de la matrice.</i>
$G$	<i>Module élastique de cisaillement des murs en BA.</i>
$G_C$	<i>Module élastique de cisaillement du composite.</i>
$G_f$	<i>Module élastique de cisaillement de la fibre.</i>
$G_m$	<i>Module élastique de cisaillement de la matrice.</i>
$HR$	<i>Fibres haute résistance.</i>
$HM$	<i>Fibres haute module.</i>
$UD$	<i>Unidirectionnels.</i>
$CMO$	<i>Composite à matrice organique.</i>
$CMM$	<i>Composite à matrice métallique.</i>
$CMC$	<i>Composite à matrice Céramique.</i>
$TD$	<i>Résines thermodurcissable</i>
$TD$	<i>Résines thermoplastique</i>
$FRP$	<i>Polymères renforcées de fibres de (carbone C - verre G – aramide A).</i>

## Sommaire

<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE .....</b>	<b>09</b>
<b>Chapitre I : COMPORTEMENT DES MURS-VOILES</b>	
<b>I.1: Généralités .....</b>	<b>11</b>
<b>I.2: Classification et catégories des Constructions à Murs voiles .....</b>	<b>12</b>
<b>I.3: Calcul des murs voiles .....</b>	<b>15</b>
<b>I.4: Type de systèmes des murs voiles.....</b>	<b>16</b>
<b>I.5: Modes de fonctionnement des murs-voiles .....</b>	<b>17</b>
<b>I.6: Quelques Principes de dimensionnement .....</b>	<b>19</b>
<b>Chapitre II : TECHNIQUE DE RENFORCEMENT</b>	
<b>II.1: Introduction.....</b>	<b>21</b>
<b>II.2: Le mécanisme d'absorption d'énergie (l'amortisseur).....</b>	<b>22</b>
<b>II.3: Utilisation d'un système d'isolation à la base .....</b>	<b>23</b>
<b>II.4: Procédés De Renforcement Des Structures par matériaux composites.....</b>	<b>25</b>
<b>Chapitre III : GÉNÉRALITÉS SUR LES MATÉRIAUX COMPOSITES</b>	
<b>III.1: Introduction .....</b>	<b>30</b>
<b>III.2: Les renforts .....</b>	<b>31</b>
<b>III.3: Les matrices.....</b>	<b>33</b>
<b>III.4: Colles et adhésifs.....</b>	<b>38</b>
<b>III.5: Les différentes formes des FRP.....</b>	<b>38</b>
<b>III.6: Les avantages des matrices composites.....</b>	<b>39</b>
<b>III.7: Les inconvénients des matrices composites .....</b>	<b>39</b>
<b>Chapitre IV : ANALYSE DES MURS EN BÉTON ARME RÉHABILITÉS</b>	
<b>IV.1: Introduction.....</b>	<b>41</b>
<b>IV.2: Méthode de l'élément mur .....</b>	<b>41</b>
<b>IV.3: Analyse des murs voiles par éléments finis .....</b>	<b>43</b>
<b>IV.4: Théorie et solutions.....</b>	<b>44</b>
<b>IV.5: Présentation du programme de calcul des murs voiles.....</b>	<b>53</b>
<b>IV.6: Type d'analyses effectuées par le programme.....</b>	<b>54</b>
<b>Chapitre V: ÉTUDE PARAMÉTRIQUE ET INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS</b>	
<b>V.1: Données du modèle étudié.....</b>	<b>58</b>
<b>V.3: Étude paramétrique.....</b>	<b>60</b>
<b>V.3: Discussions et interprétations des résultats.....</b>	<b>67</b>
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>68</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIES .....</b>	<b>70</b>

## **Liste des Figures**

### **Chapitre I : COMPORTEMENT DES MURS-VOILES**

<b>Figure I.01:</b> Comportement de deux immeubles voisins face aux secousses sismique .....	11
<b>Figure I.02 :</b> Structures « mixtes » avec des murs voiles couplés à des portiques .....	12
<b>Figure I.03 :</b> Structures à noyau central .....	13
<b>Figure I.04 :</b> Structure uniquement à murs porteur .....	12
<b>Figure I.05 :</b> Schéma d'un voile plein et disposition du ferrailage .....	15
<b>Figure I.06 :</b> Systèmes de structures à murs voiles .....	16
<b>Figure I.07 :</b> Modes de rupture de voiles élancés (Davidovici, 1985) .....	18
<b>Figure I.08 :</b> Modes de rupture de voiles élancés (Paulay , 1992) .....	18
<b>Figure I.09 :</b> Modes de rupture de voiles courts .....	19

### **Chapitre II : TECHNIQUES DE RENFORCEMENT**

<b>Figure II.01 :</b> Position diagonale de l'amortisseur .....	22
<b>Figure II.02 :</b> Position horizontale de l'amortisseur .....	22
<b>Figure II.03 :</b> Position hybride de l'amortisseur .....	22
<b>Figure II.04 :</b> Schéma de l'isolateur élastomérique avec noyau de plomb .....	24
<b>Figure II.05 :</b> Schéma de l'isolateur de type pendule à friction .....	24
<b>Figure II.06 :</b> Schéma de l'isolateur sismique Z-Tech .....	24
<b>Figure II.07 :</b> Confinement des colonnes .....	27
<b>Figure II.08 :</b> Géométrie et dimensions des voiles courts .....	28
<b>Figure II.09 :</b> Courbe charge déplacement en tête de voile .....	28

### **Chapitre III : GÉNÉRALITÉS SUR LES MATÉRIAUX COMPOSITES**

<b>Figure III.01 :</b> Quelques types des matériaux composites .....	30
<b>Figure III.02 :</b> Fibre de carbone .....	31
<b>Figure III.03 :</b> Fibre de verre .....	32
<b>Figure III.04 :</b> Fibre d'aramide .....	32
<b>Figure III.05 :</b> Les unidirectionnels (UD) .....	34
<b>Figure III.06 :</b> taffetas .....	34
<b>Figure III.07 :</b> Serge .....	35
<b>Figure III.08 :</b> Satin .....	35

### **Chapitre IV : ANALYSE DES MURS EN BÉTON ARMÉ RÉHABILITÉS**

<b>Figure IV.01 :</b> Élément mur sans rotation aux nœuds .....	41
<b>Figure IV.02 :</b> Élément mur avec rotation aux nœuds .....	42
<b>Figure IV.03 :</b> (a) Élément simplifié avec des déformations latérales négligées (b) Élément original 12 DDL (c) Élément de KWAN simplifié .....	43
<b>Figure IV.04 :</b> Concentration des renforts vers les bords dans une plaque en composite .....	44
<b>Figure IV.05 :</b> Le graphe de La distribution $vf1(x)=(ksi^{**}2)$ .....	46
<b>Figure IV.06 :</b> Le graphe de La distribution $vf2(x)=(1-(ksi^{**}2))$ .....	46
<b>Figure IV.07 :</b> Le graphe de La distribution $vf3(x)=(1/2+1/4*(ksi^{**}2))$ .....	47
<b>Figure IV.08 :</b> Le graphe de La distribution $vf4(x)=(1/2+1/2*(ksi^{**}2))$ .....	47
<b>Figure IV.09 :</b> Le graphe de la distribution $vf5(x)=(1/2-1/4*(ksi^{**}2))$ .....	48
<b>Figure IV.10 :</b> Le graphe de La distribution $vf6(x)=(1/2+1/2*(ksi^{**}2))$ .....	48
<b>Figure IV.11 :</b> Emplacement des patches .....	49
<b>Figure IV.12 :</b> Organigramme du programme principal .....	55
<b>Figure IV.13 :</b> Organigramme de la procédure de l'analyse statique linéaire .....	55
<b>Figure IV.14:</b> Organigramme de la procédure de calcul des valeurs et vecteurs propres .....	56



## **Chapitre V : ÉTUDE PARAMÉTRIQUE ET INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS**

<b>Figure V.1 :</b> Structures «mixtes » avec des murs voiles couplés à des portiques.....	58
<b>Figure V.2 :</b> Effet de type des matériaux de renforcement sur le déplacement des voiles .....	61
<b>Figure V.3:</b> l'effet de la Distribution des fibres $V_f$ sur le déplacement des voiles .....	62
<b>Figure V.4:</b> Effet d'épaisseur des matériaux de renforcement sur le déplacement des voiles.....	63
<b>Figure V.5:</b> Effet du ratio $sp/st$ sur le déplacement des voiles.....	64
<b>Figure V.6.a:</b> Effet des propriétés de l'adhésif ( $E_{ad}$ ) sur le déplacement des voiles.....	65
<b>Figure V.6.b:</b> Effet des propriétés de l'adhésif ( $v_{ad}$ ) sur le déplacement des voiles .....	66

## **Liste des Tableaux**

### **Chapitre III : GÉNÉRALITÉS SUR LES MATÉRIAUX COMPOSITES**

<b>Tableau III.1 :</b> Propriétés des fibres de carbone .....	31
<b>Tableau III.2 :</b> Principales caractéristiques mécaniques des fibres de base.....	33
<b>Tableau III 3 :</b> Propriétés physiques et mécaniques de quelques résines Après polymérisation	37
<b>Tableau III.4 :</b> Principales différences entre matrices thermoplastiques et thermodurcissable	37

### **Chapitre IV : ANALYSE DES MURS EN BÉTON ARMÉ RÉHABILITÉS**

<b>Figure IV.01 :</b> Les distributions des fibres proposées.....	45
---	----

## **Chapitre V : ÉTUDE PARAMÉTRIQUE ET INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS**

<b>Tableau V.1 :</b> Dimensions des structures étudiées .....	58
<b>Tableau V.2 :</b> paramètres mécaniques des matériaux utilisés.....	59
<b>Tableau V.3 :</b> Effet de type des matériaux de renforcement sur le déplacement des voiles .....	61
<b>Tableau V.4 :</b> l'effet de la Distribution des fibres : $V_f$ sur le déplacement des voiles.....	62
<b>Tableau V.5 :</b> Effet de l'épaisseur des matériaux de renforcement sur le déplacement des voiles...	63
<b>Tableau V.6 :</b> Effet du ratio $sp/st$ sur le déplacement des voiles .....	64
<b>Tableau V.7a :</b> Effet des propriétés de l'adhésif ( $E_{ad}$ ) sur le déplacement des voiles .....	65
<b>Tableau V.7b :</b> Effet des propriétés de l'adhésif ( $v_{ad}$ ) sur le déplacement des voiles .....	66

### **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.*

*La réhabilitation des structures constitue l'un des problèmes les plus délicats que rencontre le domaine de la construction, c'est un aspect très récent du Génie Civil. Les structures de bâtiments peuvent subir d'importants endommagements, qui sont dus aux effets de la corrosion engendrée par l'agressivité atmosphérique, ainsi que par des forces sismiques qui s'avèrent très destructrices. En plus des méthodes de réhabilitation traditionnelles (chemisage, gainage et injection d'une résine) souvent employées en Algérie à la suite de chaque séisme comme procédés de confortement, l'utilisation des plaques en matériaux composites doit être développée, compte tenu des avantages que procure ce type de renforcement.*

*En effet, beaucoup de recherches ont été menées ces dernières années pour L'analyse des structures en béton renforcées par des matériaux composites (S. Benyoucef, 2006 [01]), (A.Tounsi., 2006 [02]). Cependant peu de travaux dans ce domaine ont traité les murs de contreventement en béton armé :*

*( H.S. Shen , 2003 [03] ) , ( A. Balsamo, 2005 [04]),  
( S. A. Meftah , 2006 [05] ) , ( S.A. Meftah , 2008 [06]).  
( R.Yeghnem, et al 2009 [07] , ( R. Yeghnem, ' SICZS 2010'[08 ] )*

*L'objectif principal de cette étude est l'analyse des murs de contreventement en béton armé renforcés par des plaques en CFRP Comparées à ceux du modèle de référence (mur voile non renforcé).*

# ***CHAPITRE I***

## ***COMPORTEMENT DES MURS-VOILES***

### ***I.1: Généralités***

*Les murs-voiles, en anglais " shear-walls ", sont couramment utilisés dans les édifices élancés en béton armé, compte tenu de leur comportement, considéré comme satisfaisant vis-à-vis des forces latérales (dus au vent ou au séisme). Leur grande résistance et leur rigidité en plan contribuent à contrôler les déplacements globaux et à minimiser les déplacements inter-étages excessifs , Reprenant la plus grande partie des efforts latéraux, ils conditionnent le comportement des structures et jouent un rôle primordial pour la sécurité Par rapport à d'autres éléments structuraux ,(Davidovici, 1999 [09]).*

*Les constructions contreventées par des voiles en béton armé (en nombre suffisant) sont donc un type de « structure rigide » qui limite les déplacements relatifs des planchers beaucoup plus que ne le font les ossatures. Les éventuels dommages dans les zones critiques créent moins d'effondrements que pour les ossatures. La **Figure 1.1** présente deux immeubles voisins, à l'origine apparemment semblables mais inégaux face aux secousses sismiques, le premier montre un comportement excellent et le second est complètement ruiné.*



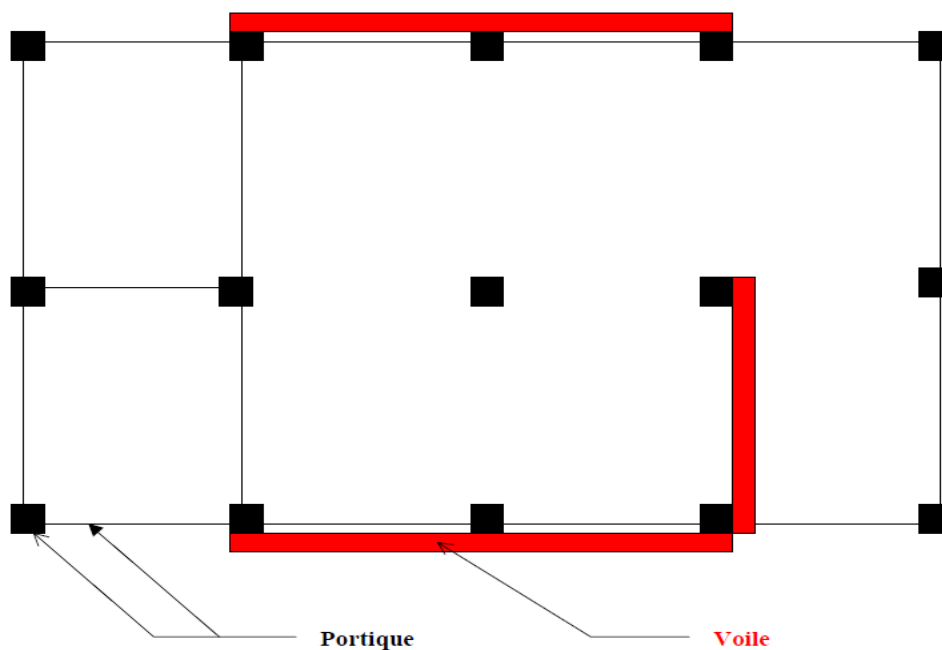
***Figure I.1: Comportement de deux immeubles voisins face aux secousses sismiques (zacek, 2008 [10])***

## I.2: Classification Et Catégories Des Constructions à Murs Voiles

Beaucoup d'immeubles privés ou de bureaux dans le monde sont construits en utilisant les voiles comme éléments principaux de résistance. Les voiles ou murs de contreventement peuvent être généralement définis comme des éléments verticaux à deux dimensions dont la raideur hors plan est négligeable. Dans leur plan, ils présentent généralement une grande résistance et une grande rigidité vis-à-vis des forces horizontales. Par contre, dans la direction perpendiculaire à leur plan, ils offrent très peu de résistance vis-à-vis des forces horizontales et ils doivent être contreventés par d'autres murs ou par des portiques. Tout en étant conscient de la grande variété des constructions à murs Voiles, nous ne pouvons fournir qu'une classification assez générale. A cet égard, trois grandes catégories peuvent être rencontrées:

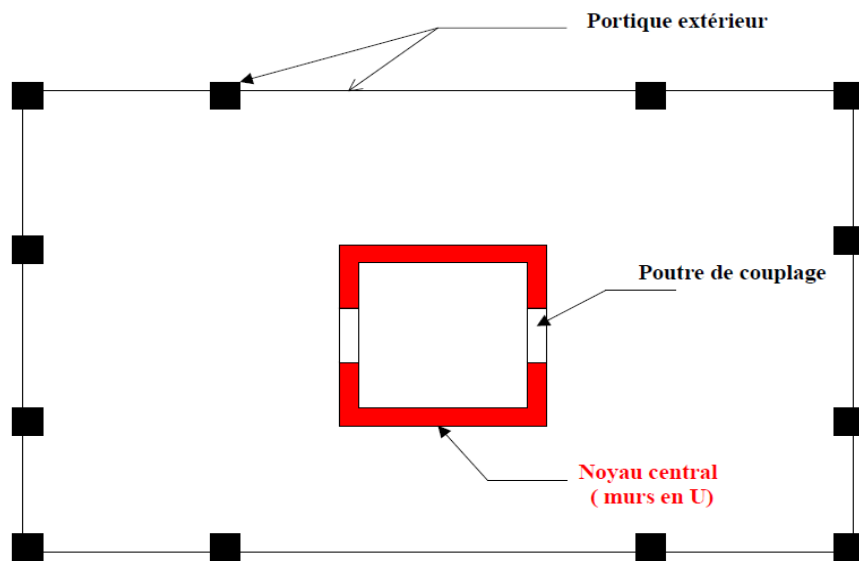
- 1) structures « mixtes » avec des murs porteurs associés à des portiques.
- 2) structures à noyau central,
- 3) structures uniquement à murs porteurs.

**Dans le cas 1),** le rôle porteur vis-à-vis des charges verticales est assuré par les poteaux et les poutres, tandis que les voiles assurent la résistance aux forces horizontales. Un exemple de ce système constructif est présenté dans la **Figure 1.2**.



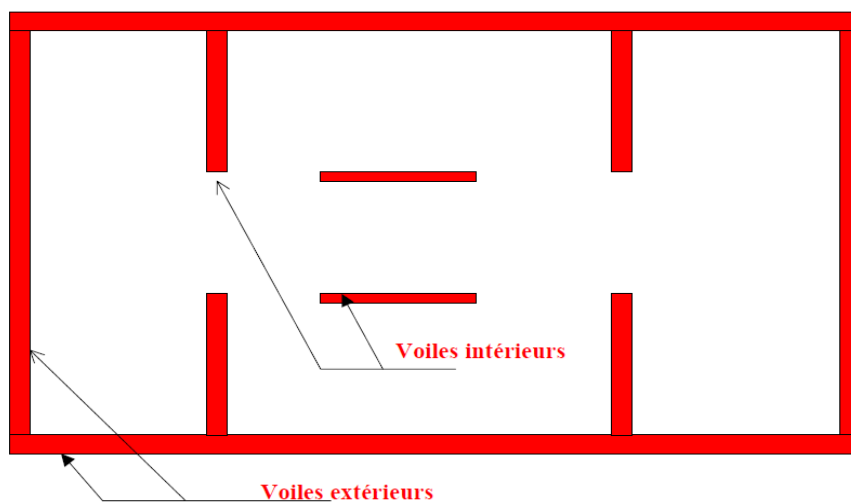
**Figure I.2: Structures « mixtes » avec des murs porteurs couplés à des portiques**

*Dans le cas 2), un noyau central formé de deux murs couplés à chaque étage par des poutres assure majoritairement la résistance aux forces horizontales. Une certaine résistance supplémentaire peut être apportée par les portiques extérieurs, comme le montre la **Figure 1.3***



*Figure I.3: Structures à noyau central*

*Dans les cas 3), les voiles assurent en même temps le rôle porteur vis-à-vis des charges verticales et le rôle de résistance aux forces horizontales. L'exemple montré dans la **Figure 1.4** fait apparaître ce système constructif.*



*Figure I.4: Structure uniquement à murs porteurs*

### **I.3: Calcul Des Murs voiles**

Une structure à ossature par refends est constituée par une série de murs voiles, linéaires ou non, pleins ou comportant des ouvertures, liés entre eux par des planchers. Lorsque les refends sont coulés dans des coffrages à leur emplacement définitif dans la construction, ils prennent le nom de murs en béton banché.

Le calcul d'un mur voile se déroule selon les trois phases successives suivantes :

- Étude de la distribution entre les divers refends de la constituant, de l'ensemble des actions ou sollicitations agissant sur la structure.
- Détermination, pour chaque élément constitutif du refend (linteaux, parties pleines, ...etc) des sollicitations agissant sur chaque section de calcul.
- Calcul des armatures pour chacun de ces éléments constitutifs.

#### **I.3.1: Distribution Des Charges Verticales**

Elle s'obtient en examinant le cheminement des efforts dans la structure depuis leur point d'application jusqu'aux fondations, en tenant compte de la nature des différentes liaisons. D'une façon générale, les charges sont distribuées en fonction des surfaces de plancher attribuées à chaque refend. Dans le cas des structures à refends uniquement transversaux ou longitudinaux, la structure peut être découpée de la manière la plus logique.

A défaut de justifications plus précises, les efforts verticaux qui sollicitent les murs Voiles seront évalués en faisant application de la loi de régression des surcharges. Les surcharges d'exploitation variables dans le temps devant être majorées de 20%.

Pour cette évaluation, on peut admettre la discontinuité des divers éléments de planchers au droit des murs ; toutefois, si le bâtiment comporte plusieurs travées solidaires, les charges ainsi obtenues sur les Voiles porteurs doivent être majorées de 15 % pour le mur central d'un bâtiment à deux travées, de 10 % pour les murs intermédiaires, s'il y a plus de deux travées.

#### **I.3.2: Distribution Des Charges Horizontales**

Soit une structure constituée de refends qui supportent un effort horizontal  $H$  ; sous l'action de  $H$ , le bâtiment subit une déformation, qu'on peut la décomposer en deux déformations élémentaires : une translation du bâtiment parallèle à  $H$ , sous l'action de  $H$  appliqué au centre de torsion défini ultérieurement, et une rotation du bâtiment autour d'un axe vertical passant par ce centre de torsion, sous l'action du couple créé par  $H$  autour de cet axe.

**On admettra les hypothèses suivantes**

- Les voiles sont parfaitement encastrés à leur base ;
- Le produit  $EI$  est constant sur toute la hauteur du voile;
- Les planchers ont une rigidité infinie dans leur plan horizontal : leurs déformations horizontales sont négligeables par rapport à celle des voiles.

Dans ces conditions, les calculs de résistance des matériaux indiquent que :

- L'effort repris par un refend est proportionnel à son inertie et à son déplacement ;
- Le centre de torsion est le barycentre des inerties des refends, appliquées en leur centre de gravité.

