REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE AMAR THELIDJI- LAGHOUAT

FACULTE DE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : **ZAABANE MERIEM**

Domaine Sciences et Technologies
Filière Génie Civil
Option : structures

THEME

METHODES DE RENFORCEMENT DES PORTIQUES EN BETON ARME ENDOMMAGES PAR L'ACTION SISMIQUE : ETUDE DE CAS

Jurys de soutenance

Nom et Prénom	Grade	Qualité
AMARA Salah	Professeur	Président
BELLAKEHAL Hizia	MCA	Examinatrice
MERAH Ahmed	Professeur	Rapporteur

Promotion : Juin – 2024

بسم الله الرحمن الرحيم

Remerciement

Tout d'abord, je tiens à remercier Allah, le clément et le bienveillant, de m'avoir donné la force et le courage pour mener à bien ce modeste travail.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers ma famille pour leur patience à mon égard, leur soutien constant et leurs encouragements qui ont permis la réalisation de ce travail.

Je voudrais exprimer mes vifs remerciements à mon directeur de thèse, le Professeur Ahmed MERAH, pour ses orientations éclairées, son expertise précieuse et ses conseils avisés qui ont grandement enrichi ce travail.

Je tiens à remercier chaleureusement les membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Mes remerciements vont également à tous ceux et celles qui, de près ou de loin, m'ont apporté aide et encouragement, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Merci

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à la mémoire de mon cher père.

À ma chère mère, pour leurs efforts, leurs sacrifices et leurs prières tout au long de mon parcours scolaire.

À mes très chères sœurs Zineb, Hiba.

À mon frères Abdelkader, Abdelaziz, Mohamed & Walid.

À tout(e)s mes ami(e)s.

À toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, apporté aide et encouragement.

Zaabane Meriem

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE AMAR THELIDJI- LAGHOUAT

FACULTE DE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

RESUME DE MEMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Génie Civil
Option : Structure
Thème : Méthodes de renforcement des portiques en béton armé endommagés par l'action sismique : étude de cas.

Présenté par :

- ZAABANE Meriem

Encadré par :

- Pr. MERAH Ahmed

Résumé :

Le séisme est une catastrophe naturelle qui frappe pratiquement le nord de l'Algérie et génère beaucoup de dégâts matériels et humains. Les bâtiments conçus en portiques auto stables en béton armé sont particulièrement vulnérables à ces phénomènes.

De nombreuses recherches ont été menées sur les méthodes de renforcement des structures en béton armé. Les portiques auto stables en béton armé ont été au centre de ces études en raison de leur importance dans la résistance aux séismes.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier un bâtiment R+3 composé de 3 portiques auto stable en béton armé selon trois configurations (structure initiale, endommagée et renforcée).

Le résultat obtenu montre l'efficacité de renforcement proposé sur la performance et la capacité de reprendre les efforts horizontaux.

Mots clés : Méthodes de renforcement, Portiques auto stable en béton armé, Séisme, Endommagement, vulnérabilité.

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

AMAR THELIDJI UNIVERSITY -LAGHOUAT

FACULTY: CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE
CIVIL ENGINEERING SECTOR

ABSTRACT OF MASTER MEMORY

Domain: Science and Technology
Department: Civil Engineering
Specialty: Structure
Theme: Methods of reinforcing reinforced concrete frames damaged by seismic action: case study.

Presented by :

- ZAABANE Meriem

Supervised by :

- Pr. MERAH Ahmed

Abstract :

The earthquake is a natural disaster that frequently affects northern Algeria, causing significant material and human damage. Buildings constructed with self-stable reinforced concrete frames are particularly susceptible to these events.

Extensive research has been conducted on reinforcement methods for concrete structures. Self-stable reinforced concrete frames have been a focal point of these studies due to their critical role in earthquake resistance.

The objective of this dissertation is to investigate an G+3 building composed of self-stable R.C. portal frames in three configurations: initial, damaged, and reinforced structures.