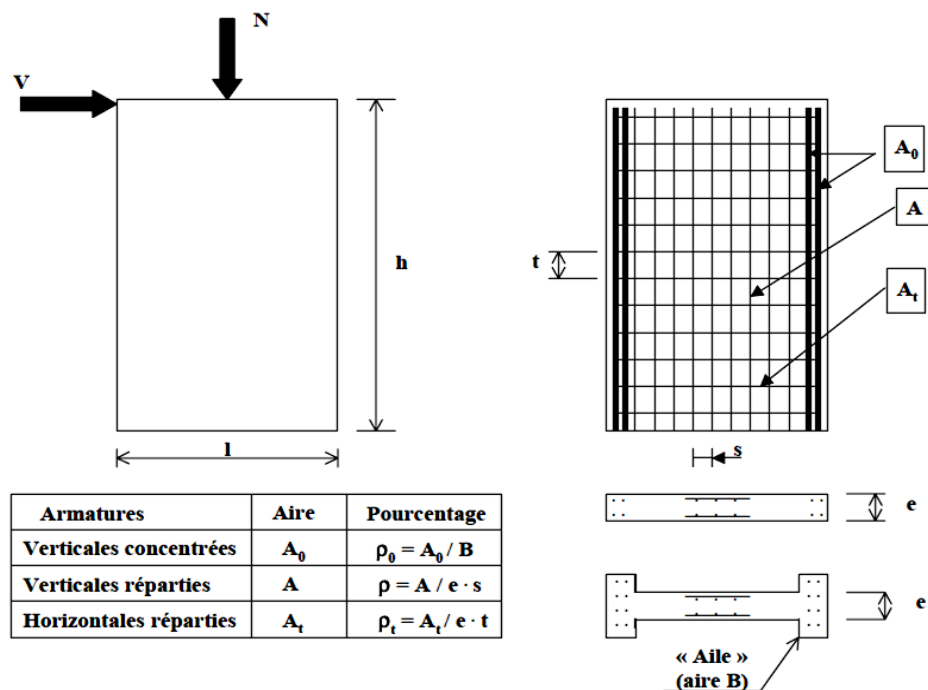
Ces résultats permettent de calculer la répartition d'un effort horizontal global appliqué à la structure entre les différents refends qui la constituent.

Le modèle le plus simple d'un voile est celui d'une console parfaitement encastrée à sa base. La **Figure 1.5** montre l'exemple d'un élément de section rectangulaire ou en I, soumis à une charge verticale  $N$  et une charge horizontale  $V$  en tête. Le voile est sollicité par un effort normal  $N$  et un effort tranchant  $V$  constante sur toute la hauteur et un moment fléchissant qui est maximal dans la section d'encastrement.

Le ferrailage classique du voile est composé :

- d'armatures verticales concentrées aux deux extrémités du voile ou aux ailes (pourcentage  $p_0$ ).
- d'armatures verticales uniformément réparties (pourcentage  $p$ )
- d'armatures horizontales (pourcentage  $p_t$ ), elles aussi uniformément réparties.

Les armatures verticales extrêmes sont soumises à d'importantes forces de traction/compression créant ainsi un couple capable d'équilibrer le moment appliqué. A la base du voile, sur une hauteur critique, des cadres sont disposés autour de ces armatures afin d'organiser la ductilité de ces zones. Enfin, les armatures de l'âme horizontales et verticales ont le rôle d'assurer la résistance à l'effort tranchant.



**Figure 1.5: Schéma d'un voile plein et disposition du ferrailage**

Le terme "voile" regroupe des éléments de structures au comportement mécanique très divers. Cependant, on peut considérer que les principaux paramètres ayant une influence prépondérante sur le comportement d'un voile, sont les suivants :

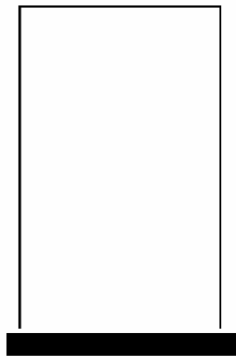
- 2) L'élancement, défini comme le rapport de la hauteur par la largeur du voile,  $h/l$ ,
- 3) La disposition et le pourcentage des armatures,
- 4) L'intensité de l'effort normal.

Du point de vue de leur fonctionnement il convient de faire la distinction entre les voiles élancés ( $h/l > 2$ ) et les voiles courts ( $h/l < 2$ ). Ceci, permet de mettre en évidence deux grandes familles de modes de ruptures : modes de rupture des voiles élancés et modes de ruptures des voiles courts. En s'appuyant sur les excellentes descriptions qu'on fait Fouré [11] et Paulay [12] ainsi que sur la classification donnée dans l'Eurocode 8 [13], nous présentons, en fonction de l'élancement du voile, les modes de ruine les plus souvent rencontrés et sont schématisés dans les Figures 1.7 et 1.8. et 1.9.

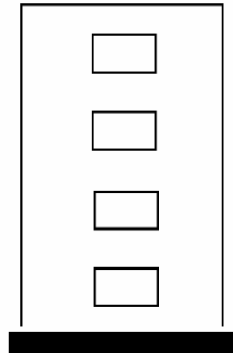


### I.4: Types De Systèmes Des Murs Voiles

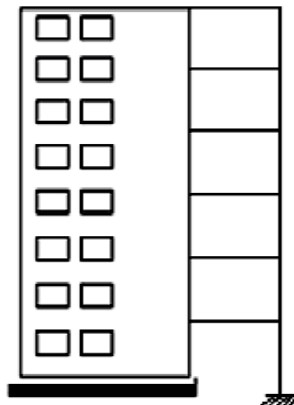
Les systèmes des murs Voiles sont représentés dans la figure suivante :



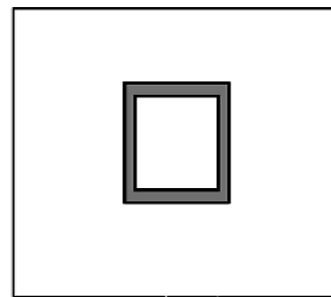
(a) : refend isolé monolithique



(b) : refend comportant une file d'ouvertures



(c) : refend associé à un portique



(d) : système à noyau

**Figure I.6: Systèmes de structures à murs voiles**

Les différents systèmes de murs sont montrés dans la **figure I- 6**. Le perçage des murs Voiles avec une ou plusieurs files d'ouvertures comme est montré dans la **figure I-6.b** mène parfois à un affaiblissement considérable de la structure. Cependant, ceci n'est pas toujours le cas, car les bâtiments conçus pour résister aux actions sismiques tels que les structures représentées dans la **figure I-6**, définis comme étant des murs résistant au cisaillement (coupled shear walls).

Les déformations inélastiques requises pour assurer l'amortissement nécessaire dans un refend isolé rigide et monolithique la **figure I-6.a** produisent une grande rotule plastique à la base du refend. Cependant, pour un refend comportant des files d'ouvertures, une grande partie, peut avoir dans les linteaux formant ainsi le système de couplage ou de liaison, dit, des différents éléments du refend (trumeaux). A cet effet, ces derniers peuvent eux-mêmes être protégés contre tout endommagement précoce.

## ***1.5: Modes de Fonctionnement Des Murs-Voiles***

### ***1.5.1: Modes de Fonctionnement Des Voiles Élancés***

#### ***1: Modes De Rupture Par Flexion***

**Mode (a1):** ruine par plastification en traction des armatures verticales et écrasement du béton comprimé. Ce mode de rupture " normal " se rencontre généralement dans les voiles très élancés lorsque: la flexion est prépondérante et que l'effort normal de compression est faible. C'est le schéma de fonctionnement le plus satisfaisant, qui correspond à la formation de rotule plastique au pied du mur voile avec une grande capacité de dissipation d'énergie.

**Mode (a2):** Rupture en flexion par écrasement du béton, qui apparaît pour des voiles assez fortement armés et sollicités en flexion avec un effort normal important. Le mode (a2) est moins ductile que le mode (a1), surtout dans le cas d'une structure rectangulaire (Nicolae Ile 2000) [14].

**Mode (a3):** Mode de ruine par rupture fragile des armatures verticales tendues, qui concerne les voiles faiblement armés en flexion, surtout si les armatures verticales sont essentiellement réparties et non concentrées aux bords. La ductilité et la capacité d'absorption d'énergie peuvent être améliorées en concentrant les armatures verticales aux extrémités.

#### ***2: Modes De Rupture Par Flexion/Cisaillement***

**Mode (b1):** Rupture par plastification des armatures verticales de flexion et des armatures transversales. Ce mode de rupture est rencontré dans les voiles moyennement élancés quand la flexion n'est plus prépondérante et où les armatures horizontales sont insuffisantes.

#### ***3: Modes de rupture par cisaillement***

Les deux derniers modes de rupture apparaissent quand le cisaillement devient prépondérant.

**Mode (b2):** Rupture par écrasement dans le béton de l'âme du voile (rupture des bielles de compression). Ce mode se produit dans les voiles munis de raidisseurs, fortement armés longitudinalement et transversalement et soumis à des cisaillements importants.

**Mode (g):** Rupture par glissement au niveau des reprises de bétonnage. Ce mode de rupture qui caractérise plutôt les voiles courts a été aussi observé dans le 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 trop faible.

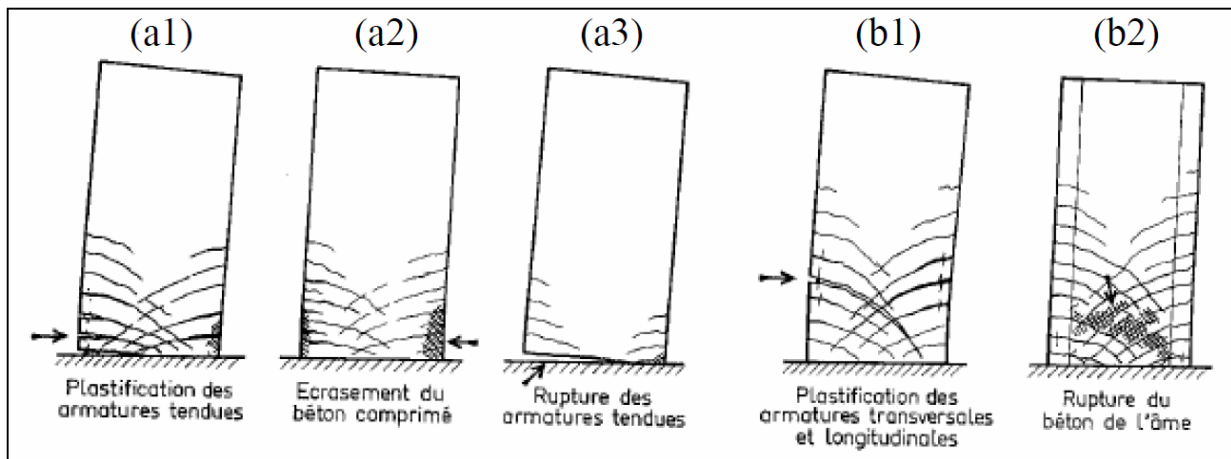


Figure I.7: Modes de rupture de voiles élancés (Davidovici ., 1985) [15]

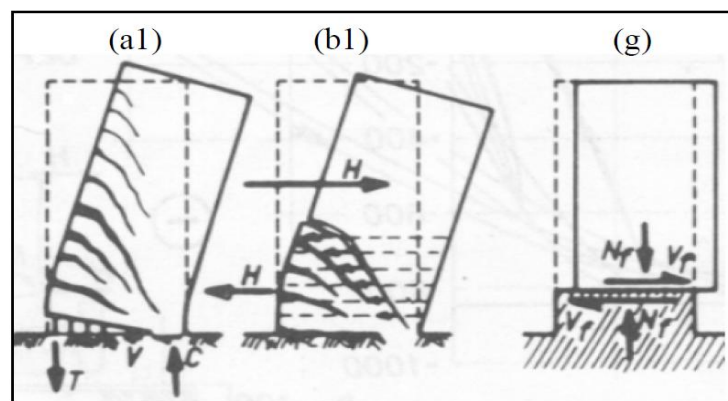


Figure I.8: Modes de rupture de voiles élancés (Paulay et al., 1992) [12]

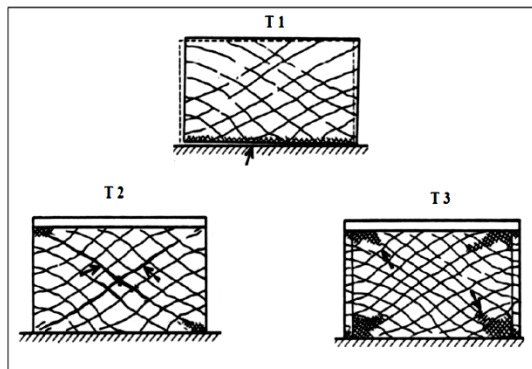
### I.5.2: Modes de rupture des voiles courtes

Dans ce cas, l'effort tranchant est généralement prépondérant sur la flexion. Les principaux modes de ruptures sont ceux de la Figure 1.8. On distingue trois cas :

**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 aussi être obtenu lorsque les armatures verticales réparties sont insuffisantes.

**Mode T2:** rupture diagonale (« diagonal tension failure ») avec plastification ou rupture ces armatures le long des fissures diagonales. Ce mode est rencontré dans les voiles moyennement armés sollicités par un faible effort normal.

**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 voies fortement armés, surtout s'ils sont associés à des raidisseurs sur leur bord,



(Davidovici , 1985) [15]

	T 3	T 2	T 1
FAILURE MODE			
	WEB DIAGONAL FAILURE (compression)      (tension)		HORIZONTAL SLIDING
CAUSE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Insufficient web thickness</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Insufficient wall's base detailing (anchoring, splicing)</li> <li>• Low <math>M_0</math>-values</li> </ul>
EXPECTED RESPONSE			

(Paulay , 1992) [12]

Figure I.9 : Modes de rupture de voiles courts

## I.6: Quelques Principes De Dimensionnement

La plupart des codes de constructions essaient de dimensionner des bâtiments au séisme de façon que l'énergie sismique apportée puisse être absorbée et dissipée par des déformations inélastiques de la structure. Ces déformations sont bien supérieures à celles qui sont généralement admises sous d'autres chargements, mais en contrepartie les efforts sismiques sont plus faibles que ceux qui seraient calculés en supposant un comportement parfaitement élastique.

Le concept en vigueur dans la plupart des codes dont l'**Eurocode 8[13]** et celui de « capacité design » qui prévoit la formation d'un mode de rupture par création d'une rotule plastique à la partie inférieure d'un voile supposé encastré à sa base. Une grande capacité de déformation ductile est organisée dans cette région (zone critique) tout en assurant un comportement élastique au-dessus de la zone; critique. Pour atteindre une grande capacité d'absorption et de dissipation d'énergie, les sources potentielles de rupture fragile: par effort tranchant doivent être éliminées en s'assurant que la plastification de la zone critique intervient en premier. L'augmentation de la ductilité dans une section passe par la présence des cadres disposés autour des armatures verticales dans les zones confinées.

S'agissant des structures de type voiles, les **règles françaises PS 92[16]** adoptent un principe de conception différent : le fonctionnement d'un voile doit permettre de mobiliser à la fois une dissipation d'énergie par endommagement du béton et plastification des aciers et une transformation d'énergie par soulèvement des masses. On admet ainsi que la fissuration et la plastification de l'acier peuvent se produire sur une hauteur plus grande que la zone critique. Dans la zone critique le béton n'est pas confiné, mais en contrepartie les contraintes dans le béton doivent rester limitées. Des dispositions sont également prises pour éviter une rupture fragile par effort tranchant. Cette méthode alternative permet alors de concevoir des voiles faiblement armés. Sous l'action sismique, ces voiles devraient avoir un fonctionnement « multi fusible », résiliant d'une ductilité répartie et d'une fissuration distribuée sur la hauteur du voile.

## ***CHAPITRE II***

### ***TECHNIQUES DE RENFORCEMENT***

## II.1: Introduction

Les ouvrages en BA sont souvent soumis à des sérieux défis climatiques ou sismiques, et il est important de concevoir des renforcements à la fois durables et économiques. La réparation d'un ouvrage en BA n'est efficace que si elle remet cet ouvrage dans un état de service satisfaisant et durable qui n'exigera aucune intervention sérieuse pendant encore plusieurs années.

Pour prendre de bonnes décisions en matière de renforcement d'ouvrage en BA, il faut tenir compte de plusieurs facteurs :

### II.1.1: La première étape du processus

Consiste à déterminer Le bon choix du matériau de réparation qui dépend des conditions de service (par exemple circulation dense ou charges dynamiques, température, etc.) et des conditions de travail au moment des réparations. Les facteurs à prendre en compte sont entre autres :

- **Les Propriétés Des Matériaux:** Les propriétés des matériaux conditionnent la durée des réparations avant la reprise du chargement, la durée d'emploi des matériaux de réparation, la superficie couverte, les techniques d'application et le budget. Il faudra par exemple utiliser un matériau de réparation à séchage rapide si le temps d'arrêt de la circulation doit être le plus court possible.
- **L'humidité :** Une humidité élevée dans le béton en place réduit les options de réparation. En effet, l'humidité peut entraîner des problèmes de mûrissement pour certains matériaux polymériques (déamination, boursouflures, etc.).
- **La Température:** La température au moment des réparations conditionne la vitesse de mûrissement des matériaux cimentaires et polymériques et donc la résistance des surfaces réparées lors de la reprise de la circulation.
- **L'orientation:** L'orientation de la surface à réparer (verticale ou horizontale) conditionne la consistance optimale (écoulement ou non – affaissement) des matériaux de réparation et de la technique de mise en place ou de réparation.
- **La Spécificité De Certains Matériaux:** De nombreux matériaux, comme les revêtements, les membranes et adhésifs, s'appliquent dans des conditions spécifiques qui conditionnent la préparation de la surface à réparer. Pour les revêtements minces, par exemple, la surface à réparer devra être relativement lisse.

### II.1.2: La deuxième étape

Consiste à choisir une technique de renforcements compatible avec les propriétés physiques et chimiques du béton à renforcée. En outre, il ne faudra pas oublier de tenir compte des contraintes liées aux conditions de service et d'application.

Lorsqu'on évalue les différentes options de renforcement, il ne faut pas oublier de confronter le coût des renforcements et leur durée de service. Idéalement, le choix se portera sur la méthode dont le rapport coût/efficacité est le plus petit possible.

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

- **Le mécanisme d'absorption d'énergie ;**
- **Utilisation d'un système d'isolation à la base ;**
- **L'emploi des matériaux composites comme matériaux renforts (présente étude).**



## II.2: Le mécanisme d'absorption d'énergie (l'amortisseur)

### II.2.1: 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 ( $C_0$ )

### II.2.2: Description du modèle amorti

Le mécanisme d'amortissement est placé au niveau des ouvertures contenues dans le voile. Toute fois, il existe plusieurs configurations d'emplacements :

#### (1) Position diagonale de l'amortisseur

Le système est placé sur la diagonale

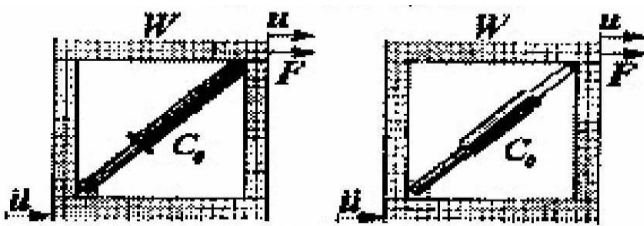


Figure II.1: Position diagonale

#### (2) Position horizontale de l'amortisseur

L'amortisseur est placé horizontalement.

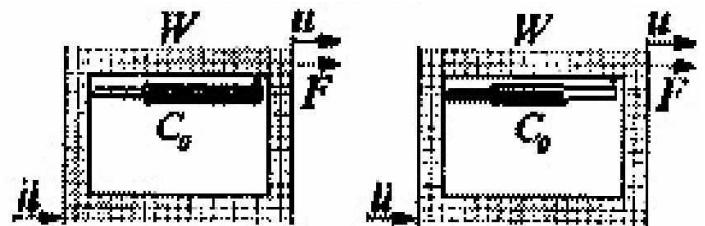


Figure II.2: Position horizontale

#### (3) Position hybride

Ce modèle combine les deux modèles sus cités

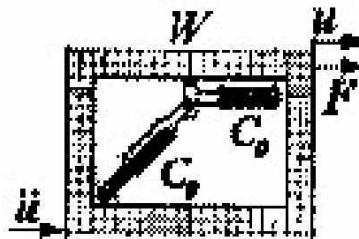


Figure II.3: Système d'amortissement hybride

### II.2.3: 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.

## **II.3: Utilisation d'un système d'isolation à la base**

### **II.3.1: Revue historique**

*Ce paragraphe traite l'isolation sismique et d'autres technologies parasismiques modernes avec une attention particulière aux développements mondiaux. Dans ce qui suit, on présente un développement historique de l'isolation sismique à la base, les principes et fondements théoriques de cette discipline ainsi qu'une brève revue des principaux systèmes d'isolation utilisés.*

*Un exemple typique de ce modèle est présenté. Le tremblement de terre de San Fernando (1971) a mis en évidence plusieurs lacunes majeures dans les règles de conception des ponts.*

*En particulier, l'insuffisance des forces sismiques prescrites pour la conception des ponts construits dans des régions à forte séismicité. Plusieurs ajustements importants dans les spécifications des normes de calcul de ces ouvrages ont été apportés. Néanmoins, les dommages très sévères subits par les structures lors de récents tremblements de terre de Northridge (Californie) 1994 et celui de Kobé (Japon) 1995 ont démontré la vulnérabilité des structures, y compris celles conçues avec des normes modernes,*

*Or, depuis les années 1970, le domaine du génie parasismique a connu des percées importantes catalysées entre autres par le développement de techniques de calcul sur support informatique beaucoup plus puissantes qu'auparavant et les installations d'essais tel que les simulateurs sismiques (tables vibrantes). Ceci a favorisé l'émergence de plusieurs technologies innovatrices dont les premières applications aux ouvrages rapportées en Amérique du Nord remonte seulement à la fin des années 80 et pour les quelles des normes de calcul sont désormais en place. Dans sa plus récente édition, la conception et la mise à l'essai des systèmes d'isolation sismique à la base pour les structures s'est propagée. En effet, en général, l'isolation sismique permet de réaliser des économies sur le coût de la construction de l'ouvrage en plus de présenter un avantage indéniable à long terme étant donné qu'elle préserve la fonctionnalité de l'ouvrage après séisme et élimine le coût de reconstruction.*

### **II.3.2: L'isolation sismique à la base**

*L'isolation sismique à la base consiste à découpler le mouvement du sol du mouvement de la structure dans le but de réduire les forces transmises à cette dernière. Les forces sismiques exercées sur la structure isolée sont typiquement de l'ordre de 3 à 10 fois plus petites que la demande en force sur la structure non isolée. L'isolateur capte les déformations (inélastiques) et filtre les accélérations (hautes fréquences) de sorte que la superstructure isolée (au dessus) se déplace essentiellement selon un mode rigide subissant de faibles accélérations et presque pas de déformations. Par conséquent, les forces d'inertie transmises aux éléments de fondations sont limitées et demeurent en deçà de la capacité élastique de tels éléments. Ce comportement se traduit par la limitation des dommages subis par la superstructure et les éléments de fondation et par la préservation de la fonctionnalité de la structure après le séisme.*

### **II.3.3: Principaux types de systèmes d'isolation**

*Il existe une multitude de systèmes d'isolation dont l'application a été plus au moins répandue et une revue exhaustive de ces systèmes dépasse le cadre de cette revue. Néanmoins, on peut grossièrement classer les systèmes d'isolation sismiques en deux catégories :*



### II.3.3.1: Les systèmes à base d'élastomère

Ces systèmes exploitent le principe de l'appui fretté et sa flexibilité latérale. Il existe plusieurs variantes dans cette catégorie d'appui tel que les appuis frettés avec élastomère à haut taux d'amortissement (par hystérésis interne). Néanmoins, le système d'isolateur à base d'élastomère est l'isolateur à base d'appui fretté avec un noyau de plomb intégré à l'intérieur de l'appui tel qu'illustré à la figure II-4.

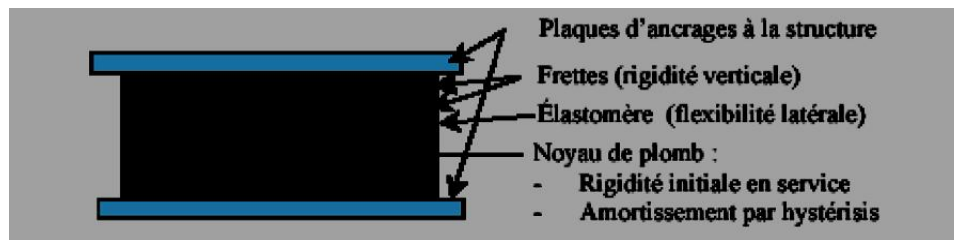


Figure II.4: Schéma de l'isolateur élastomère avec noyau de plomb

### II.3.3.2: Les systèmes à base de glissement

Ces systèmes permettent le découplage des mouvements de la superstructure de ceux des éléments de fondation au moyen d'interface de glissement. De plus, l'interface de glissement permet de dissiper l'énergie sismique par friction. A titre d'exemple, le système de pendule à friction est un système qui utilise un interface de glissement sous forme de cuvette (portion d'une sphère) qui confère à la structure un mouvement global similaire à un pendule. Le rayon de courbure et le coefficient de frottement de l'interface sont les caractéristiques clé qui contrôlent la période d'isolation et la quantité d'énergie dissipée du système. La figure II-5 montre le système cité.

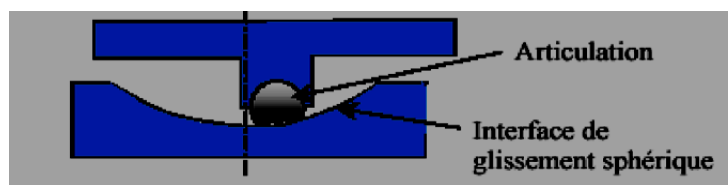


Figure II.5: Schéma de l'isolateur de type pendule à friction

### II.3.3.3: Système d'isolation à base d'élastomère confiné

Un système était développé destiné à l'isolation sismique des ponts et viaducs. Tel qu'il est montré dans la figure II- 6, le système est composé d'un appui de pont à élastomère confiné avec un système de recentrage à comportement élastique et un interface de glissement en acier inoxydable - Téflon pour la dissipation de l'énergie.

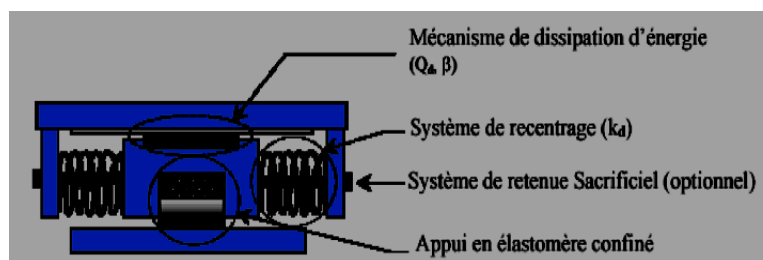


Figure II.6: Schéma de l'isolateur sismique Z-Tech

**Remarques:** L'utilisation d'un système d'isolation à la base nécessite un appareillage de grande fiabilité, ce qui contribue à la hausse du coût de cette technique, rendant ainsi cette solution applicable que pour les ouvrages importants (ponts, viaducs,...etc.).

## II.4: Procédés De Renforcement Des Structures par matériaux composites

### II.4.1: Renforcement Des Poutres Par Des Plaques D'acier

Lors des premiers travaux de réhabilitation, effectués depuis plusieurs années, on a utilisé des plaques d'acier pour renforcer des éléments de structures et particulièrement les poutrelles en béton armé. **Saadatmanesh et ehsani [17]** rapportent qu'en 1964, en Afrique du Sud, les poutres d'un bâtiment ont été renforcées par des plaques d'acier.

Depuis, d'autres exemples Sont apparus en Grande Bretagne en Suisse et au Japon. **Henwood et O'connell [18]** rapportent que plus de 30 structures ont été renforcées par collage des plaques d'acier en Grande Bretagne entre 1974 et 1994.

Les plaques d'acier qui ont servi de renforcement ont été ancrées par des boulons, par des bandes ou simplement sans ancrage. Leurs épaisseurs variaient d'une poutre à une autre. Les résultats des essais ont montré que le mode et le détail d'ancrage ont une influence directe sur la résistance ultime des poutres. L'utilisation de boulons n'empêche pas le décollement de la plaque mais évite toute fois la séparation. Les meilleures performances ont été obtenues avec des poutres renforcées par des plaques épaisses collées et ancrées par des boulons. **SWAMY et JONES [19]** rapportent que le renforcement des poutres en béton armé par des plaques en acier est une méthode relativement simple et, pour certains cas, elle est très efficace et ne conduit qu'à une faible augmentation de la profondeur de la poutre. La plaque permet par ailleurs de réduire les déformations et les flèches, de retarder l'initiation des fissures et d'augmenter les charges de service. Quand la rupture de la poutre dépend de limite élastique de la plaque, la résistance ultime peut être prédite en utilisant la théorie de calcul du béton. L'augmentation de cette résistance varie entre 20 et 40%.

Cependant, le renforcement par des plaques nécessite certaines précautions afin d'éviter les ruptures prématurées causées par le décollement des plaques. D'autre part, comme les plaques de renforcement sont exposées à l'air libre en pratique, une protection spéciale contre la corrosion peut être nécessaire. **Roberts [20]** a développé un modèle théorique simple pour prédire les concentrations des contraintes normales et du cisaillement le long de la couche de colle dans l'interface plaque d'acier - poutre en béton armé. Il a testé une plaque d'acier collée à une poutre avec une couche d'adhésif dont les constantes de rigidité normales et de cisaillement sont connues. Pour obtenir son modèle théorique, Il a superposé le résultat de deux étapes. D'abord, il suppose une adhérence parfaite entre la plaque et la poutre, ensuite il tient compte des conditions limites aux bords de la plaque. L'auteur affirme toutefois que la première étape pouvait introduire une sous-évaluation des contraintes de l'ordre de 30%. Il est à noter que même si l'utilisation des plaques d'acier est une méthode économique de renforcement, elle reste assez difficile et laborieuse. Ainsi, **Henwood et O'connell [18]** ont rapporté un cas pratique de renforcement d'un tablier du pont Bolney Flyover, en Grande Bretagne. Un total de 676 plaques de 360 mm de largeur, 6 mm d'épaisseur et un peu plus de 6 m de longueur ont été utilisées.

Le poids de chaque plaque est de 100 Kg environ pour un total de 70 tonnes d'acier qui ont été levées et ancrées par des boulons. En plus, du problème de poids, une précaution particulière était nécessaire pour que les plaques ne se déforment pas durant le transport et la manutention. La cadence de travail ne permettait pas le collage de plus de 10 plaques par jour. Par conséquent, 26 semaines ont été nécessaires pour terminer le projet. La substitution des plaques d'acier par des plaques de FRP s'avère donc impérative.

**II.4.2: Renforcement Des Structures Par Collage D'armatures à Base De Fibres De Carbone**

*Les procédés de réparation en fibre de carbone sont destinés à réparer et à renforcer les structures par le collage d'armatures passives, par un matériau composite à base de fibres de carbone noyées dans une matrice polymère. Ils s'appliquent, après diagnostic, à toute structure d'ouvrages neuf ou anciens pour laquelle une augmentation de la capacité portante est recherchée. Ils permettent d'accroître la résistance aux moments de flexion et aux efforts de traction, et la résistance à l'effort tranchant.*

*Ces procédés concernent les structures en béton armé ou précontraint et sont particulièrement adaptés pour traiter les cas suivants :*

- renforcement de structures difficiles d'accès ou encombrées par des gaines, tuyauteries, etc.*
- augmentation des charges d'exploitation.*
- ferrailage insuffisant par conception, défaut de positionnement.*
- création d'ouvertures : trémies.*
- endommagement de l'existant : corrosion ou sectionnement d'armatures, dommage par accident.*
- amélioration des conditions de service : réduction de flèche de plancher, réduction des contraintes dans les armatures, réduction d'ouverture de fissures. Par rapport à d'autres techniques de renforcement de structures, ces procédés se caractérisent par :*
  - une mise en œuvre aisée, sans moyens auxiliaires lourds.*
  - un faible poids propre (pas de surcharge de l'existant).*
  - une inertie en atmosphère agressive (réduction des coûts de maintenance).*

*Le dimensionnement des éléments de renforcement, en particulier la section, la longueur et le positionnement des renforts composites, doit être réalisé par un Bureau d'Etudes expérimenté en calcul de renforcement de structures.*

*Le bon fonctionnement d'une réparation ou d'un renforcement par le procédé de renforcement des structures par collage d'armatures à base de fibres de carbone exige un support de bonne qualité. Les caractéristiques indiquées ci après sont considérées comme minimales :*

- cohésion superficielle après préparation du support : 1,5 MPa (essai de traction directe),*
- support sec et âgé de 28 jours au moins. On entend par support sec, un béton ayant une humidité inférieure à 5 %.*

*Dans tous les cas, un diagnostic du support par un organisme spécialisé est recommandé pour déterminer, en particulier, l'état du béton et des aciers (consulter le fournisseur). La réparation des dégradations superficielles du béton doit être traitée.*

### II.4.3: Renforcement Des Poutres (En Flexion) Par Collage Des FRP

Plusieurs études ont été effectuées sur le renforcement en flexion avec des composites, dans le but d'augmenter la charge de service, la charge ultime et la rigidité de poutres en béton armé. De façon générale, le renfort de composite en flexion est appliqué sur la face inférieure tendue d'une poutre. Ceci permet d'augmenter la résistance en tension dans la partie inférieure de la poutre qui sera contre balancée par le béton en compression dans la partie supérieure. Par conséquent, le moment résistant est amélioré.

D'après les études de **Meier et Kaiser**[21] , **Saadatmanesh et Ehsani** [17] , **Heffernan et Erki** [22] **DJELAL .** [23] **M'bazaa** [24] , diverses conclusions peuvent être tirées concernant le comportement général d'une poutre en béton armé renforcée en flexion avec des composites. En effet, l'ajout d'une plaque en composite sur la face tendue d'une poutre permet d'améliorer sa résistance en flexion de façon significative. En résumé, les travaux de recherche ont démontré ce qui suit:

- Une augmentation de résistance en flexion peut être atteinte par collage d'une plaque de matériaux composites sur la face tendue d'une poutre en béton armé.
- Le gain possible de résistance en flexion dépend en grande partie du pourcentage d'armature présent dans la section.
- Le composite contribue à augmenter la rigidité de la poutre et à diminuer les flèches.
- Une attention particulière doit être apportée à l'ancrage des plaques de composite.

Afin d'éviter un mode de rupture soudain et de garantir une ductilité suffisante à l'élément structural renforcé.

### II.4.4: Renforcement Des Colonnes Par Des Enveloppes En FPR

La technique de renforcement, propre aux colonnes en béton armé, consiste à envelopper ces colonnes de feuilles de FRP, Les fibres sont placées dans la direction circonférentielle (**figure II.8**).

Cette enveloppe crée un effet de confinement du béton qui augmente la résistance de la colonne aussi bien à la compression qu'au cisaillement. **Neale et al.** [25] rapportent que certaines recherches ont montré que cette méthode améliorerait le comportement des colonnes soumises à des chargements sismiques.



**Fig. II .7: Confinement des colonnes**



#### II.4.5: Renforcement Des Voiles Courts En BA ( E. Ferrier\*[26] )

Le type de mur retenu est celui déjà étudié par **Greifenhagen [27]** . Les essais vont mettre en évidence l'apport du renfort par matériaux composites sur des voiles courts ( $H / L < 2$ ).

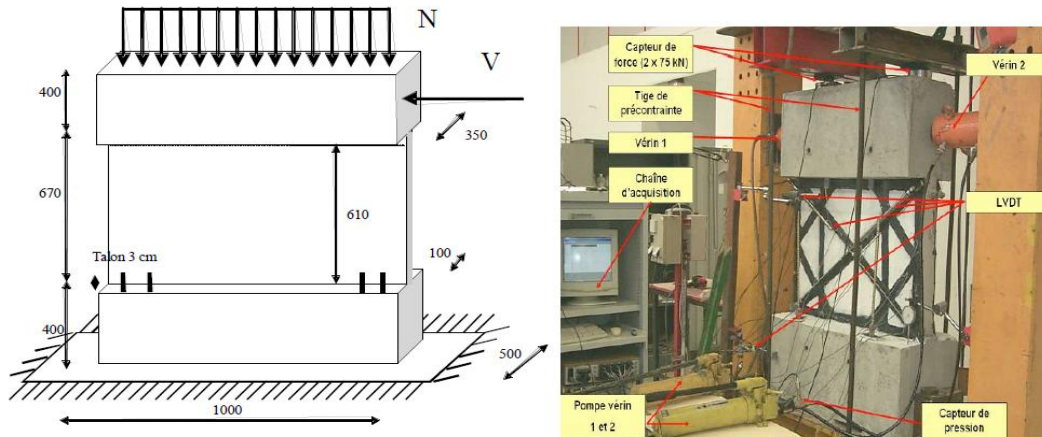


Figure II.8: Géométrie et dimensions des voiles courts

Le rapport hauteur sur largeur est inférieur à deux, ( $H / L < 2$ ), il s'agit donc bien d'un voile court. Les dimensions du voile permettent d'obtenir un mur modèle à une échelle de 1/3 d'un mur réel. Le ferrailage du voile est conforme aux recommandations minimales de l'Eurocode. Notre premier voile sera alors en béton armé sans renfort. Il est noté V1 Le second voile sera renforcé par des bandes de composite ROCC®. Il s'agit d'un composite carbone époxy stratifié au contact. Les fibres de carbone haute résistance sont unidirectionnelles et le grammage du tissu est de 600 g/m<sup>2</sup>. La matrice utilisée est une époxy dont la cure est effectuée à froid (température ambiante 20 °C).

Les propriétés mécaniques du composite sont les suivantes un module d'élasticité 80 GPa, une résistance 880 MPa et une épaisseur nominal de 1 mm, la largeur des bandes de renforcement est de 50 mm. La répartition du composite est établie de façon à limiter la fissuration du voile par un mécanisme de pontage de fissure. Pour augmenter les performances du renforcement et d'éviter une rupture par flexion à la jonction voile/semelle, l'ancrage des renforts est amélioré par l'utilisation de mèches d'ancrage (V3). Le béton est identique pour les trois voiles (résistance à la compression de  $35 \pm 0,5$  MPa).

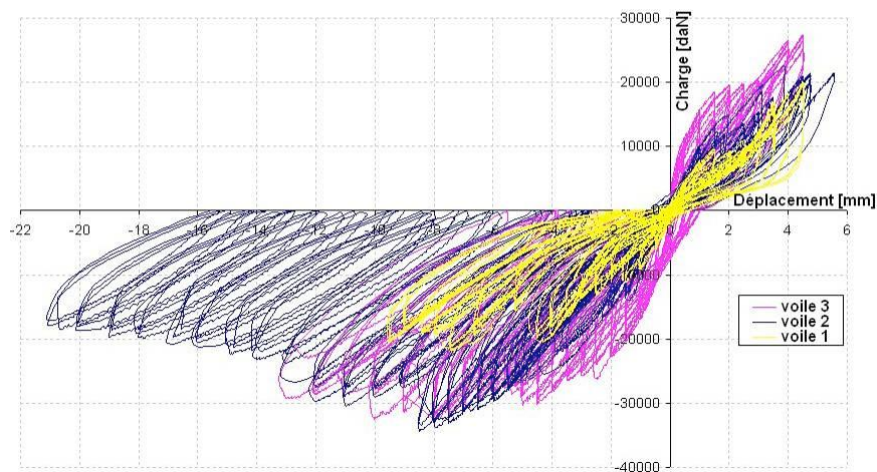


Figure II.9: Courbe charge déplacement en tête de voile

# ***CHAPITRE III***

## ***GÉNÉRALITÉS SUR LES MATÉRIAUX COMPOSITES***

**III.1: Introduction [ 28 ]**

*Un matériau composite est une combinaison de deux matériaux distincts que l'on appelle généralement la matrice et le renfort, aux propriétés souvent complémentaires, qui associés possède des caractéristiques physiques complètement différentes de leurs composants. La matrice a généralement pour rôle mécanique de fournir une certaine cohésion entre les différents éléments de renfort et ainsi joue le rôle de « ciment » en assurant un minimum d'homogénéité à l'ensemble.*

*Dans la majorité des matériaux composites, les propriétés mécaniques sont essentiellement fournies par les renforts, de telle sorte que le taux de renfort dans la matrice ainsi que la qualité de l'interface renfort / matrice conditionnent directement les propriétés mécaniques du matériau composite.*

*Les renforts peuvent se trouver utilisés sous différentes formes, comme par exemple en fibres longues, en fibres courtes, en sphères et même en tissu de fibres plus ou moins complexe (tissage 2D, voire même 3D). Ainsi, de nos jours, un très grand nombre de composites sont utilisés de manière courante et il est pratiquement impossible de les traiter tous de la même manière, tant leurs propriétés sont variables. Cependant, nous pouvons distinguer quelques familles de composites en fonction du type de matrice et de renfort utilisés.*

*Du point de vue des applications industrielles, les composites les plus répandus sont caractérisés généralement par une matrice polymère et des renforts sous forme de fibres longues tissées ou non.*

*Les principales fibres employées aujourd'hui sont de type fibres de verre pour les applications à coûts réduits, ainsi que fibres de carbone et aramide pour les applications plus exigeantes.*



**Fig. III.1: Quelques types des matériaux composites**

### III.2: Les renforts [28 ]

#### III.2.1: Revue des différents renforts disponibles :

Les principales fibres utilisées sont :

##### a) Fibre de carbone

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile), actuellement trois sortes sont commercialisées :

- Les fibres haute résistance classique (types : As4, As6, T300 et X635)
- Les fibres à haute résistance module intermédiaire (types :IM6, X636) ;
- Les fibres à haut module (types :M40 et HM5).

L'utilisation de la fibre de carbone reste limitée aux secteurs de l'aéronautique et des sports et loisir, à cause du prix.

Cependant, Les fibres de carbone souffrent aussi de handicaps techniques qui limitent également leur utilisation pour certaines applications dans les composites :

- un allongement à la rupture insuffisant (inférieur à 2%) comparé à celui des fibres de verre et d'aramide (3 à 4%) ;
- une caractérisation encore insuffisante pour permettre une conception fiable à prix modéré.

##### Les propriétés en traction des fibres de carbone sont

- Résistance à la rupture RT.
- Module de Young E0T.
- L'allongement à la rupture AR.
- La masse volumique.

Propriétés en traction	HR		IM	HM	
Rt(MPa)	3000 à 5000	4000 à 4500	47000 à 52000	2000 à 2500	1100 à 2000
E0T(MPa)	220000 à 240000	235000 à 250000	275000 à 300000	350000 à 400000	450000 à 500000
AR(%)	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 <sup>3</sup> )	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

Tableau III.1: propriétés des fibres de carbone

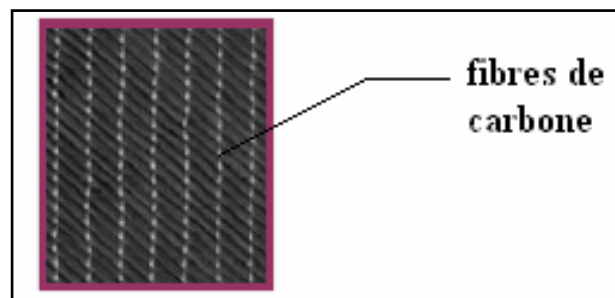


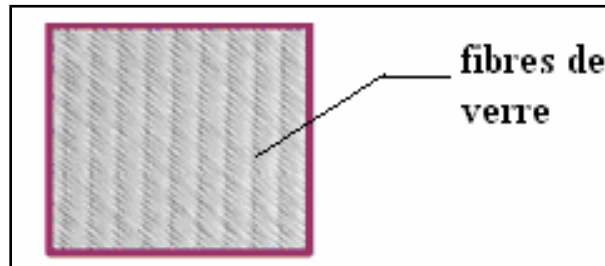
Fig. III.2: Fibre de carbone



**b) Fibre de verre**

Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). On distingue trois types de fibres :

- E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;
- +· R : pour les composites hautes performances ;
- D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).

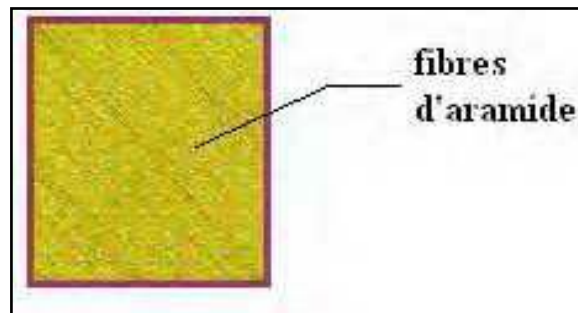


**Fig III.3: Fibre de verre**

**c) Fibre d'aramide**

Souvent appelée KEVLAR®, la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes :

- les fibres bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles ;
- les fibres haut module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances.



**Fig III.4: Fibre d'aramide**

**d) Fibre de bore**

Les fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène.

**e) Fibre de silice (ou de quartz)**

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

**f) Fibres de polyéthylène de haut module**

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

## III.2 .2: Principales caractéristiques mécaniques des fibres de base

<i>Fibre</i>	<i>Densité</i>	<i>Charge de rupture en traction en MPa</i>	<i>Charge de rupture en compression MPa</i>	<i>Allongnt à la Rupture en %</i>	<i>Module d'élasticité longi en MPa</i>	<i>Diamètre du filament élémentaire En <math>\mu m</math></i>
<i>Verre E</i>	2.54	3400	1200	4.8	73000	3 – 30
<i>Verre R</i>	2.48	4400	1300	5.4	86000	3 – 30
<i>Aramide bas module</i>	1.45	3100	500	2	70000	12
<i>Aramide haut module</i>	1.45	3100	500	1	130000	12
<i>Carbone Haute ténacité</i>	1.78	2800	1800	0.5	200000	8
<i>Carbone Haut module</i>	1.8	2200	1300		400000	8
<i>Bore</i>	2.63	3500	3500	0.8	400000	100 – 200
<i>Acier XC10</i>	7.85	1000			210000	
<i>Aluminium</i>	2.63	358			69800	

Tableau III.2: Principales caractéristiques mécaniques des fibres de base

### III.2.3: Architecture des renforts

Les structures composites sont anisotropes. La plupart des renforts travaillent bien en traction, mais offrent de moins bonnes performances en compression et cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée.

Il existe différentes géométries et textures de renforts :

- **Les unidirectionnels (UD)**

Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Taux de déséquilibre très grand.

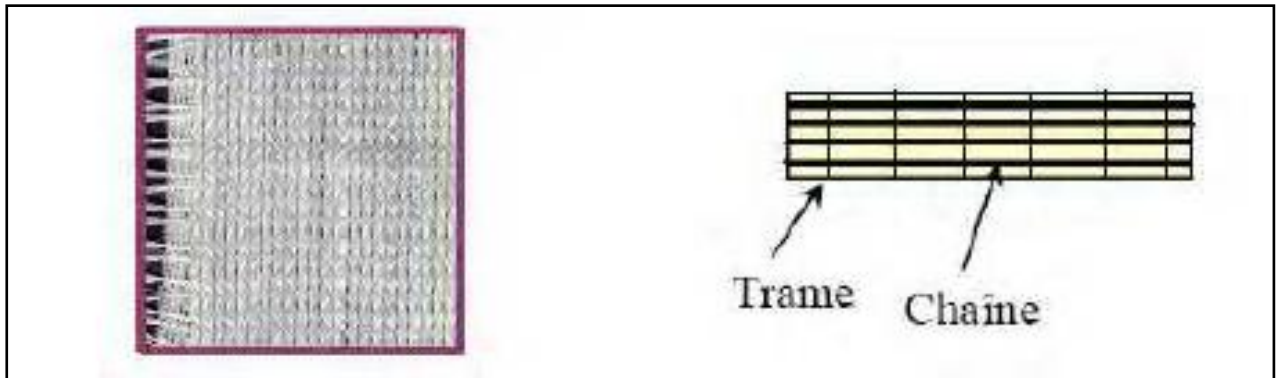


Fig. III.5: Les unidirectionnels (UD)

Les tissus se composent de fils de chaîne et de trame perpendiculaires entre eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise.