The results demonstrate the effectiveness of the proposed reinforcement on the performance and the ability to withstand horizontal forces.

Keywords: Earthquake, Reinforcement methods, self-stable R.C. portal frames, Damage Vulnerability.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة عمار ثليجي – الأغواط
كلية الهندسة المدنية والمعمارية
قسم الهندسة المدنية

ملخص مذكرة الماستر

الميدان :علوم وتكنولوجيا

الشعبة :هندسة مدنية

التخصص :هياكل

عنوان المذكرة :أساليب تعزيز الإطارات الخرسانية المسلحة المتضررة بفعل القوى الزلزالية: دراسة حالة .

تقديم الطالبة:

- زعبان مريم

الأستاذ المؤطر :

- السيد مراح أحمد

ملخص المذكرة:

الزلزال هو كارثة طبيعية تضرب شمال الجزائر بشكل متكرر وتسبب أضراراً كبيرة في الممتلكات والأرواح. المباني المصممة بدعامات من الخرسانة المسلحة الذاتية المستقرة تعتبر هشة بشكل خاص تجاه هذه الظواهر.

تم إجراء العديد من الأبحاث حول طرق تعزيز الهياكل المصنوعة من الخرسانة المسلحة. لقد كانت الإطارات الذاتية المستقرة للخرسانة المسلحة محور هذه الدراسات نظراً لأهميتها في مقاومة الزلازل.

هدف هذه الرسالة العلمية هو دراسة مبنى من النوع R+3 يتكون من إطارات ذاتية المستقرة من الخرسانة المسلحة في ثلاثة تكوينات: الهيكل الأصلي، الهيكل المتضرر جراء الزلزال، والهيكل المعزز بعد التدابير الوقائية.

النتائج تظهر فعالية التعزيز المقترح في تحسين الأداء وزيادة القدرة على تحمل القوى الأفقية.

الكلمات المفتاحية :الزلزال، طرق تعزيز، الإطارات الذاتية المستقرة للخرسانة المسلحة,ضرر,هشاشة.

Tableau de matière

RESUME
ABSTRACT
ملخص
LISTE DES FIGURES
LISTE DES TABLEAUX
Introduction générale ..... 1.
Chapitre 1. Dommages sismiques des portiques auto-stables en béton armé ..... 3.
1.1 Introduction 4
1.2 Généralités sur les séismes 4
1.2.1 Définition 4
1.2.2 Sismicité en Algérie 4
1.2.3 Méthodes d'évaluation de l'action sismique 5
1.3 Combinaisons d'actions 10
1.4 Dommages sismiques des portiques auto-stables en béton Armé 10
1.4.1 Classification des Dégâts 10
1.4.2 Types des dommages subis par les portiques lors d'un séisme 13
1.5 Conclusion 22
Chapitre 2. Techniques et méthodes de renforcement des portiques auto-stables en béton armé endommagés par l'action sismique ..... 23.
2.1 Introduction 24
2.2 Définition de renforcement 24
2.3 Stratégie de renforcement 24
2.4 Choix d'une solution de renforcement 25
2.5 Préparation d'une opération de renforcement 26
2.6 Méthodes de renforcement 26
2.6.1 Traitement des fissures par l'injection 26
2.6.2 Projection du béton 27
2.6.3 Renforcement à l'aide de profiles métalliques 29
2.6.4 Renforcement par Gainage métallique 30
2.6.5 Renforcement par chemisage en béton armé : 32
2.6.6 Renforcement par chemisage en acier : 36
2.6.7 Renforcement par voiles de contreventement 38
2.6.8 Renforcement par contreventement métalliques 40
2.6.9 Réduction des charges sismique par des dispositifs amortisseurs 41
2.6.10 Renforcement par matériaux composites (Polymères Renforcés en Fibres) 43
2.6.11 Renforcement des fondations existant 49
2.7 Conclusion : 50
Chapitre 3. Etude de cas……. ..... **51.**
3.1 Introduction 52
3.2 Présentation du cas étudié 52
3.3 Etude de cas 53

3.3.1 Comparaison des résultats 53
3.3.1.1 Résultats des efforts normaux et moments pour les poteaux ..... ……..53
3.3.1.2 Résultats des contraintes pour les poteaux 56
3.3.1.3 Résultats des contraintes pour les poutres principales 57
3.4 Conclusion 58
Conclusion Générale ..... **60.**
Annexes ..... 62.
Références bibliographiques ..... 71.