- **Toile ou taffetas**

Chaque fil de chaîne passe dessus puis dessous chaque fil de trame, et réciproquement. Le tissu présente une bonne planéité et une relative rigidité, mais est peu déformable pour la mise en oeuvre. Les nombreux entrecroisements successifs génèrent un embuvage important et réduisent les propriétés mécaniques.

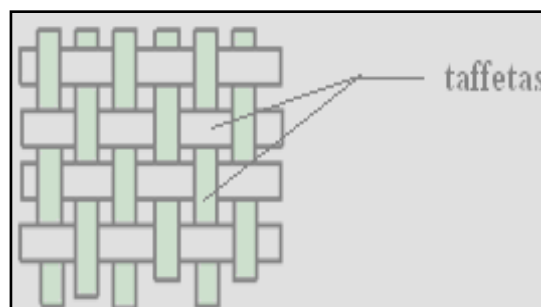
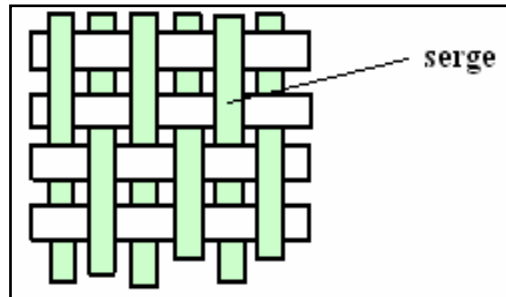


Fig. III.6: taffetas

- **Serge**

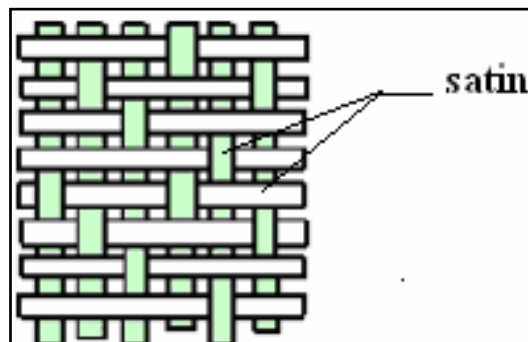
Chaque fil de chaîne flotte au dessus de plusieurs (n) fils de trame et chaque fil de trame flotte au dessus de (m) fils de chaîne. Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils. Ci-contre, un sergé 2/2.



**Fig. III.7: Serge**

- **Satin**

Chaque fil de chaîne flotte au dessus de plusieurs (n- 1) fils de trame et réciproquement. Ces tissus ont des aspects différents de chaque côté. Ces tissus sont assez souples et adaptés à la mise en forme de pièces à surfaces complexes. Ce type de tissus présente une forte masse spécifique.



**Fig. III.8: Satin**

### **III.3: Les matrices [28 ]**

La matrice a pour rôle de lier les fibres renforts, répartir les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit. Les matériaux composites sont habituellement classés en trois grandes familles, selon la nature chimique de la matrice

- composite à matrice organique (CMO).
- composite à matrice métallique (CMM).
- composite à matrice céramique (CMC).

#### **III.3.1: Les matrices organiques**

On utilise actuellement surtout des résines thermodurcissables (TD) que l'on associe à des fibres longues, mais l'emploi de polymères thermoplastiques (TP) renforcés de fibres courtes se développe fortement.

Il est important de bien situer les différences fondamentales de ces deux types de matrices.

- La structure des TP se présente sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme (les chaînes se plient alors), et les refroidir pour les fixer (les chaînes se bloquent). Cette opération est réversible.

- La structure des TD a la forme d'un réseau tridimensionnel qui se pontre (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme de façon définitive, lors d'un échauffement. La transformation est donc irréversible.

Les résines thermodurcissables durcissent après un cycle de chauffage appelé « cycle de polymérisation ».

#### **A) Résines thermodurcissables (TD)**

Les résines thermodurcissables principalement utilisées actuellement sont :

- les polyesters insaturés ; ce sont les résines les plus utilisées dans les applications GD. Elles se présentent sous la forme d'une solution polyacide + polyalcool qui se rigidifient sous l'action d'un catalyseur et de l'action de la chaleur. Elles présentent le grand défaut d'émettre des vapeurs de styrène au cours de la polymérisation et d'être difficile à stocker.
- les vinylesters : ce sont des variantes des polyesters obtenues à partir d'acide acrylique. Elles ont une bonne tenue à la fatigue et un bon comportement à la corrosion mais sont combustibles.
- les résines époxy (ou époxydes) constituent la résine type des composites HP.
- les résines phénoliques sont obtenues par la polycondensation du phénol et du formol ; elles présentent une très bonne tenue au feu, sans fumée (d'où leur utilisation dans le ferroviaire). Elles sont fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à mettre en œuvre.
- les polyuréthanes ont une faible viscosité qui facilite un bon remplissage du moule. D'autres résines TD sont utilisées pour des applications particulières comme par exemple le silicone (bonnes qualités électrique, thermique, chimique), les poly-imides (composites HP pour une bonne stabilité à la température).

En Europe, les composites à matrice thermodurcissable (TD) représentent 70% de la totalité des composites transformés

#### **b) Résines thermoplastiques (TP)**

Les thermoplastiques (TP) présentent à l'état vierge de bonnes caractéristiques mécaniques. Un renforcement de fibres courtes leur confère une tenue mécanique et thermique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle. Toutefois, l'appellation « composite » n'est pas interprétée d'une manière uniforme, et certains industriels n'y incluent pas les thermoplastiques renforcés de fibres courtes qui représentent pourtant 90% des composites à matrice thermoplastique. Les principales résines thermoplastiques utilisées dans les composites sont :

- les polyamides (PA) 6, 6-6, 12
- les polytéraphthalates éthylénique (PET) et butylénique (PBT)
- les polycarbonates (PC)
- les polyoxides de phénylène (PPO ou PPE)
- les polyoxyméthylène (POM)
- le polypropylène (PP)
- le polyamide-imide (PAI)
- le polyéther-imide (PEI)
- le polyéther-sulfone (PES)
- le polyéther-éther-cétone (PEEK).

Résines	nom	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	E (MPa)	$\nu$	R (MPa)	$\alpha$ $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$
TD	Polyester	1300	3800	0.37	88	100
	Vinylester	1200	3500	0.35	81	65
	Epoxyde	1220	5200	0.38	121	40
	Silicone	1550	1000	0.45	3	30
	Polyimide	1217	3450	0.35	80	36
	Phénolique	1350	3000	0.36	70	80
	Polyamide	1130	1900	0.33	70	85
TP	Polycarbonate	1100	2300	0.33	60	70
	Polyester saturé	1310	2800	0.33	55	90
Métaux	Aluminium	2630	69000	0.33	358	23
	Acier XC10	7850	210000	0.29	1000	1000
	Cuivre	8940	119000	0.30	350	17
	Magnésium	1660	42000	0.30	280	25

Tableau III.3: les propriétés physiques et mécaniques de quelques résines après polymérisation.

Avec

- $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) : Masse volumique  
 $E$  (MPa) : Module d'Young  
 $\nu$  : Coefficient de Poisson  
 $R$  (MPa) : Limite élastique en traction  
 $\alpha$  (mm/m<sup>°C</sup>) : Dilatation thermique

Matrices	Thermoplastiques TP	Thermodurcissables TD
État de base	solide prêt à l'emploi	liquide visqueux à polymériser
Stockage	Illimité	Réduit
Mouillabilité renforts	Difficile	Aisée
Moulage	chauffage + refroidissement	chauffage continu
Cycle	Court	Long
Tenue au choc	assez bonne	Limitée
Tenue thermique	Réduite	Bonne
Chutes et déchets	recyclables	perdus ou recyclés en charges
Conditions de travail	Propreté	émanation pour "méthode humide"

Tableau III.4: les Principales différences entre matrices thermoplastiques (TP) et thermodurcissable (TD)



**III.3.2: Les matrices métalliques :**

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

Dans le cas des CMM (composites à matrice métallique) le matériau composite est constitué :

- d'une matrice métallique (par ex. aluminium, magnésium, zinc, nickel,...).
- d'un renfort métallique ou céramique (Premier « art du feu » à apparaître (avant la métallurgie et le travail du verre), la céramique désigne...) (par ex : fils d'acier, particules de SiC, carbone, alumine, poudre (La poudre est un état fractionné de la matière. Il s'agit d'un solide présent sous forme de petits morceaux, en général...) de diamant...).

**III.3.3: Les matrices céramiques :**

Dans le cas des CMC (composites à matrices céramiques), la matrice peut être constituée de carbone ou de carbure de silicium. Ces matrices sont déposées soit par dépôt chimique en phase (Le mot phase peut avoir plusieurs significations, il employé dans plusieurs domaines et principalement en...) vapeur () par densification d'une préforme fibreuse, soit à partir de résines cokéifiables comme les résines phénoliques (dans le cas des matrices de carbone).

**III.4: Colles et adhésifs**

Mouiller les surfaces collées, être chimiquement compatible avec les surfaces être résistant dans le milieu ambiant (ex. résine époxy, polyuréthannes, polyester, etc.)

**III.5: Les différentes formes des FRP**

Le marché offre les PFR sous différentes formes. D'abord, ils se retrouvent sous forme de plaques solides. Ces plaques sont manufacturées par un procédé de pultrusion permettant de produire en continuité des plaques de composites à sections constantes. Ce procédé a l'avantage d'offrir des plaques possédant une densité de fibres très élevée. Les plaques sont disponibles en plusieurs sections et longueurs différentes. Elles sont collées sur la surface de la pièce à renforcer au moyen d'une colle à base d'époxy.

Il est également possible de retrouver les matériaux composites sans que les fibres ne soient imprégnées d'avance. Les tissus de fibres sont disponibles en alignement unidirectionnel ou bien en tissages bidirectionnel à différents angles selon le type d'utilisation prévu. Cette forme de PRF a l'avantage d'être plus souple que les plaques pour épouser les différentes formes des éléments à renforcer. Par contre, l'alignement des fibres risque d'être moins parfait et la densité du matériau plus variable.

On désigne généralement dans la littérature un matériau composite à partir du type de fibre qui le constitue. Ainsi, les abréviations AFRP, CFRP et GFRP font respectivement référence aux matériaux composites composés de fibres aramides, de carbone et de verre (« glass » en anglais).

**III.5.1: Propriétés mécaniques des composites FRP**

Contrairement à l'acier; le Comportement des PRF est linéaire élastique jusqu'à la rupture, il ne démontre aucune ductilité. En revanche (voir figure III.8), ils ont l'avantage d'être jusqu'à six fois plus résistants que l'acier pour environ un cinquième de son poids.

Cette résistance est toutefois variable en fonction de l'orientation des fibres.

En effet, ces matériaux sont anisotropes, c'est-à-dire que leurs propriétés mécaniques ne sont pas les mêmes dans toutes les directions.

La résistance maximum est évidemment obtenue en sollicitant le matériau dans le même axe que l'alignement de ses fibres. La légèreté des matériaux composites leur procure un avantage relativement aux coûts de main-d'œuvre nécessaire pour l'installation par rapport à un matériau conventionnel comme l'acier. il s'agit d'un avantage qui possiblement compensera l'inconvénient en ce qui a trait à leurs coûts relativement élevés. Autre avantage important des PRF ; ils ne sont pas corrosifs.

**III.6: Les avantages des matériaux composites**

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ils contribuent au renforcement de la sécurité grâce à une meilleure tenue aux chocs et au feu. Ils offrent une meilleure isolation thermique ou phonique et, pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, aptes à remplir plusieurs fonctions. Dans chacun des marchés d'application (automobile, bâtiment, électricité, équipements industriels,...), ces performances remarquables sont à l'origine de solutions technologiques innovantes.

Il ya autres avantages des matériaux composites tels que :

- grande résistance à la fatigue.
- faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion (sauf alu-carbone) .
- insensibles aux produits chimiques "mécaniques " comme les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvants, pétrole.

**III.7: les Inconvénients des matériaux composites**

- Vieillissement 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,
- Coût parfois prohibitifs (temps, coût, étude et mise en œuvre),
- Grande concentration de contraintes dans les composites stratifiés et les sandwichs.



## ***CHAPITRE IV***

### ***ANALYSE DES MURS EN BETON ARME RÉHABILITÉS***

### IV.1: Introduction

Le problème qu'on propose à résoudre dans ce mémoire est l'analyse statique linéaire des murs voiles pleins renforcés par des plaques en matériaux composites à base de fibres réparties de façon non uniforme.

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 :

- 1- **Méthode analytique**, dite du modèle continu, élaboré grâce aux travaux de Coull [29]; [30]; [31], Mcleod [32].
- 2- **Méthodes numériques**, dites de l'analogie portique qui a donné naissance à la méthode de l'**élément mur** suite aux travaux de Mcleod [32], Kwan [33], [34], [35].

### IV.2: 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.

Les types d'éléments développés dans la méthode de l'élément mur sont :

- Éléments mur sans rotations aux nœuds **figure IV .1**. Cet élément est facile à assembler avec d'autres éléments murs de même type.
- Éléments mur avec des degrés de liberté rotationnels aux nœuds (**Figure IV .2**), Qui est facilement à assembler avec la poutre de liaison.

#### IV.2.1: Éléments mur sans rotations aux nœuds

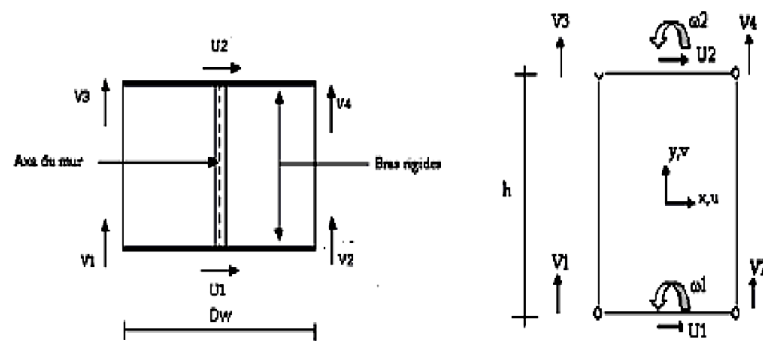


Figure IV.1: Éléments Mur Sans Rotation Aux Nœuds

La matrice de rigidité d'un élément mur est donnée par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} U1 \\ N1 \\ N2 \\ U2 \\ N3 \\ N4 \end{bmatrix} = [R]^T [K] [R] \begin{bmatrix} u1 \\ v1 \\ v2 \\ u2 \\ v3 \\ v4 \end{bmatrix} \quad \text{Ou bien} \quad \begin{bmatrix} U1 \\ N1 \\ N2 \\ U2 \\ N3 \\ N4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u1 \\ v1 \\ v2 \\ u2 \\ v3 \\ v4 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots \text{IV -1}$$

[K] est la matrice de rigidité du système étudié et [R] la matrice de transformation.

## IV.2.2: Élément mur avec rotations aux nœuds

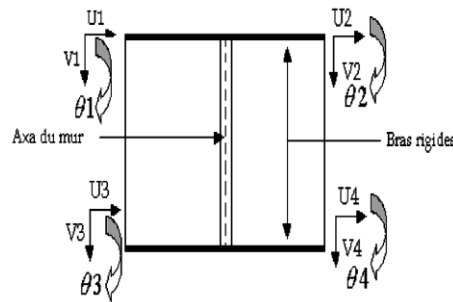


Figure IV.2: Élément mur avec rotations aux nœuds

- La matrice de rigidité d'un élément mur avec rotations aux nœuds en flexion est définie de la même manière que celle d'un mur sans rotations aux nœuds en remplaçant les degrés de liberté d'un élément colonne par ceux d'un élément mur, ce qui donne la matrice de rigidité définie par le système d'équations suivant :

$$\begin{bmatrix} U1 \\ N1 \\ N2 \\ M1 \\ U2 \\ N3 \\ N4 \\ M2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{h^2} & 0 & 0 & \frac{6EI}{h^2} & -\frac{12EI}{h^3} & 0 & 0 & \frac{6EI}{h^2} \\ 0 & \frac{EA}{4h} & \frac{EA}{4h} & 0 & 0 & -\frac{EA}{4h} & -\frac{EA}{4h} & 0 \\ 0 & \frac{EA}{4h} & \frac{EA}{4h} & 0 & 0 & -\frac{EA}{4h} & -\frac{EA}{4h} & 0 \\ \frac{6EA}{h^2} & 0 & 0 & \frac{4EI}{h} & -\frac{6EI}{h^2} & 0 & 0 & \frac{2EI}{h} \\ -\frac{12EI}{h^3} & 0 & 0 & \frac{6EI}{h^2} & \frac{12EI}{h^3} & 0 & 0 & \frac{6EI}{h^2} \\ 0 & -\frac{EA}{4h} & \frac{EA}{4h} & 0 & 0 & \frac{EA}{4h} & \frac{EA}{4h} & 0 \\ 0 & -\frac{EA}{4h} & \frac{EA}{4h} & 0 & 0 & \frac{EA}{4h} & \frac{EA}{4h} & 0 \\ \frac{6EI}{h^2} & 0 & 0 & \frac{2EI}{h} & -\frac{6EI}{h^2} & 0 & 0 & \frac{4EI}{h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u1 \\ v1 \\ v2 \\ \omega1 \\ u2 \\ v3 \\ v4 \\ \omega2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (IV-2)$$

- La matrice de rigidité de l'élément mur en distorsion a été calculée par **Kwan** , en procédant de la manière suivante :
  - Il calcule la matrice de rigidité des deux bras rigides
  - Il néglige l'effet diaphragme du plancher. Ceci revient à supposer que les rotations sont les mêmes à chaque niveau  $z$  du refend ;
  - Il calcule la matrice de rigidité de l'élément mur en distorsion en utilisant le vecteur déplacement relatif à l'élément mur, soit :  $\{u\}_T = \{u_1 \ v_1 \ v_2 \ w_1 \ u_2 \ v_3 \ v_4 \ w_2\} \dots$  (IV -3)

$$\begin{bmatrix} U1 \\ N1 \\ N2 \\ M1 \\ U2 \\ N3 \\ N4 \\ M2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{Ght}{2Dw} & -\frac{Ght}{2Dw} & \frac{Ght}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{Ght}{2Dw} & \frac{Ght}{2Dw} & -\frac{Ght}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2Dw}{Ght} & \frac{2b}{Ght} & \frac{2}{GhA} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{Ght}{2Dw} & -\frac{Ght}{2Dw} & \frac{Ght}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{Ght}{2Dw} & \frac{Ght}{2Dw} & -\frac{Ght}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2Dw}{Ght} & -\frac{2Dw}{Ght} & \frac{2}{GhA} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2}{Ght} & \frac{2}{Ght} & \frac{2}{GhA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u1 \\ v1 \\ v2 \\ \omega1 \\ u2 \\ v3 \\ v4 \\ \omega4 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (IV-4)$$

La matrice de rigidité totale est obtenue en additionnant les matrices (IV -2) et ( IV -4).

### IV.3: Analyse Des murs voiles par éléments finis

Théoriquement, cette méthode devenue un outil nécessaire dans l'analyse, peut être utilisée pour toutes les structures. Dans ce mémoire, deux éléments existants, nommés respectivement : l'élément Cheung et l'élément Kwan. La combinaison de ces deux éléments a mené à un modèle satisfaisant certains critères.

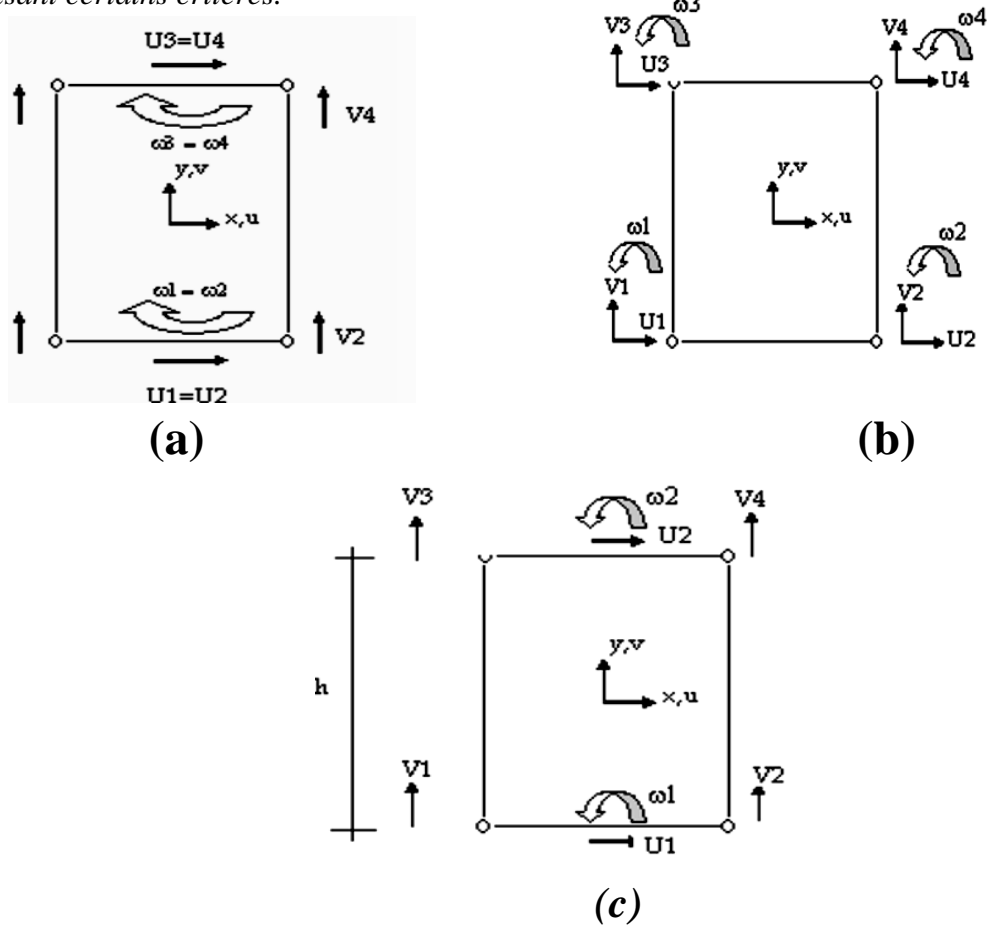


Figure IV.3: (a) Élément simplifié avec des déformations latérales négligées (b) Élément original 12 DDL (c) Élément de Kwan simplifié

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

$$u = u_1 \cdot \left( \frac{1}{2} - \frac{3}{2} \left( \frac{y}{h} \right) + 2 \left( \frac{y}{h} \right)^3 \right) + \omega_1 h \left( -\frac{1}{8} + \frac{1}{4} \left( \frac{y}{h} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{y}{h} \right)^2 - \left( \frac{y}{h} \right)^3 \right) + u_2 \cdot \left( \frac{1}{2} + \frac{3}{2} \left( \frac{y}{h} \right) - 2 \left( \frac{y}{h} \right)^3 \right) + \omega_2 h \left( -\frac{1}{8} + \frac{1}{4} \left( \frac{y}{h} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{y}{h} \right)^2 - \left( \frac{y}{h} \right)^3 \right) \dots \dots \dots (IV-5)$$

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

**Hypothèses Adoptées De L'élément De KWAN :**

$$U_1 = U_2, W_1 = W_2, U_3 = U_4, W_3 = W_4 \dots \dots \dots (IV-7)$$

#### IV.4: Théorie et solutions

##### IV.4.1: Module d'élasticité du composite à base de fibres à espacement variable [36]

Les modules d'élasticité  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $G_{xy}$  du matériau composite peuvent être donnés fonction des propriétés des fibres et de la matrice, en respectant la loi de mélange :

$$E_x = \frac{E_f}{V_f + (1 - V_f)R_1} \quad \dots\dots\dots (IV - 8)$$

$$G_{xy} = \frac{E_f}{2(1 + V_f)[R_3(1 - V_f) + V_f]} \quad \dots\dots\dots (IV - 9)$$

$$R_1 = \frac{E_f}{E_m}, \quad R_3 = \frac{G_f}{G_m} \quad \dots\dots\dots (IV - 10)$$

Dans les équations déjà évoquées, les indices  $f$  et  $m$  dénotent respectivement les fibres et la matrice, et  $V_f$  le volume des fibres dans le matériau composite. Pour un matériau ayant un espacement des fibres variable,  $V_f$  est fonction de  $x$ , et  $E_x$ ,  $E_y$ ,  $G_{xy}$ ,  $\nu_{xy}$  sont fonctions de  $x$ .

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.

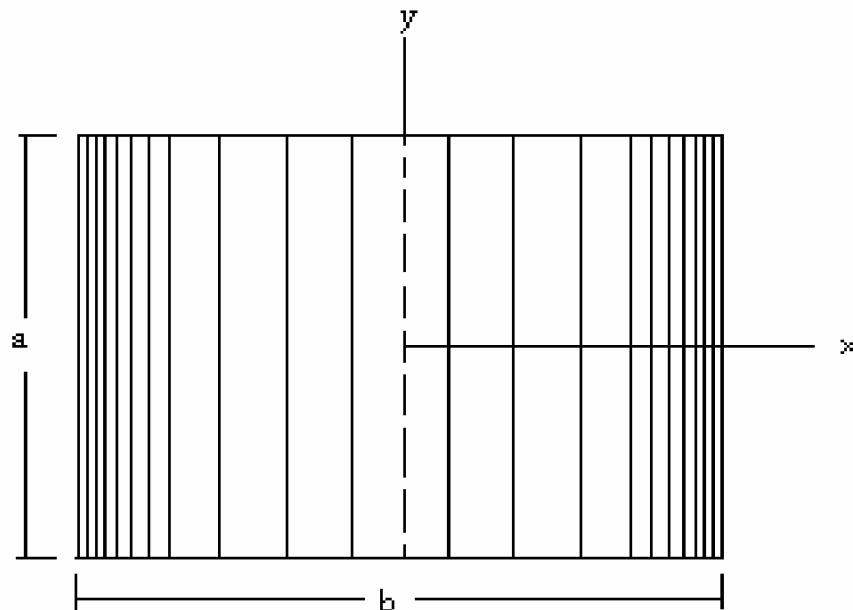


Figure IV.04: Concentration des renforts vers les bords dans une plaque en composite

Dans le présent travail, de diverses fractions volumiques des fibres ont été proposées, dépendant de  $\xi$ , sachant que :

$$\xi = 2.x/b \quad \dots\dots\dots (III-4)$$

Six différentes distributions des fibres étaient considérées dans notre travail, chacune d'elle est caractérisée par la variation de la fraction volumique des fibres  $V_f$ , qui sont données par le tableau IV-1. Ces fonctions sont schématisées sur les figures IV-05, IV-06, IV-07, IV-08, IV-09, IV-10.

Ce tableau donne la distribution des fibres  $a$  pour valeur maximale de  $V_f$  en outre  $V_{f_{moy}}$ , qui est la valeur moyenne de chaque distribution. Celle-ci est donnée par :

$$(V_f)_{moy} = \int_{-1/2}^{+1/2} V_f(\xi) d\xi \quad \dots\dots\dots (III-5)$$

$V_f(\xi)$	$V_{f_{moy}}$	$V_{f_{max}}$
$\xi^2$	33%	100%
$1 - \xi^2$	67%	100%
$\frac{1}{2} + \frac{1}{4}(\xi^2)$	58%	75%
$\frac{1}{2} + \frac{1}{2}(\xi^2)$	67%	100%
$\frac{1}{2} - \frac{1}{4}(\xi^2)$	42%	25%
$\frac{1}{2} - \frac{1}{2}(\xi^2)$	33%	50%

Tableau IV.01: Les distributions des fibres proposées (A.W. Leissa[36])



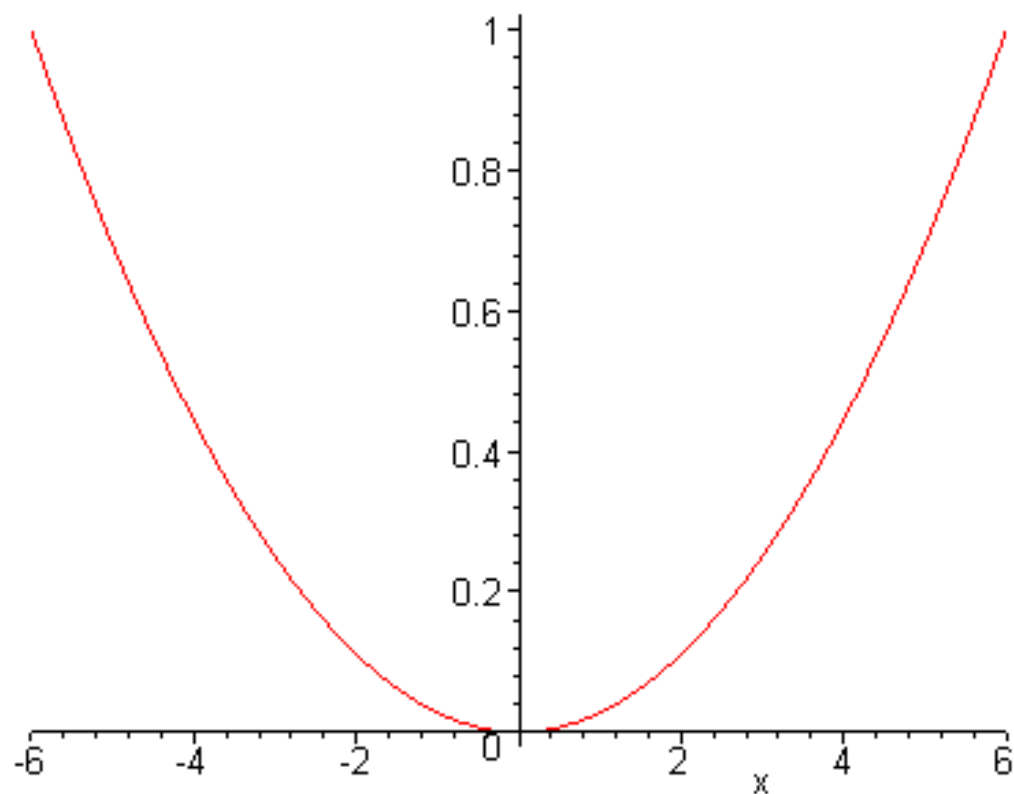


Figure IV.05: Le graphe de La distribution  $vf1(x) := \xi^2$

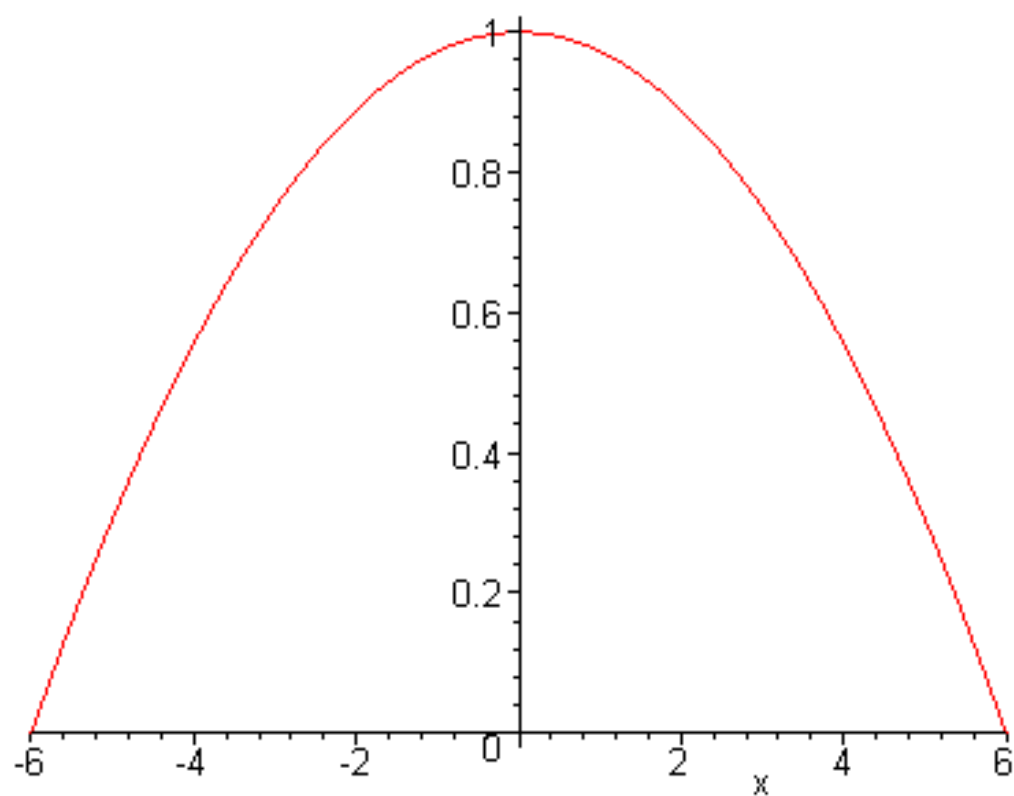


Figure IV.06: Le graphe de La distribution  $vf2(x) := 1 - \xi^2$

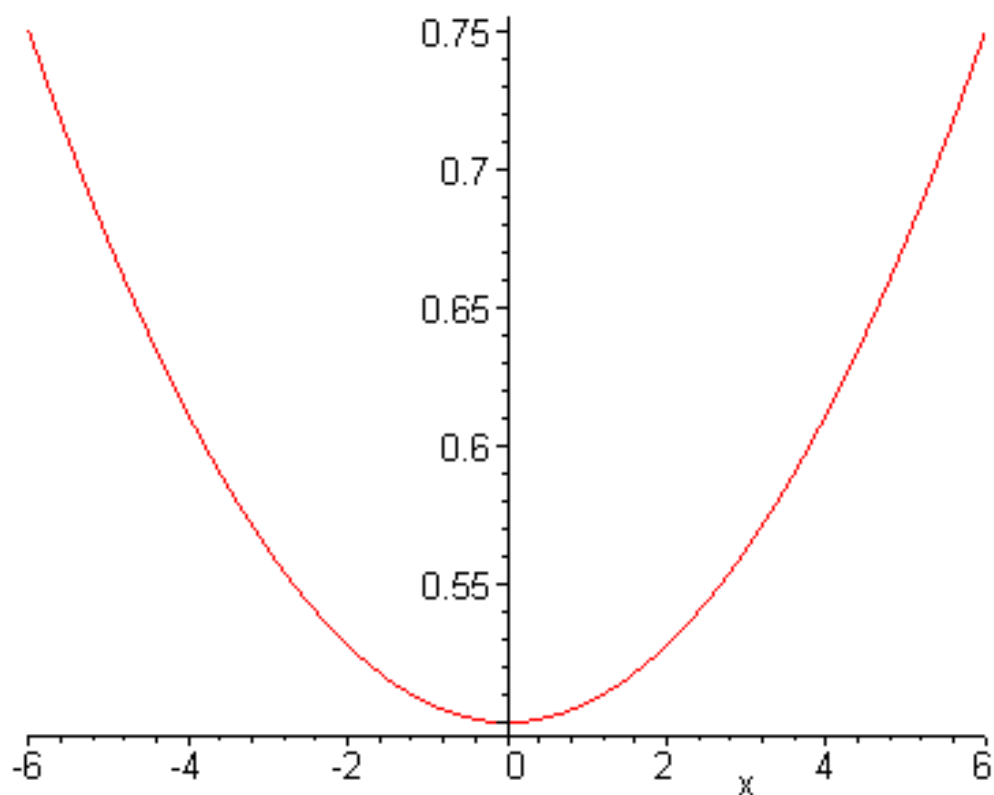


Figure IV.07: Le graphe de La distribution  $vf3(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{4}\xi^2$

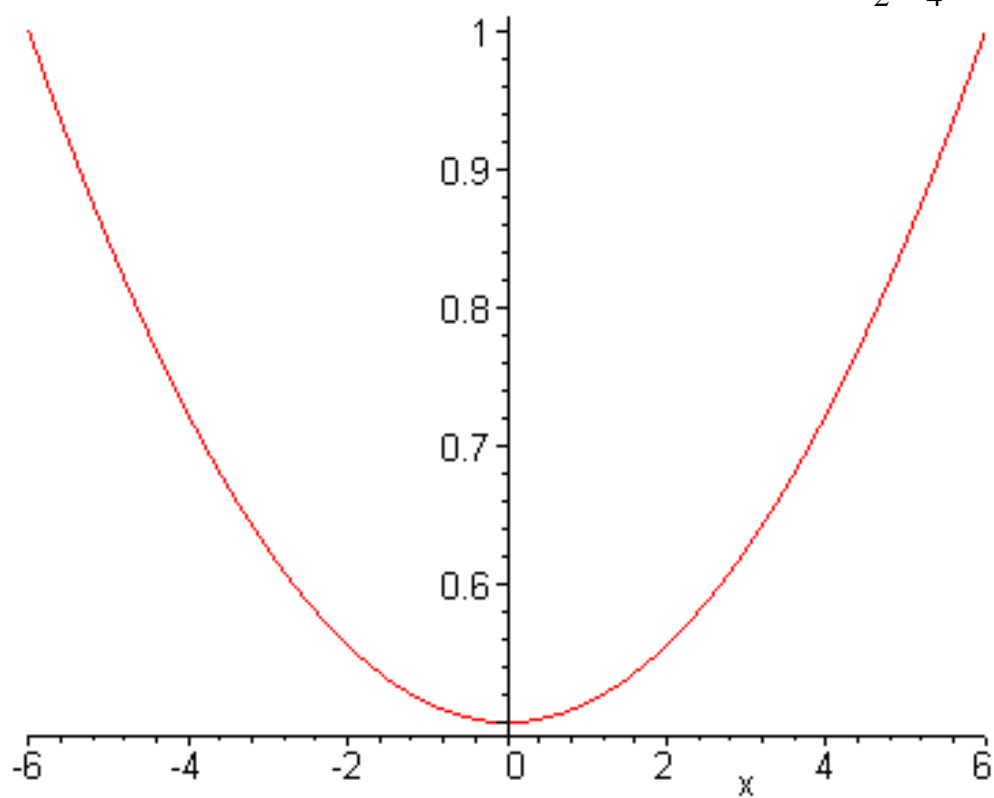


Figure IV.08: Le graphe de La distribution  $vf4(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\xi^2$

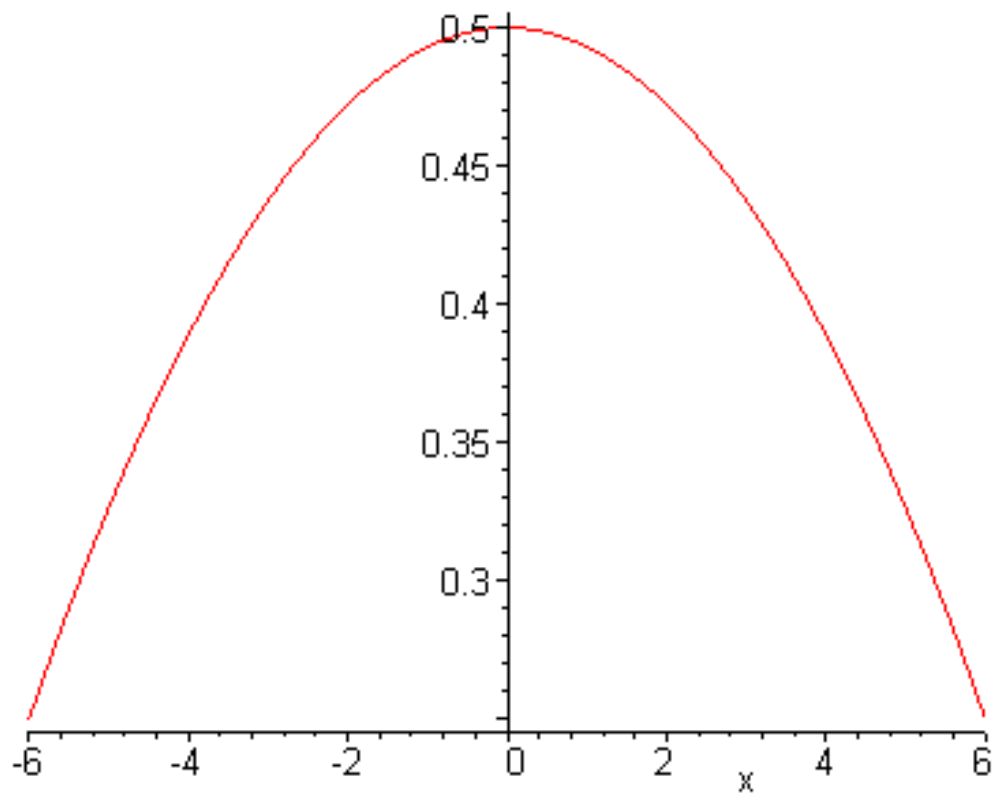


Figure IV.09: Le graphe de la distribution  $vf5(x) = \frac{1}{2} - \frac{1}{4}\xi^2$

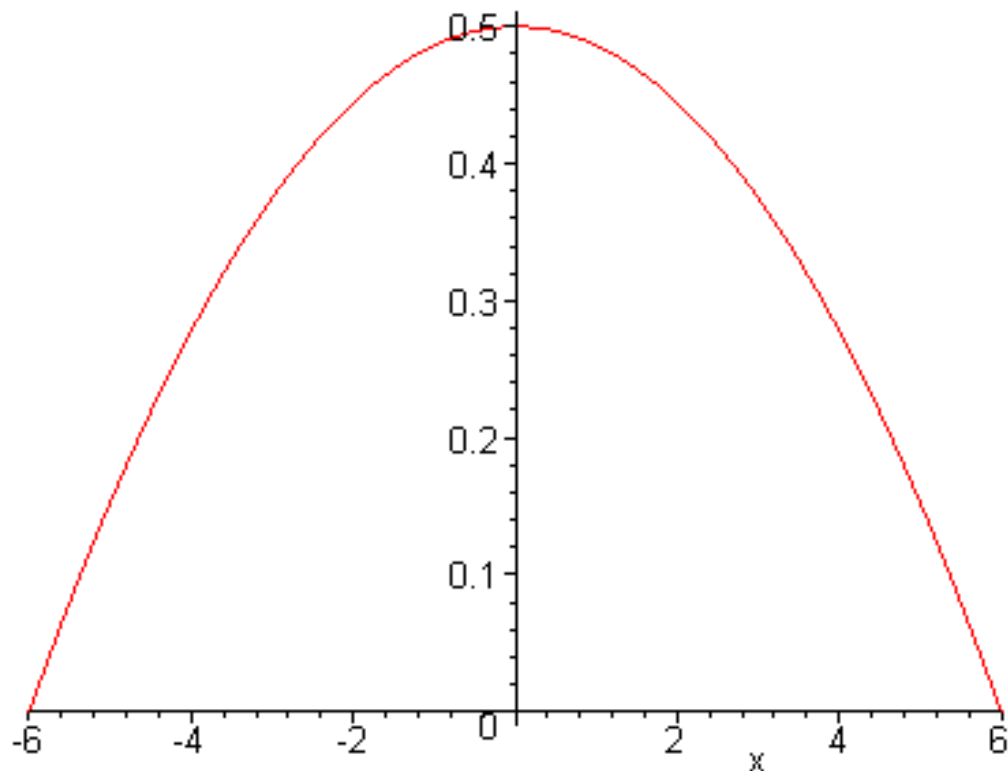


Figure IV.10: Le graphe de la distribution  $vf6(x) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\xi^2$

**Remarque :** la distribution  $\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\xi^2$  signifie que les fibres concentrées aux bords du patch ou les valeurs de contraintes normales sont élevées.

#### IV.4.2: Détermination de la matrice de rigidité du mur refend renforcé

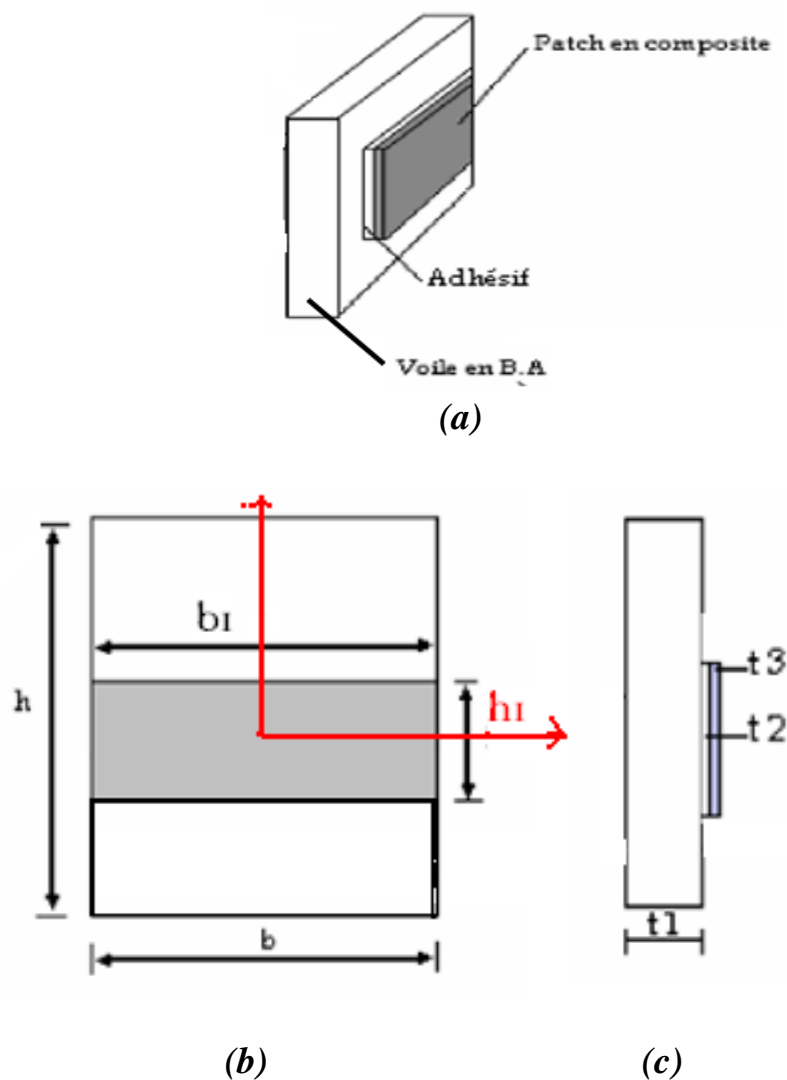
Se basant sur les déplacements, horizontal et vertical, de l'élément de KWAN [35], il est possible de déterminer la matrice de rigidité du mur Voiles renforcé par des plaques en matériau composite, en calculant l'énergie de déformation de l'élément (voile+adhésif+patch).