Liste des Figures

Chapitre 1 : Dommages sismiques des portiques auto-stables en béton armé.

Figure 1. 1. Schéma illustrant les paramètres d'un séisme. 4
Figure 1. 2. Carte De Zonage Sismique Du Territoire National. 5
Figure 1. 3. Courbe de Spectre de réponse. 9
Figure 1. 4. Dégâts aux Poutres. 12
Figure 1. 5. Dégâts aux Poteaux. 12
Figure 1. 6. Dégâts aux Nœuds poteau-poutre. 13
Figure 1. 7. Fissures orthogonales sur l'axe de la poutre le long de la travée dans la zone de tendue. 13
Figure 1. 8. Fissures de Flexion sur les faces supérieure ou inférieure aux appuis de la poutre. 14
Figure 1. 9. Fissures de cisaillement de forme X dans les poutres courtes (linteaux). 14
Figure 1. 10. Échec de cisaillement ou de flexion dans les points où les poutres principales sont les supports des poutres secondaires. 15
Figure 1. 11. L'échec des poutres par flexion - cisaillement près des appuis. 15
Figure 1. 12. Rupture dans les poutres par flexion. 16
Figure 1. 13. Modes de défaillance dans les poteaux courts. 16
Figure 1. 14. Fissure de cisaillement induite par l'effet de poteau court. 17
Figure 1. 15. Destruction par cisaillement du poteau court. 17
Figure 1. 16. Cisaillement des poteaux dus à l'interaction avec la maçonnerie 17
Figure 1. 17. Cisaillement des poteaux d'une construction à Bordj el bahri. Séisme de Boumerdes, Algérie 2003. 18
Figure 1. 18. Dommages typiques dans les poteaux. 19
Figure 1. 19. Ecrasement de béton et flambement des aciers dans les deux poteaux. 19
Figure 1. 20. Rotule dans les extrémités d'un poteau. 20
Figure 1. 21. Décollement du béton d'enrobage. 20
Figure 1. 22. Dommages aux joints poteau-poutre. 21
Figure 1. 23. Joint poutre-poteau non endommagé. 21
Figure 1. 24. Joint poutre-poteau endommagé. 21
Figure 1. 25. Manque de conception appropriée des connexions poutre-poteau. 22

Chapitre 2 : Techniques et méthodes de renforcement des portiques auto-stables en béton armé endommagés par l'action sismique.

Figure 2. 1. Stratégies de renforcement 25
Figure 2. 2. Traitement de fissure par injection. 27
Figure 2. 3. Renforcement au moyen de béton projeté. 28
Figure 2. 4. ***a***. Tableau montrant les différences entre les deux méthodes ***b.*** *schématisation des deux méthodes* 28