Cette énergie due aux effets de flexion et de cisaillement vaut :  $U^e = U_c^e + U_f^e \dots\dots (IV-11)$

**Désignations :**

$F$  : flexion ,  $C$  : cisaillement

$U_c^e$  et  $U_f^e$  sont les énergies de déformation dues à la flexion et au cisaillement respectivement, qui sont écrites en fonction des déformations du mur refend renforcé.



**Figure IV.11: Perspective d'emplacement des plaques composites**

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

**1) Cas de la flexion**

$$U_{def}^{(e)} F = U_{def}^{voile} F + 2 (U_{def}^{patch} F + U_{def}^{adhesif} F) \quad (IV-12)$$

**Voile**

$$U_{def}^{voile} F = \frac{1}{2} E_b \int_v \varepsilon_y^2 dv \quad (IV-12.a)$$

$$dv = t \cdot dx \cdot dy \quad ds = dx \cdot dy \quad \varepsilon_y = \frac{dv}{dy} \quad (IV-12.b)$$

$$U_{def}^{voile} F = \frac{1}{2} E_b t \int_s \varepsilon_y^2 ds \quad (IV-12.c)$$

$$U_{def}^{voile} F = \frac{1}{2} E_b t \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \varepsilon_y^2 ds \quad (IV-12.d)$$

**Adhésif**

$$U_{def}^{Adhésif} F = \frac{1}{2} t \cdot 2 \cdot E_{ad} \int_s \varepsilon_y^2 ds \quad (IV-13.a)$$

$$U_{def}^{Adhésif} F = \frac{1}{2} t \cdot 2 \cdot E_{ad} \int_{y_1 - \frac{h_1}{2}}^{y_1 + \frac{h_1}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \varepsilon_y^2 ds \quad (IV-13.b)$$

**Patch en composite**

$$U_{def}^{patch} F = \frac{1}{2} t \cdot 3 \int_s E_{patch} \varepsilon_y^2 ds \quad (IV-14.a)$$

$$E_{patch} = E_y = E_f \left( V_f + \frac{1-V_f}{R_{11}} \right) \quad (IV-14.b)$$

$$R_{11} = \frac{E_f}{E_m} \quad V_f = \xi^2 (1^{er} \text{ cas}) \quad \xi = \frac{2x}{b} \quad (IV-14.c)$$

$$E_{patch} = E_f \left( \xi^2 + \frac{1-\xi^2}{R_{11}} \right) \Rightarrow E_f \left( \left( \frac{2x}{b} \right)^2 + \frac{1 - \left( \frac{2x}{b} \right)^2}{R_{11}} \right) \quad (IV-14.d)$$

$$U_{def}^{patch} F = \frac{1}{2} t \cdot 3 \cdot E_f \int_{y_1 - \frac{h_1}{2}}^{y_1 + \frac{h_1}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \left( \left( \frac{2x}{b} \right)^2 + \frac{1 - \left( \frac{2x}{b} \right)^2}{R_{11}} \right) \varepsilon_y^2 ds \quad (IV-14.e)$$

**Finalement, on aura**

$$U_{def}^{(e)} F = \frac{1}{2} t \cdot 1 \cdot E_b \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \varepsilon_y^2 ds + 2 \left( \frac{1}{2} t \cdot 3 \cdot E_f \right) \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \left( \left( \frac{2x}{b} \right)^2 + \frac{1 - \left( \frac{2x}{b} \right)^2}{R_{11}} \right) \varepsilon_y^2 ds \\ + \frac{1}{2} t \cdot 2 \cdot E_{ad} \int_{y_1 - \frac{h_1}{2}}^{y_1 + \frac{h_1}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \varepsilon_y^2 ds \quad (IV-15)$$

**2) Cas de cisaillement**

$$U_{def}^{(e)} C = U_{def}^{voile} C + 2 (U_{def}^{patch} C + U_{def}^{adhésif} C) \quad (IV-16)$$

**Voile**

$$U_{def}^{voile} C = \frac{1}{2} G_b \int_v \gamma_y^2 dv \quad (IV-17.a)$$

$$\gamma_y = \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \quad (IV-17.b)$$

$$U_{def}^{voile} C = \frac{1}{2} G_b t_1 \int_s \gamma_y^2 ds \quad (IV-17.c)$$

$$U_{def}^{voile} C = \frac{1}{2} G_b t_1 \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \gamma_y^2 ds \quad (IV-17.d)$$

**Adhésif**

$$U_{def}^{Adhésif} C = \frac{1}{2} t_2 . G_{ad} \int_s \gamma_y^2 ds \quad (IV-18.a)$$

$$U_{def}^{Adhésif} C = \frac{1}{2} t_2 . G_{ad} \int_{y_1 - \frac{h_1}{2}}^{y_1 + \frac{h_1}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \gamma_y^2 ds \quad (IV-18.b)$$

**Patch en composite**

$$U_{def}^{patch} C = \frac{1}{2} t_3 \int_s G_{patch} \gamma_y^2 ds \quad (IV-19.a)$$

$$G_{patch} = G_{xy} = \frac{E_f}{2(1+V_f)[R_{33}(1-V_f)+V_f]} \quad (IV-19.b)$$

$$R_{33} = \frac{G_f}{G_m} \quad V_f = \xi^2 (1^{er} \text{ cas}) \quad \xi = \frac{2x}{b} \quad (IV-19.c)$$

$$U_{def}^{patch} C = \frac{1}{2} t_3 . E_f \int_{y_1 - \frac{h_1}{2}}^{y_1 + \frac{h_1}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \left( \frac{1}{2(1+V_f)[R_{33}(1-(\frac{2x}{b})^2)+(\frac{2x}{b})^2]} \right) \gamma_y^2 ds \quad (IV-19.d)$$

**Finalement, on aura**

$$U_{def}^{(e)} C = \frac{1}{2} t_1 . G_b \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \gamma_y^2 ds + 2 \left( \frac{1}{2} t_2 . G_{ad} \int_{y_1 - \frac{h_1}{2}}^{y_1 + \frac{h_1}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \gamma_y^2 ds \right) + 2 \left( \frac{1}{2} t_3 . E_f \int_{y_1 - \frac{h_1}{2}}^{y_1 + \frac{h_1}{2}} \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \left( \frac{1}{2(1+V_f)[R_{33}(1-(\frac{2x}{b})^2)+(\frac{2x}{b})^2]} \right) \gamma_y^2 ds \right) \quad (IV-20)$$

Pour chaque élément mur, l'énergie de déformation a pour expression :

$$U^e = \frac{1}{2} d_e^t K_w . d_e \quad (IV-21)$$

Où le vecteur nodal de déplacement vaut :

$$d_e = \{u_1, w_1, v_1, v_2, u_2, w_2, v_3, v_4\} \quad (IV-22)$$

Pour la détermination de la matrice de rigidité  $K_w$ , on s'est basé sur la formulation des éléments finis standard.



### IV.4.3: Analyse en vibration libre

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

$$[M] = \text{diag}[m_1, m_2, m_3, \dots, m_{n-1}, m_n] \quad (\text{IV-23})$$

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

Le calcul de toute structure en vibration libre et en particulier les refends consiste à trouver les  $\lambda_i$  et  $\{u_i\}$  vérifiant la relation matricielle suivante :

$$[K]\{u_i\} = \lambda_i [M]\{u_i\} \quad (\text{IV-24})$$

Où  $\lambda_i$  sont appelés les valeurs propres et  $\{u_i\}$  sont les vecteurs propres ou modes propres associés.

$[K]$  et  $[M]$  sont respectivement les matrices de rigidité et de masse globales obtenues par assemblages des matrices élémentaires.

Les matrices masses diagonales furent utilisées par Chaallal [ 37 ] dans l'analyse dynamique des murs voiles à file d'ouvertures. Ces matrices sont obtenues en concentrant la masse du plancher ainsi que celle des éléments mur au niveau de chaque étage. En procédant de cette manière, on aboutit aux matrices masses élémentaires suivantes :

#### Élément mur

$$[M_w] = \begin{bmatrix} m_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{m_c}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{m_c}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_c + m_p & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{m_c + m_p}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{m_c + m_p}{2} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (\text{IV-25})$$

$$m_c = \rho h A$$

### **IV.5:Présentation du programme de calcul des murs voiles renforcées**

Dans le but d'appliquer la méthode de l'élément mur pour le calcul des murs voiles renforcées, il a été nécessaire de proposer un programme de calcul des murs voiles pleins renforcées.

Le programme proposé dans ce mémoire peut exécuter les deux procédures de calcul suivantes :

- Calcul statique linéaire des murs voiles pleins
- Calcul des valeurs et vecteurs propres

Afin d'effectuer une comparaison entre les résultats donnés par la méthode de l'élément mur, un seul type d'élément a été utilisé dans le programme.

#### **IV.5.1: Types d'éléments incorporés dans le programme**

Il est très important de souligner que les éléments relatifs au calcul des murs de cisaillement couplés par la méthode de l'élément mur peuvent modéliser les voiles pleins renforcés par des plaques en matériaux composites. Dans ce travail, chaque Propriété de fibres FRP proposée est associée à un élément de mur renforcé.

#### **IV.5.2: Structure du programme**

Le programme proposé est écrit en langage Visual Fortran (complément de Fortran 77), constitué sous forme de programmes dont chacun exécute une tâche bien précise. Ce programme présente l'avantage d'exécuter les deux tâches de calcul mentionnées précédemment en même temps sous le contrôle de l'utilisateur.

Comme tout programme d'éléments finis, notre code de calcul contient un programme principal enchaînant les opérations de lecture des données et de calcul sous le contrôle de l'utilisateur (Voir l'organigramme de la figure IV-12).

#### **IV.5.3: Sous programmes de lecture des données**

- **Sous programme de coordonnées**

Ce sous programme note le nombre total des nœuds, le nombre des degrés de liberté et les coordonnées de chaque nœuds.

- **Sous programme des connectivités**

Ce sous programme note et interprète la connectivité de chaque élément, sous le contrôle de l'utilisateur.

- **Sous programme des éléments**

Ce sous programme note le nombre total des éléments, leur type et leurs propriétés. Ceux-ci servent à calculer les tables élémentaires, à savoir la matrice de rigidité, la matrice masse et vecteur des charges réparties trapézoïdales.

- **Sous programme des conditions aux limites**

Ce programme note et interprète les conditions aux limites sous le contrôle de l'utilisateur.

#### IV.5.4: Sous programmes associés aux procédures de calcul

- **Sous programme de calcul des tables élémentaires**

Suivant le type de l'élément, ce sous programme calcule les matrices de rigidité, de masse et le vecteur de charges réparties, après les avoir converties en charges concentrées.

- **Sous programme d'assemblage de la matrice de rigidité globale**

Ce sous programme assemble les matrices de rigidité élémentaires, suivant leurs connectivités afin de déterminer la matrice de rigidité globale.

- **Sous programme d'assemblage de la matrice masse**

De la même façon pour la matrice masse globale qui sera déterminée après assemblage des matrices masses élémentaires.

- **Sous programme de construction de vecteur sollicitation globale**

Ce sous programme assemble les forces concentrées aux nœuds à celles réparties sur chaque élément.

- **Sous programme d'introduction des conditions aux limites**

Les conditions aux limites sont introduites par la méthode de pénalité, en raison de sa simplicité d'utilisation.

- **Sous programme de résolution d'un système d'équations**

Ce sous programme résout un système d'équations linéaires qui s'écrit sous la forme

$[K]\{u\} = \{F\}$  après triangulation par la méthode de Gauss.

- **Sous programme de calcul des valeurs et vecteurs propres**

Sous programme calcule les valeurs et vecteurs propres sous le contrôle de l'utilisateur.

#### IV.6: Type d'analyses effectuées par le programme

Comme il a été mentionné précédemment, le programme proposé dans ce présent travail peut effectuer deux tâches de calcul des murs voiles à savoir **l'analyse statique linéaire** (Vecteurs des déplacements nodaux, Vecteurs réactions) et **l'analyse en vibration libre** (calcul des valeurs et vecteurs propres).

##### IV.6.1: Analyse statique linéaire

Les différentes étapes de calcul que doit exécuter le programme proposé, pour l'analyse statique linéaire, sont résumées dans l'organigramme de la **figure IV.13**. Ce programme peut effectuer le calcul des murs voiles pleins renforcés par des plaques en composites :

- Charges concentrées aux nœuds ;
- Charges uniformément réparties ;
- Charges réparties d'une façon triangulaire.

##### IV.6.2: Calcul des valeurs et vecteurs propres

Le calcul des valeurs et vecteurs propres effectués par ce programme, illustré par l'organigramme de la **figure IV-14**, va nous permettre de comprendre les caractéristiques dynamiques des murs de cisaillement couplés.

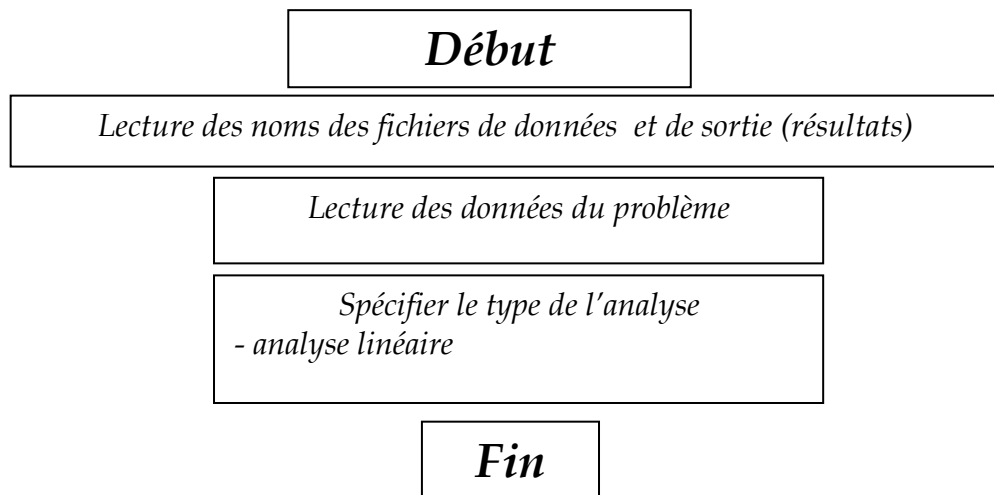


Figure IV.12: Organigramme du programme principal

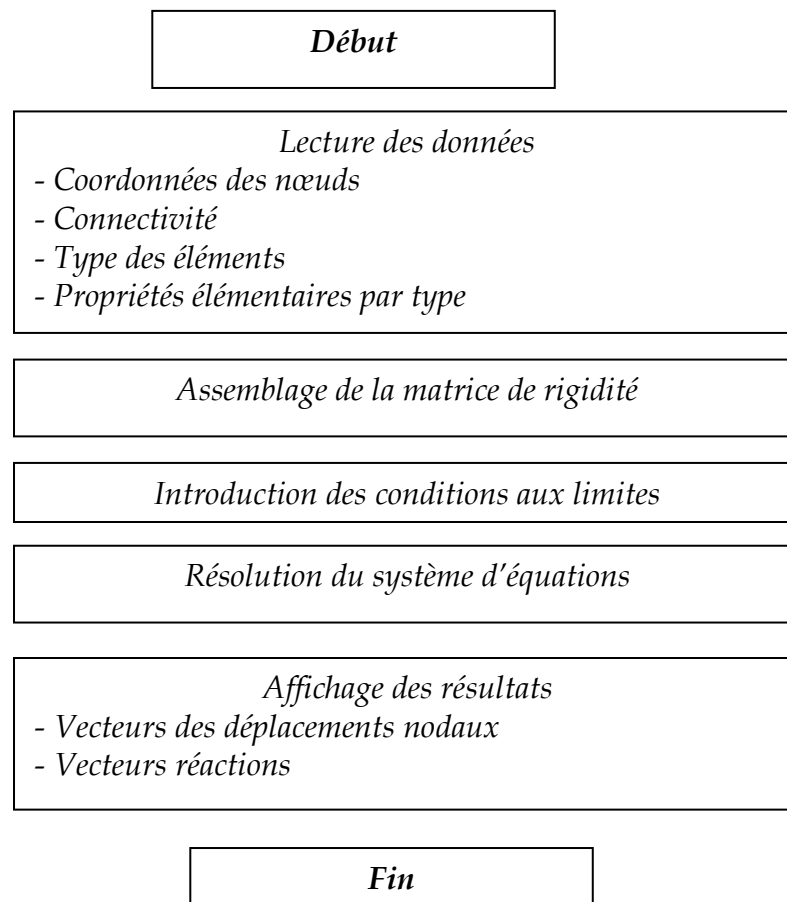
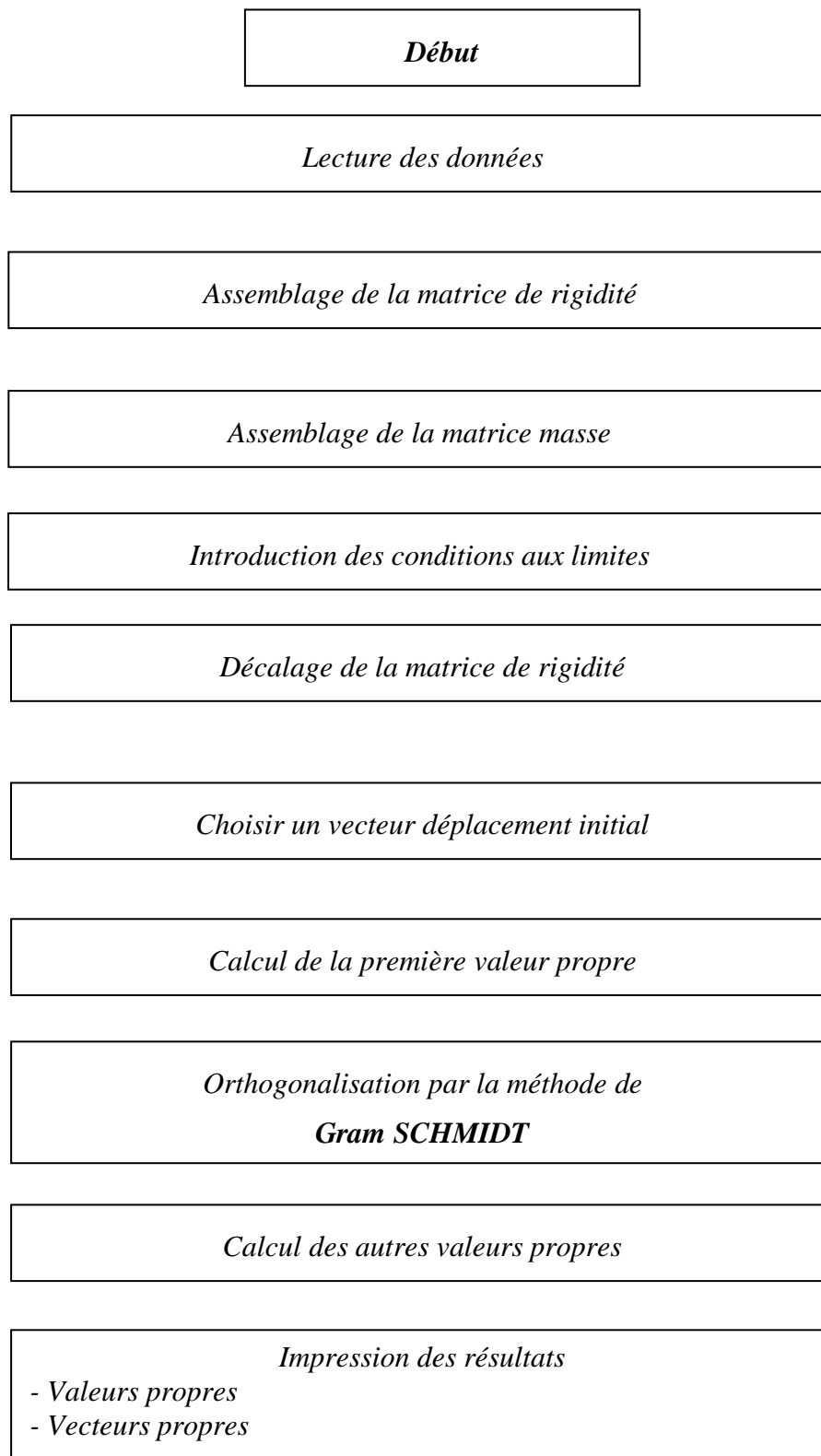


Figure IV.13: Organigramme de la procédure de l'analyse statique linéaire



**Figure IV.14: Organigramme de la procédure de calcul des valeurs et vecteurs propres**

## ***CHAPITRE V***

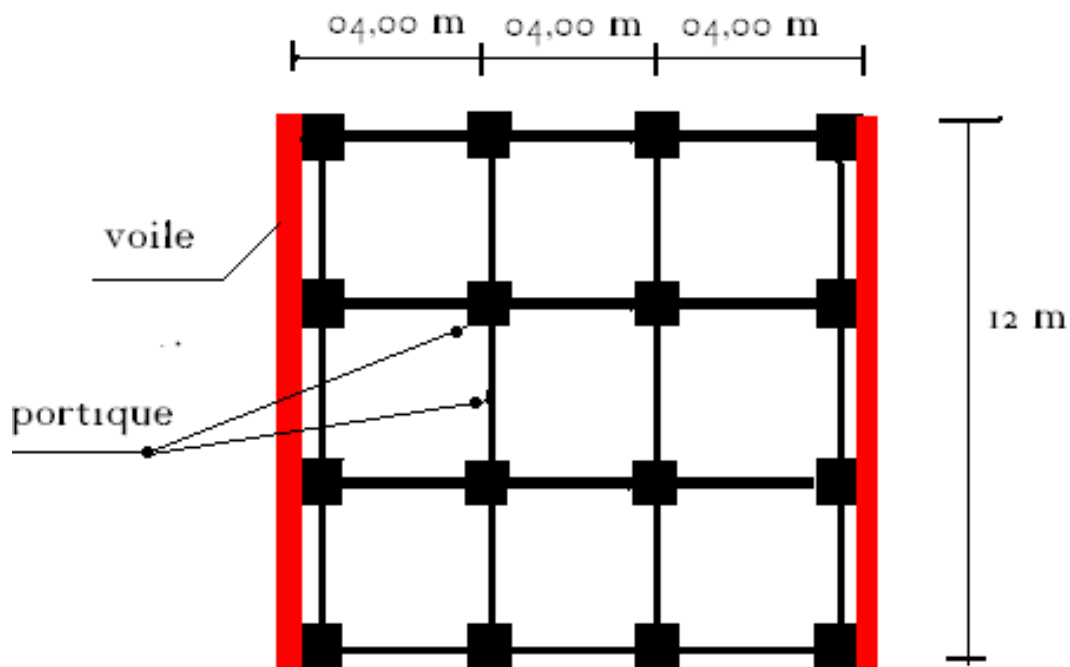
### ***ÉTUDE PARAMÉTRIQUE ET INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS***



### V.1: Données du modèle étudié

Des nombreux exemples sont présentés pour valider les résultats de la présente Analyse. Ces résultats seront comparés à ceux du modèle de référence (modèle non renforcé).

Le type des structures étudiier dans notre travail est le type des structures mixtes ou le rôle porteur vis-à-vis des charges verticales est assuré par les poteaux et les poutres, tandis que les voiles assurent la résistance aux forces horizontales. Un exemple de ce système constructif est présenté dans la **Figure V.1**.



**Figure V.1: Structures « mixtes » avec des murs porteurs couplés à des portiques**

Les paramètres géométriques des structures en béton armé sont donnés dans le tableau 1

Modèles de structures	Dimensions			
	Hauteur totale	Hauteur d'étage	Largeur du Mur	Épaisseur du mur
15 étages	45(m)	03(m)	12(m)	0.25(m)
30 étages	90(m)	03(m)	12(m)	0.25(m)
20 étages	60(m)	03(m)	12(m)	0.25(m)

**Tableau V.1: Dimensions des structures étudiées**

Tandis que les paramètres mécaniques des matériaux utilisés sont présentés dans le tableau 2.

<i>Matériaux</i>	<i>Propriétés mécaniques</i>		
	<i>Module de Young (MPa)</i>	<i>Module de cisaillement (MPa)</i>	<i>Coefficient de Poisson V</i>
<i>Béton</i>	$30.10^3$	12712	0.18
<i>Adhésif</i>	$E_1 = 3.10^3$	1112	$V_1 = 0.35$
	$E_2 = 5.10^3$	1852	0.35
	$E_3 = 10.10^3$	3704	0.35
	$E_4 = 30.10^3$	11112	0.35
	$3.10^3$	1072	$V_2 = 0.40$
	$3.10^3$	1034	$V_3 = 0.45$
	$3.10^3$	1000	$V_4 = 0.50$
<i>Matrice (Époxyde)</i>	5200	1884	0.38
<i>Fibre de Glass</i>	73000	29920	0.22
<i>Fibre de Carbone HR</i>	$400.10^3$	$156.25 \cdot 10^3$	0.28
<i>Fibre de Acier</i>	$210.10^3$	$80.76910^3$	0.30

**Tableau V.2: Paramètres mécaniques des matériaux utilisés**

Dans la présente étude, la masse concentrée par étage vaut 120 t. Le mur voile est sujet à un chargement latéral  $H = 75 \text{ KN}$ .

## V.2: Étude paramétrique

Pour prouver l'effet des matériaux de renforcements, un nombre de structures à été testé (15, 20, 30 étages), se basant sur les caractéristiques mécaniques d'une part (module de Young des fibres selon le type de matériaux, coefficient de poisson de l'adhésif, module de Young de l'adhésif). Et d'autre part sur les caractéristiques géométriques (épaisseur, surface de renforcement et fractions volumiques des fibres).

Au début, faisant varier le type des plaques [CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic), GFRP (Glass), ACIER], avec  $V_f = \xi^2$ ,  $t_3 = 0,006$  m,  $sp/st = 0,2$ ,  $E_{AD} = 3000$  Mpa,  $E_{mat} = 5200$  Mpa. et déduire des déplacements en fonction des hauteurs de trois (03) structures (45, 60, 90m), Les résultats des déplacements sont donnés par le **graphe V-2**.

En second lieu, l'effet des fractions volumiques des fibres sur les déplacements au sommet des voiles renforcées.

$$V_f = \xi^2, \quad V_f = 1 - \xi^2, \quad V_f = \frac{1}{2} + \frac{1}{4}\xi^2, \quad V_f = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\xi^2, \quad V_f = \frac{1}{2}, \quad V_f = \frac{1}{4}, \quad V_f = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\xi^2$$

Les déplacements sont portés sur le **graphe V-3** pour un seul type de matériau CFRP on gardant:  $t_3 = 0,006$  m,  $sp/st = 20\%$ ,  $E_{ad} = 3000$  Mpa,  $E_{mat} = 5200$  Mpa

On va avoir aussi l'effet de l'épaisseur des plaques CFRP (0.003m, 0.006m, 0.01m) sur les déplacements au sommet des voiles renforcées. le **graphe V-4** montre les déplacements en fonction des hauteurs avec  $V_f = \xi^2$ ,  $sp/st = 0,2$ ,  $E_{AD} = 3000$  Mpa,  $E_{mat} = 5200$  Mpa.

Autrement, l'effet du ratio de la surface renforcé  $sp/st$  sur les déplacements au sommet des voiles, Les résultats des déplacements sont donnés par le **graphe V-5**. pour des valeurs de 20, 40, et 80%)

En dernier, l'effet du coefficient de poisson et module de Young de l'adhésif sur les déplacements au sommet des voiles est décrit par :

Le **graphe V.6.a** pour des valeurs de  $\nu_{ad} = 0.30 ; 0.35 ; 0.40 ; 0.45 ; 0.50$

Le **graphe V.6.b** pour des valeurs de  $E_{ad} = 3 ; 5 ; 10 ; 30$  GPa

Avec :  $sp$  : surface du mur de contreventement renforcé

$St$  : surface du mur de contreventement total.

$t_3$  : l'épaisseur des plaques

**CFRP** : (Carbon Fiber Reinforced Plastic)

**GFRP** : (Glass Fiber Reinforced Plastic)

**NB** : Les différents résultats obtenus sont comparées à ceux des structures non renforcées (structure de référence)

## V.2.1: Effet du type de matériau de renforcement sur le déplacement des murs voile

TYPE DE FRP	Structure de 15 étages		Structure de 20 étages		Structure de 30 étages	
	$D_{max}$ au Sommet (mm)	$(Dsp-Dp)/Dsp$ (%)	$D_{max}$ au sommet (mm)	$(Dsp-Dp)/Dsp$ (%)	$D_{max}$ au Sommet (mm)	$(Dsp-Dp)/Dsp$ (%)
Non renforcée	20.37	00 %	50.09	00 %	211.42	00 %
GFRP	12.00	41 %	37.07	27 %	184.60	13 %
Acier	11.29	45 %	34.83	32 %	173.20	18 %
CFRP	10.53	48 %	32.42	36 %	161	24 %

Tableau V.3: Effet de type du matériau de renforcement sur le déplacement des murs voile au sommet \*Patch de 6mm\*  $S_p/St=20\%$  \*  $V_f = \xi^2 * E_{ad} = 3 \cdot 10^3 \text{ MPa} * E_{Mat} = 5200 \text{ MPa}$  \*

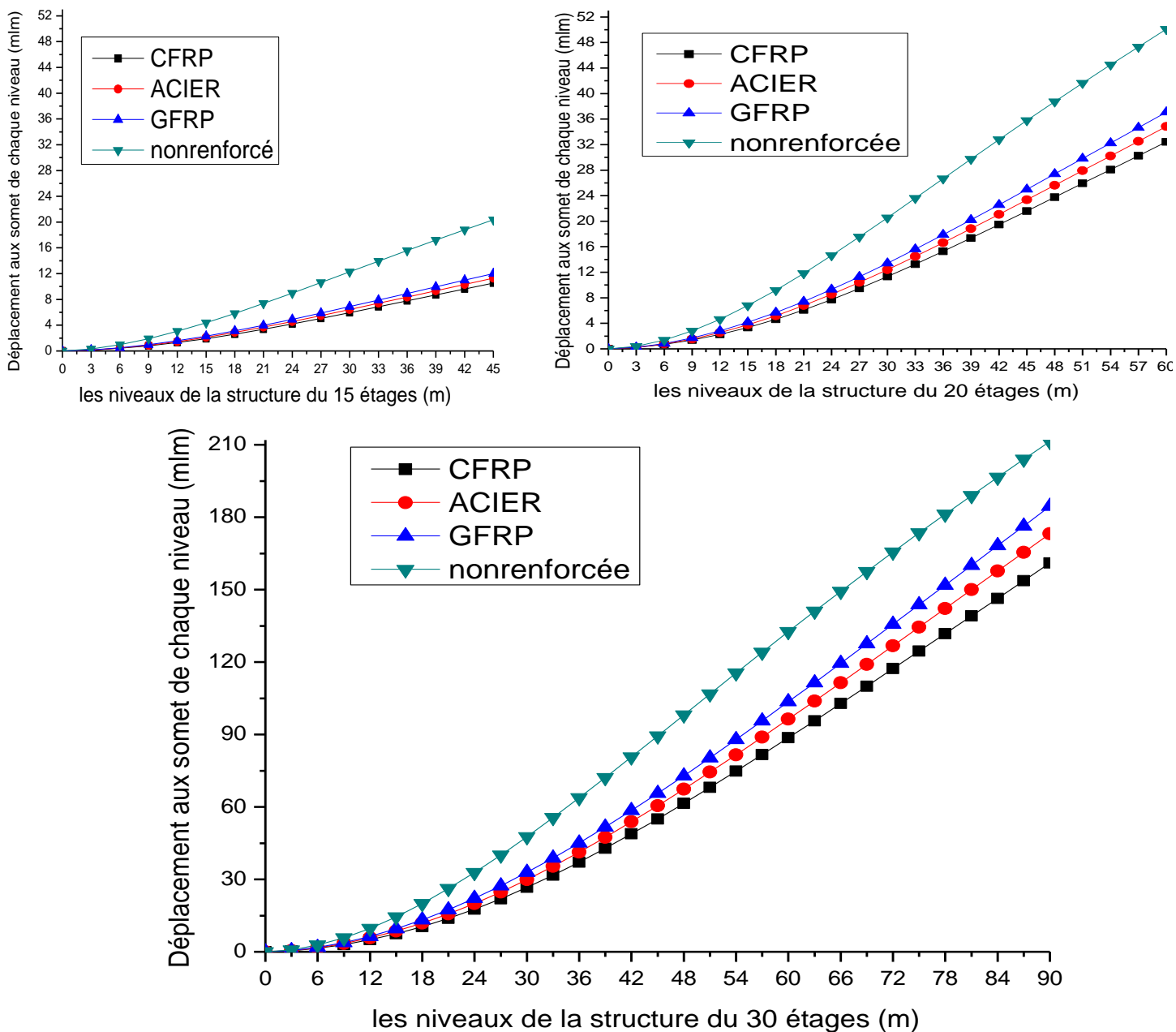
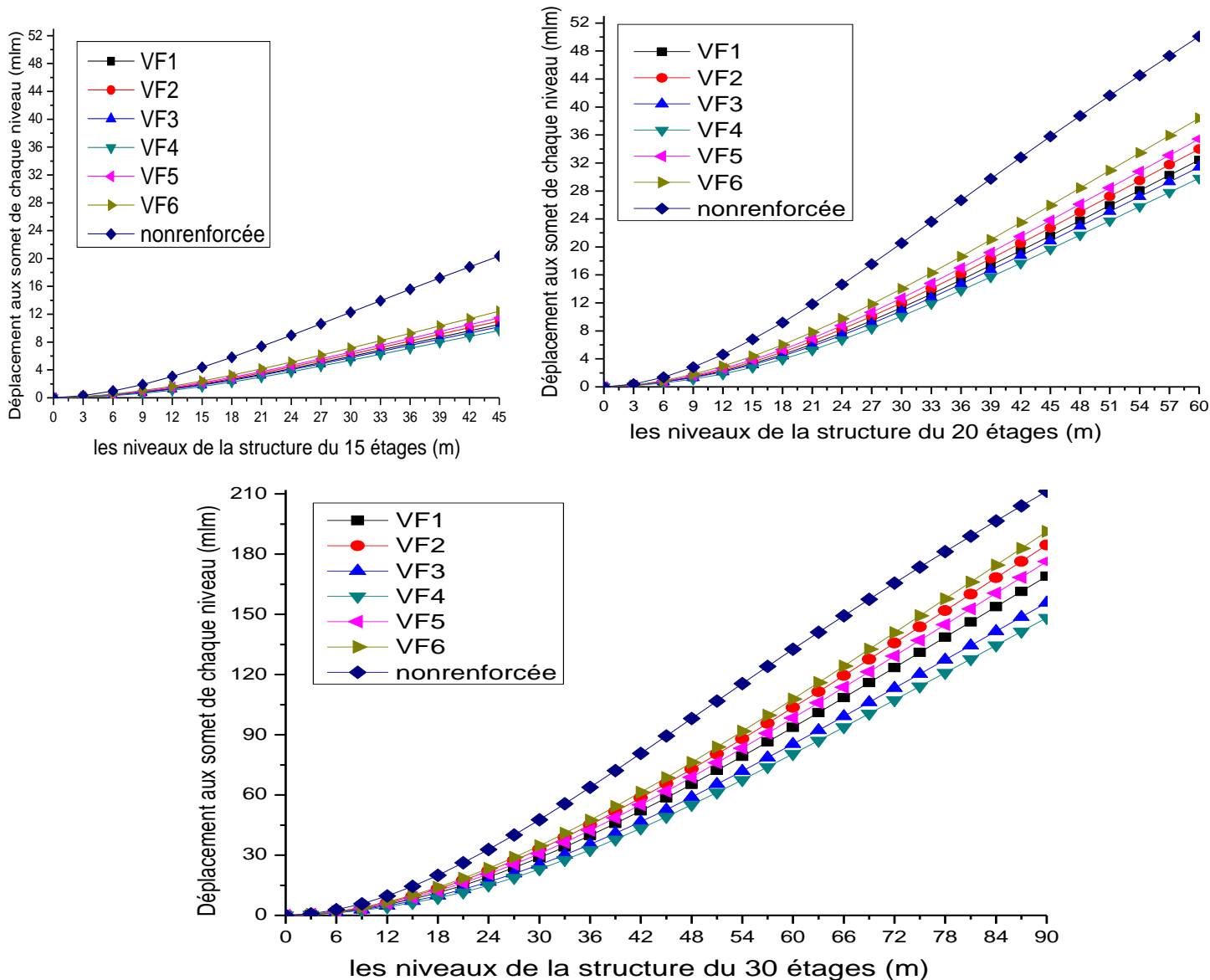


Figure V.2: Effet de type des matériaux de renforcement sur le déplacement des murs voile

V.2.2: l'effet de la Distributions des fibres ( $V_f$ ) sur le déplacement des murs voile

Distributions $V_f$	Structure de 15 étages		Structure de 20 étages		Structure de 30 étages	
	$D_{max}$ au sommet (mm)	$(D_{sp}-D_p)/D_{sp}$ (%)	$D_{max}$ au sommet (mm)	$(D_{sp}-D_p)/D_{sp}$ (%)	$D_{max}$ au Sommet (mm)	$(D_{sp}-D_p)/D_{sp}$ (%)
Non renforcé	20.37	00 %	50.09	00 %	211.42	00 %
$\xi^2$	10.53	48 %	32.42	35 %	161	24 %
$1-\xi^2$	11.02	46 %	33.99	32 %	169	20 %
$\frac{1}{2} + \frac{1}{4}\xi^2$	10.20	50 %	31.40	37 %	155.8	26 %
$\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\xi^2$	9.674	53 %	29.83	40 %	148.3	30 %
$\frac{1}{2} - \frac{1}{4}\xi^2$	11.48	44 %	35.44	29 %	176.3	17 %
$\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\xi^2$	12.42	39 %	38.40	23 %	191.30	10 %

Tableau V.4: l'effet de la Distributions des fibres ( $V_f$ ) sur le déplacement des murs voile au sommet Matériau : Carbon /époxyde. Patch de 6mm. Sp/St=0.2Figure V.3: l'effet de la Distribution des fibres  $V_f$  sur le déplacement des murs voile

## V.2.3: Effet de l'épaisseur des matériaux sur le déplacement des murs voile

épaisseurs de la plaque $t_3$	Structure de 15 étages		Structure de 20 étages		Structure de 30 étages	
	$D_{max}$ au sommet (mm)	$(D_{sp}-D_p)/D_{sp}$ (%)	$D_{max}$ au sommet (mm)	$(D_{sp}-D_p)/D_{sp}$ (%)	$D_{max}$ au Sommet (mm)	$(D_{sp}-D_p)/D_{sp}$ (%)
Non renforcé	20.37	00 %	50.09	00 %	211.42	00 %
10 mm	9.733	52 %	23.87	52 %	117.8	44 %
06 mm	10.53	48 %	32.42	35 %	161	24 %
03 mm	11.34	44 %	32.51	35 %	161.5	24 %

Tableau V.5: Effet d'épaisseur du matériau composite sur le déplacement des murs voile au sommet \*Matériau : Carbon /époxyde. \*  $Sp/St=20\%$  \*  $V_f=\xi^2$ \*

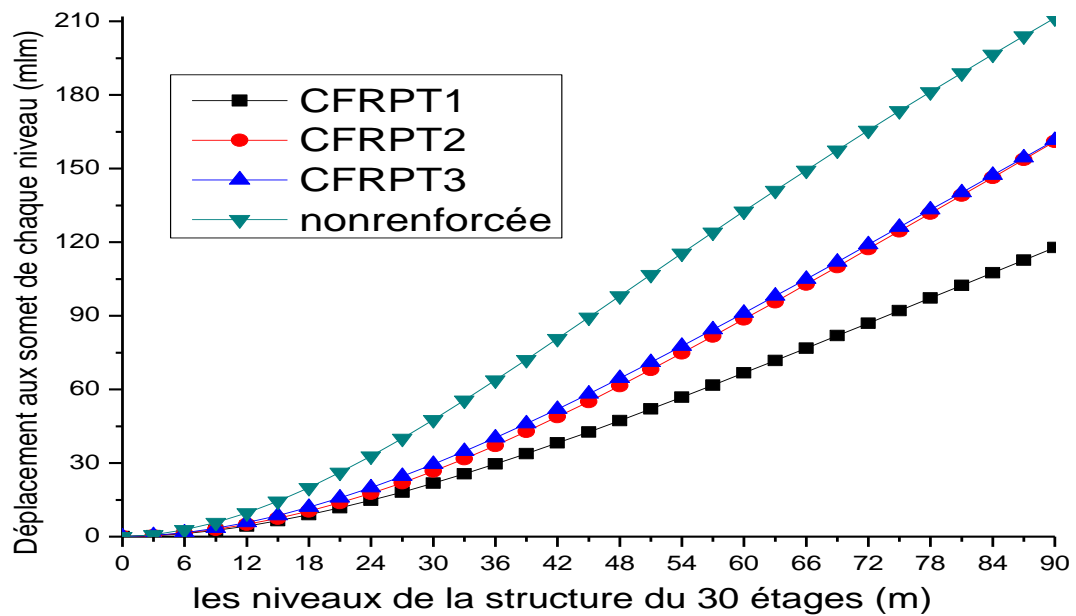
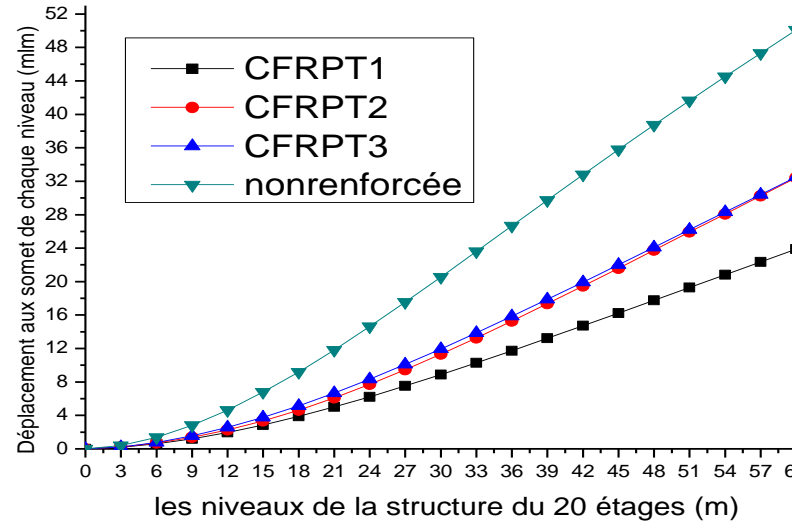
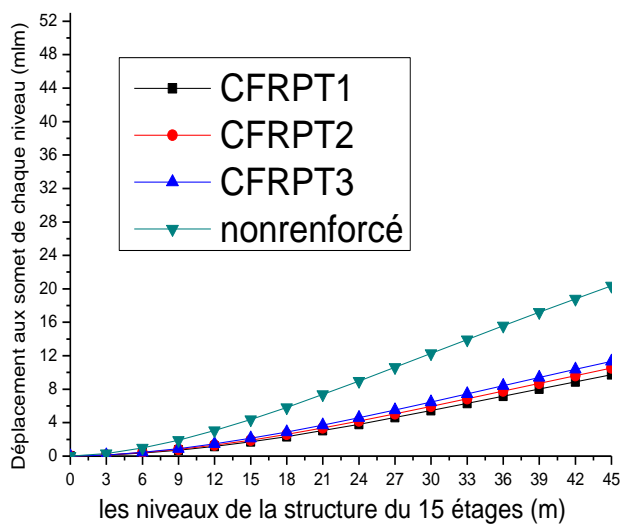


Figure V.4: Effet de l'épaisseur des matériaux de renforcement sur le déplacement des murs voile



V.2.4: Effet du ratio  $sp/st$  sur le déplacement des voiles

Ratio $sp/st$	Structure de 15 étages		Structure de 20 étages		Structure de 30 étages	
	$D_{max}$ au sommet (mm)	$(D_{sp}-D_p)/D_{sp}$ (%)	$D_{max}$ au sommet (mm)	$(D_{sp}-D_p)/D_{sp}$ (%)	$D_{max}$ au sommet (mm)	$(D_{sp}-D_p)/D_{sp}$ (%)
Non renforcé	20.37	00 %	50.09	00 %	211.42	00 %
20 %	11.98	41 %	37.02	26 %	184.3	13 %
40 %	11.55	43 %	35.64	29 %	177.3	16 %
80 %	10.83	47 %	33.36	34 %	165.8	22 %

Tableau V.6: Effet du ratio  $sp/st$  sur le déplacement des voiles au sommet  
Matériau : Carbon /époxyde. Patch de 6mm \*  $V_f = \xi^2$