Figure 2. 5. Renforcement de poteaux au moyen de profilés métallique. 30
Figure 2. 6. Renforcement par gainage métallique. 31
Figure 2. 7. Etapes de chemisage en béton armé. 33
Figure 2. 8. Chemisage d'une poutre. 33
Figure 2. 9. Chemisage des 4 poteaux centraux. 34
Figure 2. 10. Coffrage à mi-hauteur et résultat après décoffrage. 35
Figure 2. 11. Chemisage des 4 poteaux terminés. 35
Figure 2. 12. Chemisage en acier appliqué aux poteaux. 36
Figure 2. 13. Différentes configurations de chemisage en acier appliquées aux poteaux. 37
Figure 2. 14. Assemblage de chemise d'un nœud poutre-poteau. 37
Figure 2. 15. Renforcement en béton armé par voiles de contreventement. 38
Figure 2. 16. Liaison du voile avec le poteau. 39
Figure 2. 17. Création de voile avec chemisage des poteaux en place. 39
Figure 2. 18. Exemple de contreventement métallique. 40
Figure 2. 19. Exemple d'un amortisseur visqueux. 41
Figure 2. 20. Exemple d'un amortisseur à friction. 42
Figure 2. 21. Contreventement amortissant. 42
Figure 2. 22. Schéma d'un matériau composite. 43
Figure 2. 23. Figure 2.23. Divers tissus de fibres. 44
Figure 2. 24. Conception du système multicouche. 45
Figure 2. 25. Méthodes typiques d'enveloppement des poteaux en BA par PRF. 46
Figure 2. 26. Renforts des poutres par collage de plats composites. 46
Figure 2. 27. Renforts des poteaux par fibres de carbone. 47
Figure 2. 28. Renforts des nœuds par fibre de carbone. 47
Figure 2. 29. Phases de fonctionnement séquentielles pour l'intervention des nœuds par fibre de carbone 48
Figure 2. 30. Renforcement des fondations. 49

Chapitre 3 : Etude de cas.

Figure 3. 1. Vue en 3D du model obtenu par le logiciel ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS 53

Liste des Tableaux

CHAPITRE 1 : DOMMAGES SISMIQUES DES PORTIQUES AUTO-STABLES EN BETON ARME.

TABLEAU 1.1.DOMMAGES STRUCTURAUX ET NON STRUCTURAUX : CLASSIFICATION DES DEGATS AUX BATIMENTS EN MAÇONNERIE ET EN BETON ARME. 11

Chapitre 2 : Techniques et méthodes de renforcement des portiques auto-stables en béton armé endommagés par l'action sismique**.**

TABLEAU 2. 1.AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE QUELQUES PRODUITS D'INJECTION. 26
TABLEAU 2. 2.AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA PROJECTION PAR VOIE HUMIDE. 29
TABLEAU 2. 3.AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA PROJECTION PAR VOIE SECHE. 29
TABLEAU 2. 4.AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU RENFORCEMENT A L'AIDE DE PROFILES METALLIQUES..... 30
TABLEAU 2. 5. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU RENFORCEMENT PAR GAINAGE METALLIQUE**.** 31
TABLEAU 2. 6.AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU RENFORCEMENT PAR CHEMISAGE EN BETON ARME.. 36
TABLEAU 2. 7.AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU RENFORCEMENT PAR CHEMISAGE EN ACIER.. 38
TABLEAU 2. 8.AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU RENFORCEMENT PAR VOILES DE CONTREVENTEMENT..... 40
TABLEAU 2. 9.AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU RENFORCEMENT PAR CONTREVENTEMENT METALLIQUE.. 41
TABLEAU 2. 10.AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU RENFORCEMENT PAR CONTREVENTEMENT AMORTISSANT. 43
TABLEAU 2. 11. PROPRIETES MECANIQUES TYPIQUES DES COMPOSITES PRFV, PRFC ET PRFA. 44
TABLEAU 2. 12. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU RENFORCEMENT PAR MATERIAUX COMPOSITES (PRF). 48
TABLEAU 2. 13.AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU RENFORCEMENT DES FONDATIONS EXISTANTES. 50

Chapitre 3 : Etude de cas.

TABLEAU3. 1. CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DU BATIMENT..... 52
TABLEAU 3. 2.COMPARAISON DES RESULTATS DES EFFORTS NORMAUX ET MOMENTS POUR LES POTEAUX ENTRE LA STRUCTURE INITIALE ET ENDOMMAGEE (ÉTATS LIMITES ULTIMES - ELU)..... 53
TABLEAU 3. 3.COMPARAISON DES RESULTATS DES EFFORTS NORMAUX ET MOMENTS POUR LES POTEAUX ENTRE LA STRUCTURE ENDOMMAGEE ET RENFORCEE (ÉTATS LIMITES ULTIMES - ELU)..... 54
TABLEAU 3. 4.COMPARAISON DES RESULTATS DES EFFORTS NORMAUX ET MOMENTS POUR LES POTEAUX ENTRE LA STRUCTURE INITIALE ET ENDOMMAGEE (ÉTATS LIMITES DE SERVICE - ELS)..... 54
TABLEAU 3. 5. *COMPARAISON DES RESULTATS DES EFFORTS NORMAUX ET MOMENTS POUR LES POTEAUX ENTRE LA STRUCTURE ENDOMMAGEE ET RENFORCEE (ÉTATS LIMITES DE SERVICE - ELS).*..... 55
TABLEAU 3. 6. COMPARAISON DES RESULTATS DES EFFORTS NORMAUX ET MOMENTS POUR LES POTEAUX ENTRE LA STRUCTURE INITIALE ET ENDOMMAGEE (ÉTATS LIMITES ACCIDENTELS - ELA)..... 55

Liste des Tableaux

TABLEAU 3. 7. COMPARAISON DES RESULTATS DES EFFORTS NORMAUX ET MOMENTS POUR LES POTEAUX ENTRE LA STRUCTURE ENDOMMAGEE ET RENFORCEE (ÉTATS LIMITES ACCIDENTELS - ELA).....56
TABLEAU 3. 8. COMPARAISON DES RESULTATS DES CONTRAINTES POUR LES POTEAUX (ELU).....56
TABLEAU 3. 9. COMPARAISON DES RESULTATS DES CONTRAINTES POUR LES POTEAUX (ELS).....57
TABLEAU 3. 10. COMPARAISON DES RESULTATS DES CONTRAINTES POUR LES POTEAUX (ELA).....57
TABLEAU 3. 11. COMPARAISON DES RESULTATS DES CONTRAINTES POUR LES POUTRES PRINCIPALES (ELU).....58

Introduction générale

Introduction générale

Les séismes représentent un défi majeur dans le domaine du génie civil. Ces phénomènes naturels peuvent être extrêmement destructeurs en fonction de certains facteurs tels que la magnitude, la distance à l'épicentre, le type de sol, les matériaux utilisés et la typologie des structures. Ils entraînent d'importantes pertes humaines et matérielles dans les zones urbaines densément peuplées, en raison de l'effondrement des constructions.

Au cours des 50 dernières années, le nord de l'Algérie a été frappé par plusieurs tremblements de terre violents et dévastateurs, en raison de sa position géographique à la frontière entre les plaques tectoniques africaine et eurasiatique. Parmi les séismes notables, on peut citer celui d'El Asnam (aujourd'hui Chlef) le 9 septembre 1954 (magnitude 6,8) et le 10 octobre 1980 (magnitude 7,3), ainsi que le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 (magnitude 6,9).

La plupart des bâtiments en Algérie sont constitués de portiques auto-stables en béton armé. L'expérience du séisme de Boumerdès en 2003 a démontré que ce type de structures, représentant entre 80 % et 90 % des constructions, a subi des dommages allant de légers à la destruction en raison de leur vulnérabilité.

Le renforcement est considéré comme la stratégie la plus courante lors de la réhabilitation parasismique des portiques auto-stables en béton armé. Ce processus améliore leur résistance mécanique et réduit leur vulnérabilité aux futurs séismes.

Les méthodes de renforcement varient en fonction des dommages subis par les portiques. Parmi ces méthodes figurent le chemisage en acier et en béton armé, l'utilisation de matériaux composites (PRF), ainsi que les techniques d'injection des fissures.

Pour évaluer l'effet de ces techniques de renforcement et modéliser l'endommagement des structures en portiques, plusieurs logiciels peuvent être utilisés. Le logiciel ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, dans ses dernières mises à jour, propose une option permettant de prendre en compte l'endommagement (fissuration) des portiques auto-stables en béton armé par la réduction de l'inertie.