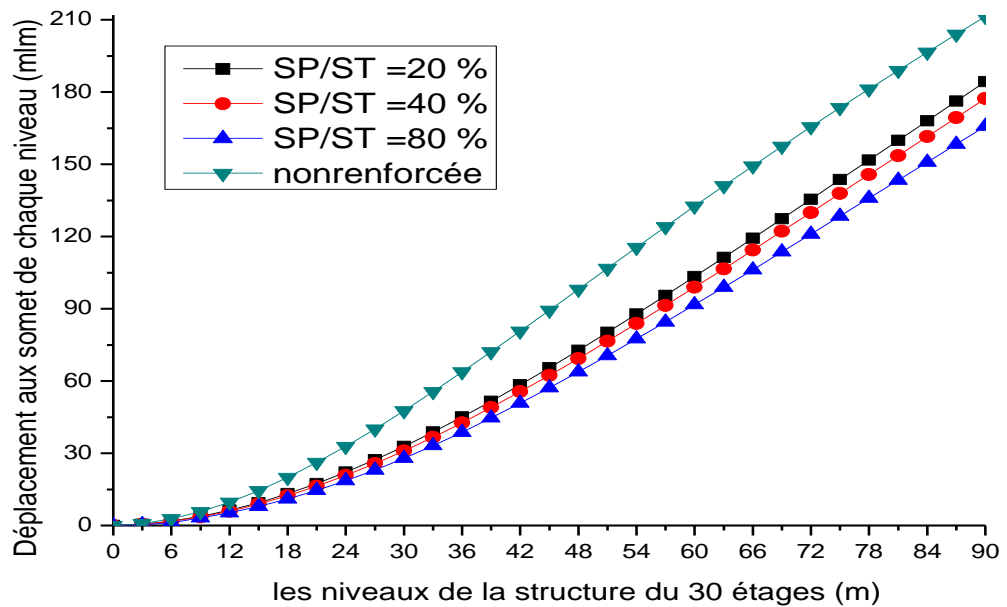
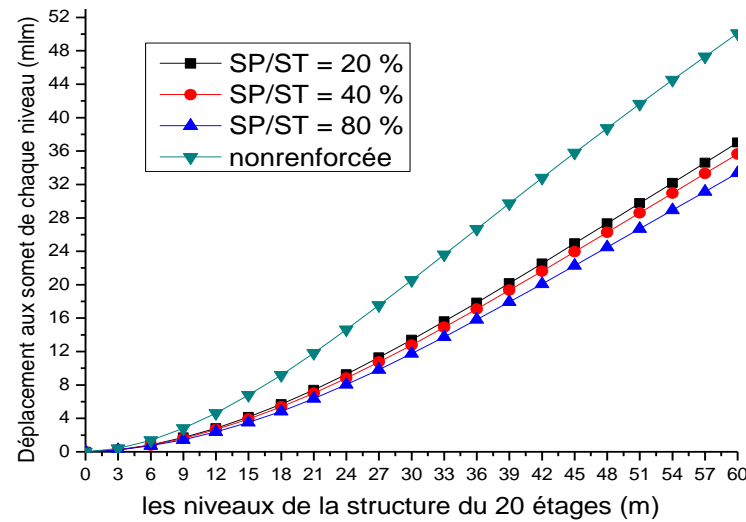
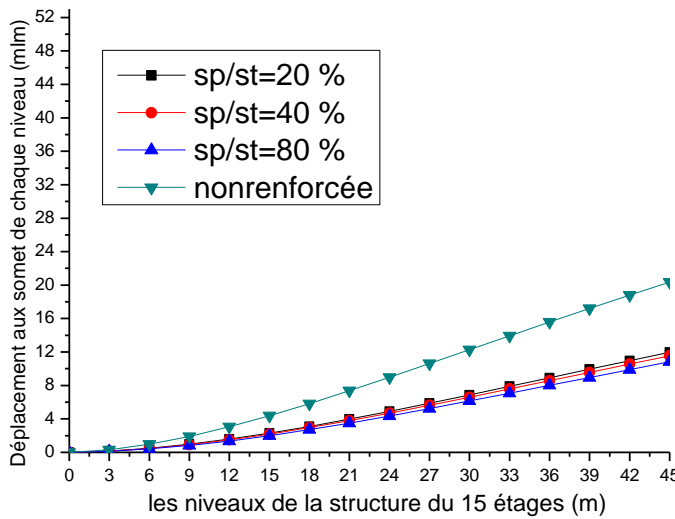


Figure V.5: Effet du ratio  $sp/st$  sur les déplacements des voiles

## V.2.5: Effet des propriétés de l'adhésif sur le déplacement des voiles

$E_{ad}$ MPa	Structure de 15 étages		Structure de 20 étages		Structure de 30 étages	
	$D_{max}$ au sommet (mm)	$(D_{sp}-D_p)/D_{sp}$ (%)	$D_{max}$ au sommet (mm)	$(D_{sp}-D_p)/D_{sp}$ (%)	$D_{max}$ au sommet (mm)	$(D_{sp}-D_p)/D_{sp}$ (%)
Non renforcé	20.37	00 %	50.09	00 %	211.42	00 %
$E1 = 3000$	10.53	48 %	32.42	35 %	161	24 %
$E2 = 5000$	10.52	48 %	32.40	35 %	160.9	24 %
$E3 = 10000$	10.51	48 %	32.37	35 %	160.8	24 %
$E4 = 30000$	10.47	49 %	32.25	36 %	160.2	24 %

Tableau V.7.a: effet du module de Young de l'adhésif ( $E_{ad}$ ) sur le déplacement des voiles au sommet Matériau : Carbone /époxyde. Patch de 6mm \*  $V_f = \xi^2$

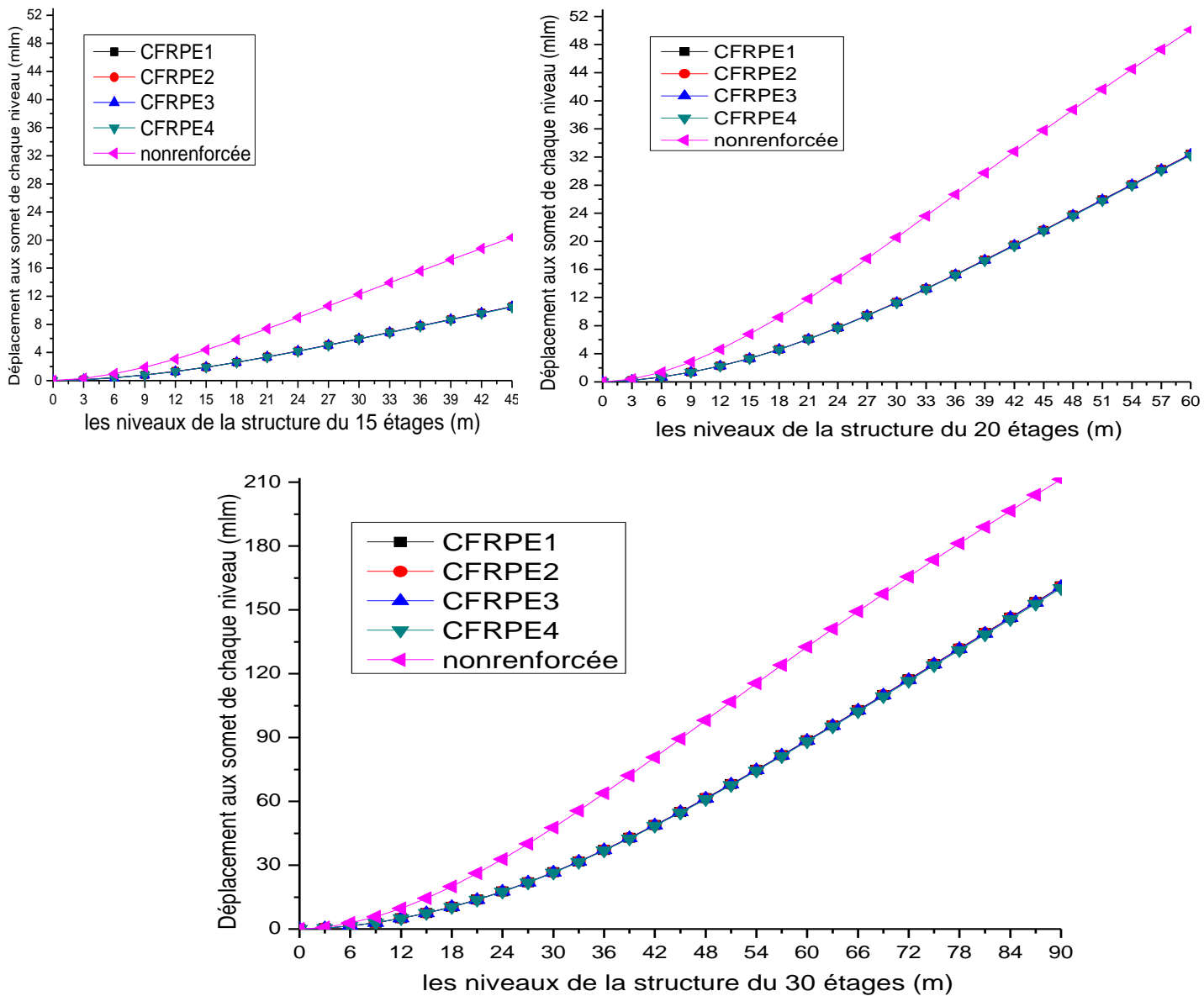


Figure V.6.a: effet du module de Young de l'adhésif ( $E_{ad}$ ) sur le déplacement des voiles

$v_{ad}$	Structure de 15 étages		Structure de 20 étages		Structure de 30 étages	
	$D_{max}$ au sommet (mm)	$(Dsp-Dp)/Dsp$ (%)	$D_{max}$ au sommet (mm)	$(Dsp-Dp)/Dsp$ (%)	$D_{max}$ au sommet (mm)	$(Dsp-Dp)/Dsp$ (%)
Non renforcé	20.37	00 %	50.09	00 %	211.42	00 %
0,35	10.53	48 %	32.42	35 %	161	24 %
0,40	10.53	48 %	32.42	35 %	161	24 %
0,45	10.53	48 %	32.42	35 %	161	24 %
0,50	10.53	48 %	32.42	35 %	161	24 %

Tableau V.7.b: Effet du coefficient de poison de l'adhésif ( $v_{ad}$ ) sur le déplacement des voiles au sommet Matériau : Carbone /époxyde. Patch de 6mm \*  $V_f = \xi^2$

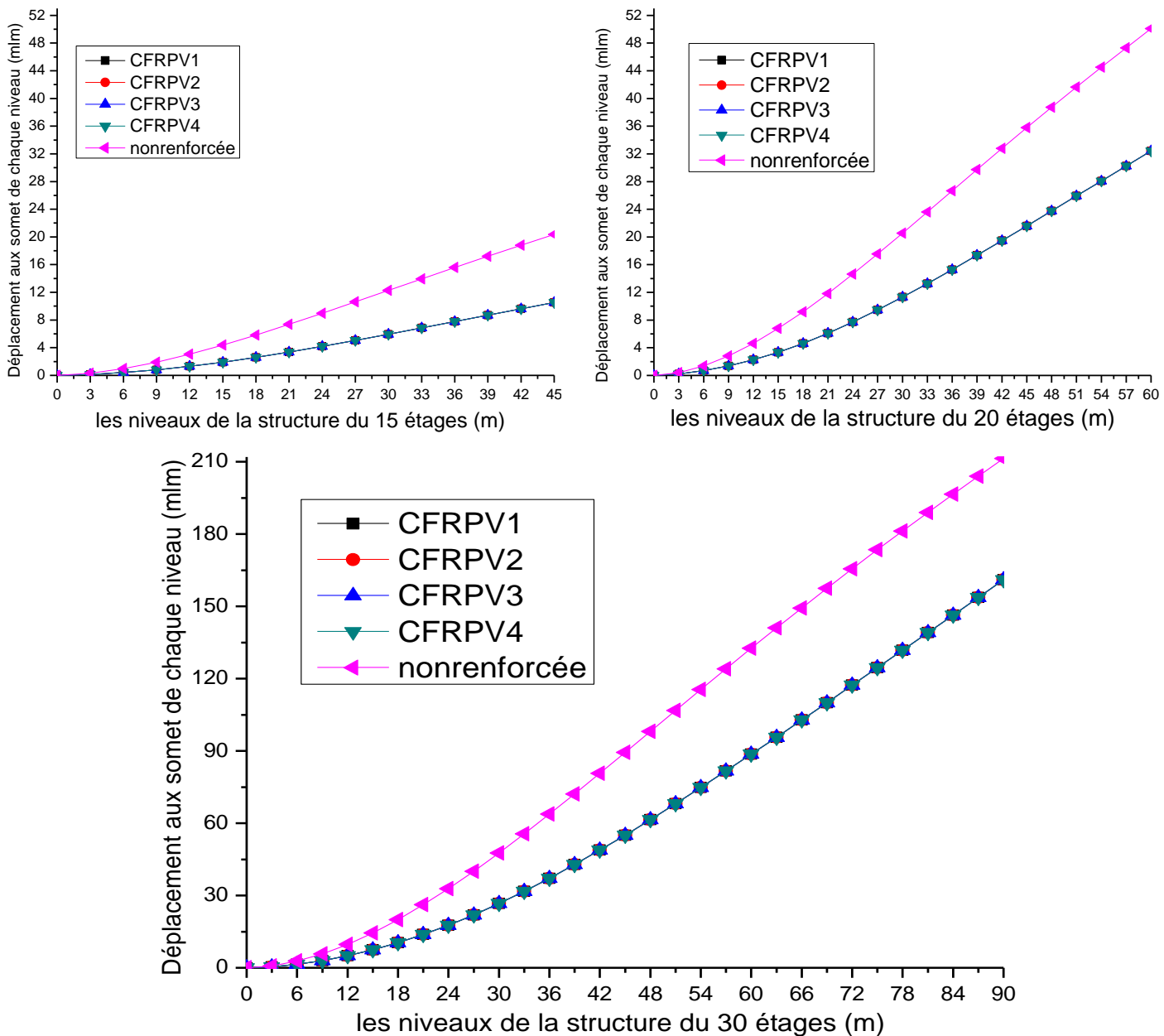


Figure V.6.b: Effet du coefficient de poison de l'adhésif ( $v_{ad}$ ) sur le déplacement des voiles

### V.3: Discussions et interprétations des résultats

D'après les déplacements au sommet présentés dans la figure V.2, les plaques CFRP diminuent les déplacements des murs de contreventement réhabilités avec une réduction avoisinant à un taux de 48%, 36%, 24% pour les structures 15, 20, 30 étages successives. Celles en SFRP d'un taux de 45%, 32%, 18% et la faible réduction était obtenue pour les plaques de verre, environ 41%, 27%, 13%,

Analysons autrement l'efficacité des fractions volumique des fibres  $v_f$  données par la figure V.3, une réduction des déplacements a été enregistré pour un  $v_f = \xi^2$  d'un taux de 48%, 35%, 24% pour les structures 15, 20, 30 étages successives, suivi pour un  $v_f = 1 - \xi^2$  d'un taux de 46%, 32%, 20%, et pour un  $v_f = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\xi^2$  d'un taux de 50%, 37%, 26%. Suivi pour un  $v_f = \frac{1}{2} + \frac{1}{4}\xi^2$  d'un taux de 53%, 40%, 30%. suivi pour un  $v_f = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\xi^2$  d'un taux de 44%, 29%, 17%. suivi pour un  $v_f = \frac{1}{2} - \frac{1}{4}\xi^2$  d'un taux de 39%, 23%, 10%.

Par l'analyse de l'effet de l'épaisseur de la plaque de renforcement sur les déplacements des murs en B.A. (figure V.4). De ce fait, une réduction est observé pour  $t_3 = 10$  mm d'un taux de 52%, 52%, 44% pour les structures de 15, 20, 30 étages successives, pour  $t_3 = 6$  mm d'un taux de 48%, 35%, 24%, un taux de réduction est observé pour  $t_3 = 3$  mm d'un taux de 44%, 35%, 24%.

Se basant sur les déplacements données par la figure V.5, une réduction des déplacements a été enregistré pour un ratio  $sp/st = 80$  % d'un taux de 47%, 34%, 22% pour les structures de 15, 20, 30 étages successives, suivi pour  $sp/st = 40$  % d'un taux de 43%, 29%, 16% et pour  $sp/st = 20$  % d'un taux de 41%, 26%, 13%.

Se basant sur les déplacements données par la figure V.6a, et la figure V.6b des mêmes réductions des déplacements a été enregistrées d'un taux de 48%, 35%, 24% pour les structures de 15, 20, 30 étages successives, pour toutes les  $v_{ad}$  proposées et  $E_{ad}$  proposées.

\*\*\*\*\*

Suivant l'étude paramétrique, et l'interprétation des résultats. On peut déduire que la réduction des déplacements est proportionnelle au caractéristiques mécaniques et géométrique des matériaux de renforcement ( module de Young et mode de distribution des fibres, l'épaisseur de la plaque. et ratio  $sp/st$ ), et non pas proportionnelle au caractéristiques de l'adhésif.

\*\*\*\*\*

### *Conclusion générale*

*L'intérêt principal de la présente analyse est d'étudier par un modèle de calcul en élément fini l'effet de la réhabilitation des murs de contreventement en béton armé par des matériaux composites en fibres de carbone sur le comportement des voiles (les déplacements) de différents bâtiments élancés de 15, 20 et 30 étages.*

*En effet, les structures étaient analysées en se basant sur les caractéristiques mécaniques d'une part (module de Young des fibres selon le type de matériaux, coefficient de poisson de l'adhésif, module de Young de l'adhésif), et d'autre part sur les caractéristiques géométriques (épaisseur, surface de renforcement et fractions volumiques des fibres).*

*Suivant l'étude paramétrique, il a été démontré que les performances escomptées dépendent des propriétés et des dimensions géométriques des plaques composites utilisées, concernant le type de matériaux on a remarqué que les fibres de carbone donnent la meilleure réduction environ 45% à cause de son module de Young qui est élevé, même chose pour les autres caractéristiques géométriques des plaques composites (épaisseur, surface de renforcement et fractions volumiques des fibres), il peut être constaté clairement d'après les graphes que plus les caractéristiques géométriques augmentent, plus le taux de réduction augmente. Par contre rien de performances constaté sur les caractéristiques mécaniques de l'adhésif.*

*Les résultats obtenus étaient satisfaisants, prouvant l'efficacité de l'application de renfort externe par collage des plaques composites (CFRP) sur les déplacements des voiles, et paraît prometteur pour le renforcement parasismique des bâtiments.. Cette étude peut être étendue au calcul sismique des structures contreventées par des murs en béton armé, situées dans les pays à risques sismiques.*

## ***RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES***

- [01] S. Benyoucef, A. Tounsi, S.A. Meftah, E. Adda Bedia «Approximate analysis of the interfacial stress concentrations in FRP-RC hybrid beams», *Composites interface journal*, Vol.13 n°17, 2006, p. 561-571.
- [02] A. Tounsi \* Improved theoretical solution for interfacial stresses in concrete beams strengthened with FRP plate \* *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43 n° 14-15, 2006 , p. 4154-4174.
- [03] H.S. Shen, Y. Chen, J. Yang, «Bending and vibration characteristics of a strengthened plate under various boundary conditions», *Engineering Structures*, Vol. 25, 2003, p.1157-1168.
- [04] A. Balsamo, A. Colombo, G. Manfredi, P.Negro, A.Prota «Seismic behavior of a full-scale RC frame repaired using CFRP laminates», *Engineering structures*, 2005, p. 769-780.
- [05] S. A. Meftah., A. Tounsi., A. Megueni, E.Adda bedia.«A Lateral stiffness and vibration characteristics of RC shear walls bonded with thin plates», *Composite Structures*, Vol. 73, Issue 1, 2006, p. 110-119.
- [06] S.A. Meftah, R. Yeghnem, A. Tounsi, E. Adda Bedia, «Lateral stiffness and vibration characteristics of composite plated RC shear walls with variable fibers spacing», *Materials & Design*, Vol. 29, Issue 10, 2008, p. 1955-1964.
- [07] R. Yeghnem, et al \* Earthquake response of RC coupled shear walls strengthened with thin composite plates\*, *Journal of Vibration and Control*, 2009, Vol. 15, 2009, p. 963-984.
- [08 ] R. Yeghnem \*Étude De La Réponse Sismique Des Murs De Contreventement En Béton Arme Réhabilités Par Des Matériaux Composites \* "SICZS\_2010"
- [09] Davidovici (1999) " la construction en zone sismique " éditions le moniteur, paris .
- [10] Zacek M, (2008) "construire parasismique " Rapport DIREN Rhone-Alpes et grands ateliers de l'Isle d'Abeau.
- [11] Foure, B « Prise en compte du comportement du béton –cas particulier des voiles plans en béton armé « en génie parasismique ,presses de l'ENPC ,1985 PP 605 -616.
- [12] Paulay ,T,Priestley ,M.J.N. « Seisme design of reinforced concrete and masonry buildings "NEW York :Willey &Sons 1992.744 p.
- [13] EUROCODE 8 "Structures in seismic regions, Design, Part 1, General and Building " Report EUR 12266 EN, Bruxelles: office for official publications of the European communities , 1988 ,327p
- [14] Nicolae Ile 2000 THESE : Contribution De La Compréhension Du Fonctionnement Des Voiles En Ba Sous Sollicitation Sismique - L'institut National Des Sciences Appliquées
- [15] Davidovici (1985) "Génie parasismique".Presses de l'école nationale des ponts et chaussée"



- [16] REGLES PS 92 « Règles de construction parasismique, Règles PS applicables aux bâtiments, dites Règles PS 92 « norme française ,AFNOR 1995 , 217p .
- [17] Saadatmanesh H, Ehsani MR. RC beams strengthened with GFRP plates: I. Experimental study. *J Struct Eng ASCE* 1991;117(11):3417–33.
- [18] Henwood A.M, O'Connell. Plate bonding : Auser's guid note. Conference on bridge modification, Institue of civil Engineer, London 1994, p204-216.
- [19] Swamy R.N, Joncs R. Plate bonding technology- The pailless technique of structural rehabilitation, *ACI SP-128, Detroit* 1992, p1385-1405
- [20] Roberts TM. Approximate analysis of shear and normal stress concentrations in adhesive layer of plated RC beams. *Struct Eng London* 1989;67(12):229–33.
- [21] Meier, U. Kaiser, H. (1991) Strengthening of Structures with CFRP Laminates, *Proceedings of Advanced Composites Materials in Civil Engineering Structures (ASCE), Las Vegas, Nevada*, p.224-232.
- [22] Heffernan, P.J., Erki, M.A. (1996) Equivalent Capacity and Efficiency of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fibre Reinforced Plastic Sheets, *Canadian Journal of Civil Engineering*, no. 23, p. 2 1-29
- [23] Djelal, C., David, E., Buyle-Bodin, F. (1996) utilisation de plaques en composite pour la réparation de poutres en béton armé endommagées, *Proceedings of ACMBS-2, Canadian Society for Civil Engineering, Montréal*, p. 581-588.
- [24] M' Bazaa, I. (1995) Renforcement en flexion de poutres en béton armé a l 'aide de lamelles en matériaux composites: optimisation de la longueur des lamelles, *Mémoire de maîtrise, Département de génie civil. Université de Sherbrooke*, 139 p.
- [25] Neale ,K,W,et al ,Renforcement et réhabilitation des structures en béton au moyen des matériaux composites .Description de l'aspect expérimental et rapport d'avancement des travaux pour l'année 1997, *Département de génie civil, Université de Sherbrooke , Québec*.
- [26] Comportement de structures en béton armé renforcées par matériaux composite vis-à-vis de leur mise en conformité sismique E. Ferrier\*, — F. Colomb\*\*, P. Hamelin\*
- [27] Greifenhagen C., Lestuzzi P., *Static cyclic test on lightly reinforced concrete shear walls, Elsevier Science Ltd., 2005*, p.1703-1712
- [28] Sadoune .M ;THESE ( Réhabilitation et Renforcement Des Structures et des Ouvrages d'art par les Matériaux Composites ) Université djilali liabes de SIDI BEL ABBES. 2010
- [29] A. Coull ; N.K Subedi, «Coupled shear walls with two and three bands of openings», *Pergamon Press, Vol. n° 7, 1972*, p. 81-86
- [30] A. Coull; A.W Irwin, "Load distribution in multi-storey shear wall structures», *extrait du rapport final du huitième congrès de l'association des ponts et charpente, 1968*,p .995-1004

- [31] A. Coull; N.W Adams, «Variable stiffness elastic base mechanic for model shear wall structures», *Journal of strain analysis*, Vol. n° 15, 1983, p.145-149
- [32] A. Mcleod, «New rectangular Finite Element for shear wall analysis», *Journal of Structure Division*, Vol. 2, 1969, p.452-461.
- [33] A.K.H. Kwan, «Analysis of coupled shear walls/frame structures by frame method with shear deformation allowed», *Journal of Structural Engineering*, part2, 1991, p .273-297
- [34] A.K.H. Kwan, "Reformulation of frame method», *Journal of structural Engineering*, paper 9809, 1992, p .103-116
- [35] A.K.H. Kwan, "Equivalence of finite elements and analogous frame modules for shear/core wall analysis », *Computers and structures*, Vol.57, n°2, 1995, p .193-203.
- [36] A.W. Leissa ; A.F. Martin, «Vibration and buckling of rectangular composite plates with variable fiber spacing», *Composite Structures* 14, 1990, p .339-357
- [37] O. Chaallal; Gauthier; P. Malenfant, «Classification methodology for coupled shear walls», *Journal of Structural Engineering*, Vol. n°122, 1996, p .1453-1447
-