L'objectif principal de ce projet de fin d'étude consiste à présenter diverses techniques et méthodes de renforcement utilisées pour renforcer les structures en portiques auto-stables en béton armé endommagées par l'action sismique, afin d'améliorer la résistance de ces structures. Dans ce contexte, l'étude de cas numérique se révèle être un outil essentiel pour évaluer l'efficacité de ces méthodes de renforcement

- **Présentation du mémoire :**

Ce projet de fin d'étude est structuré en trois chapitres principaux après l'introduction générale.

-***Le premier chapitre*** **:** est dédié à une connaissance du phénomène sismique (généralités sur les séismes) ainsi que les effets causés par ce phénomène sur les portiques auto stable en béton armé.

-***Le deuxième chapitre :*** est consacré à la présentation des différents types de renforcement post-sismique des portiques auto stable en béton armé ainsi qu'à la description des différentes méthodes de réhabilitation.

-**Le troisième chapitre :** traite un cas de renforcement d'un bâtiment implanté à Alger zone sismique IIa conçu en portiques auto stable en béton armé endommagés par un séisme.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale et des recommandations

Chapitre 1

Dommages sismiques des portiques auto-stables en béton armé

1.1 Introduction

Les tremblements de terre sont perçus comme l'un des dangers majeurs les plus destructeurs pour les bâtiments et les équipements dans le secteur du génie civil. Les normes de construction sont conçues pour réduire les effets de ce phénomène naturel tels que les règlements parasismiques, qui préconisent dans certains cas des systèmes de contreventement, tels que les portiques auto-stables en béton armé. Ces derniers subissent une forte action de ce phénomène géologique. Il peut entraîner des dégâts, en fonction de divers éléments, tels que l'intensité du tremblement de terre et la nature des matériaux utilisés dans la construction. La compréhension de ces dégâts nous amène à envisager à l'avenir de concevoir et améliorer le comportement parasismique des constructions qui sont contreventées par des portiques auto-stables.

1.2 Généralités sur les séismes

1.2.1 Définition

Un tremblement de terre est un phénomène géologique caractérisé par des mouvements de sol ressentis au niveau de la surface de la terre, qui suivent une libération brusque d'énergie accumulée le long des failles de la croûte terrestre, sous forme d'ondes sismiques. L'hypocentre ou foyer, c'est l'endroit sur une faille où démarre la rupture, peut être situé à des profondeurs allant jusqu'à 700 kilomètres sous la surface de la Terre, alors que l'épicentre, c'est le point sur la surface de la Terre directement au-dessus du foyer. **[1]**

La figure 1.1 illustre les paramètres du séisme.

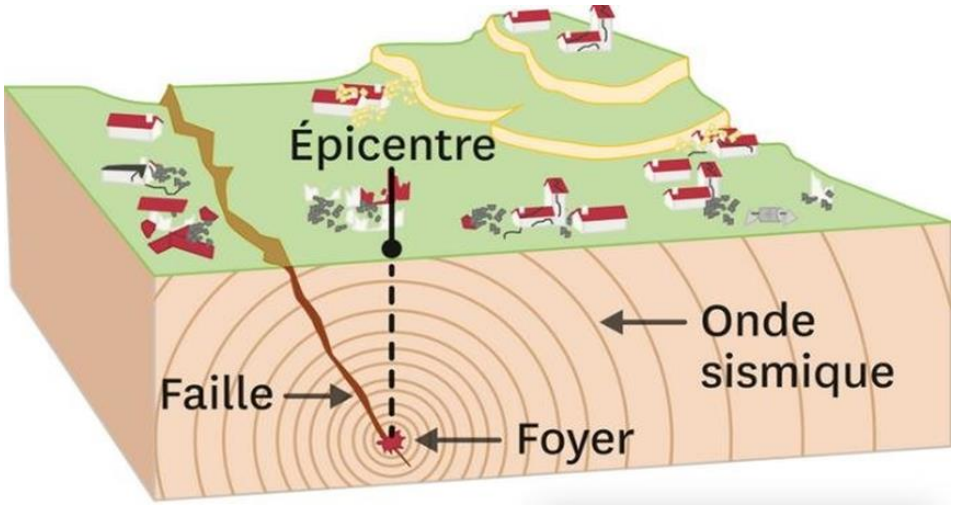


Figure 1. 1*.Schéma illustrant les paramètres d'un séisme.* [2]

Ce phénomène avait des conséquences significatives, telles que, les pertes humaines, les dommages matériels et d'autres impacts environnementaux dans les zones touchées.

1.2.2 Sismicité en Algérie

L'Algérie est considérée comme une région sismique active depuis des millions d'années**,** en raison de sa position géographique le long de la ceinture de feu dans l'océan Pacifique, ainsi que de l'interaction des plaques tectoniques africaine et eurasiatique. Cette interaction des plaques tectoniques provoque la formation des chaînes de montagnes atlasique et alpine. [3]

Dans ce contexte, les règles parasismiques Algériennes (RPA99/2003) divisent le territoire national en 05 zones sismiques, selon le niveau de risque sismique pour chacune d'entre elles.

1.2.2.1 Classification Des Zones Sismiques

En utilisant des études géologiques et sismiques, les zones sismiques en Algérie sont classées en fonction de leur activité sismique, cela permet d'ajuster les normes de construction pour chaque région, et assurer la sécurité des habitants et la résistance des infrastructures aux séismes.

Selon le Règlement Parasismique Algérien de 1999 (RPA99/2003), le territoire national est devisé en cinq zones **(**Figure Ⅰ.2) de sismicité croissante, comme suit :

- **Zone 0** : Sismicité Négligeable.
- **Zone Ⅰ** : Sismicité Faible.
- **Zone Ⅱ-a** Et **Zone, Ⅱ-b** : Sismicité Moyen.
- **Zone Ⅲ** : Sismicité Élevé.

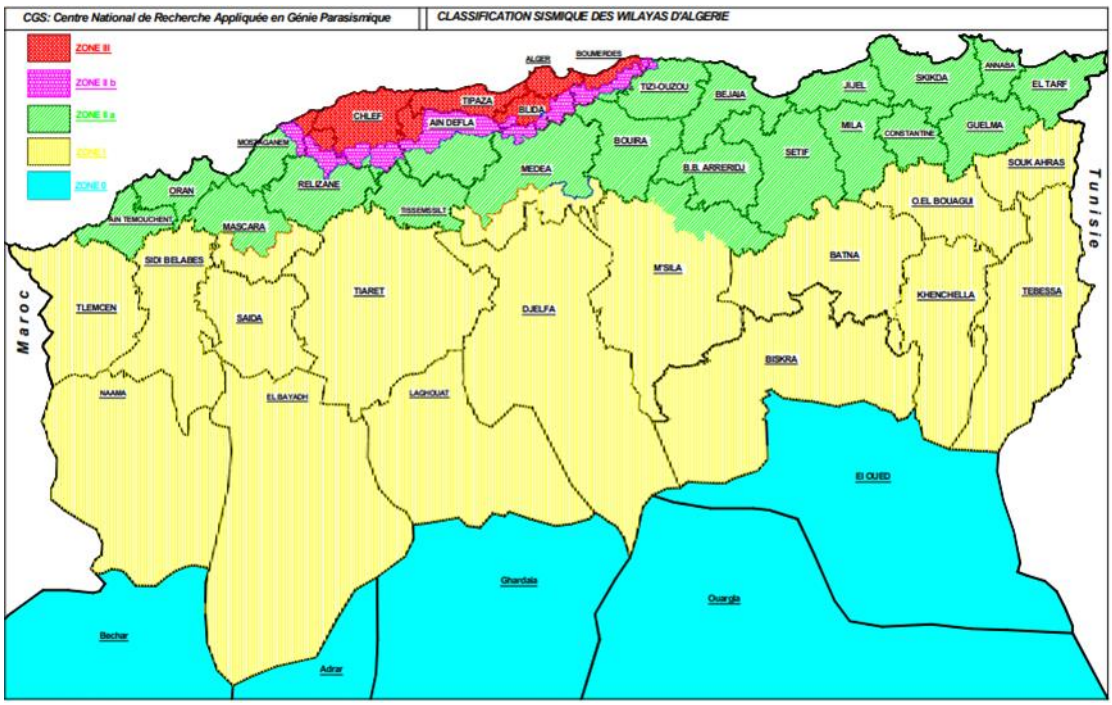


Figure 1. 2.*Carte De Zonage Sismique Du Territoire National.* **[4]**

1.2.3 Méthodes d'évaluation de l'action sismique

L'évaluation de l'action sismique sur les constructions en génie civil vise principalement à estimer les forces sismiques dans le but de concevoir des structures résistantes.

Dans ce contexte, les règles parasismiques adoptent des méthodes simplifiées qui facilitent la tâche d'étude et d'analyse des phénomènes sismiques complexes pour les ingénieurs civils. Selon le RPA99/2003 les méthodes utilisées sont :

- Méthode Statique Équivalente.
- Méthode Modale Spectrale.

- Méthode D'analyse Dynamique Par Accélogrammes.

1.2.3.1 Méthode Statique Équivalente

La méthode statique équivalente rend facile l'analyse sismique en considérant les forces dynamiques provoquées par les mouvements du sol comme des charges statiques. Ces charges sont calculées à partir d'un système de forces orientées dans la direction du séisme. La force statique équivalente est déterminée par une formule simplifiée qui contient plusieurs coefficients qui concernent les mouvements du sol, les propriétés physiques et dynamiques du bâtiment, en plus son utilisation principale.

1.2.3.1.1 Calcul de la force sismique totale

La force sismique totale (V), appliquée à la base de la structure, est calculée de manière successive dans deux directions horizontales orthogonales, conformément à la réglementation RPA 99/2003 en vigueur, selon la formule recommandée :

$$V=\frac{ADQ}{R}\ W \qquad \textbf{1.1}$$

A : Coefficient d'accélération de zone, déterminé en fonction de la zone sismique spécifique et du groupe d'usage du bâtiment.

D : Facteur d'amplification dynamique moyen, fonction de la catégorie de site, du facteur de correction d'amortissement (η) et de la période fondamentale de la structure (T).

$$D=\begin{cases} 2.5\eta & 0\le T\le T_2 \\ 2.5\eta(T_2/T)^{\frac{2}{3}} & T_2\le T\le 3.0s \\ 2.5\eta(T_2/T)^{\frac{2}{3}}(3.0/T)^{\frac{5}{3}} & T\ge 3.0s \end{cases} \qquad \textbf{1.2}$$

T_2 : Période caractéristique, associée à la catégorie du site.

T : La période fondamentale de la structure peut être estimée à l'aide de formules empiriques ou calculée par des méthodes analytiques ou numériques.

La formule empirique à utiliser selon les cas est la suivante :

$$T=C_T\ h_N^{3/4} \qquad \textbf{1.3}$$

h_N : hauteur mesurée en mètres à partir de la base de la structure jusqu'au dernier niveau (N).

C_T : Coefficient, fonction du système de contreventement, et du type de remplissage.

η: Facteur de correction d'amortissement (quand l'amortissement est différent de 5%)

$$\eta=\sqrt{\frac{7}{2+\xi}}\ge 0.7 \qquad \textbf{1.4}$$

Où ξ (%) est le pourcentage d'amortissement critique fonction du matériau constitutif, du type de structure et de l'importance des remplissages.

Q : Facteur de qualité.

Le facteur de qualité de la structure est fonction de :

-la redondance et de la géométrie des éléments qui la constituent.

-la régularité en plan et en élévation.

-la qualité du contrôle de la construction.

La valeur de Q est déterminée par la formule :

$Q=1+\sum_1^5 P_q$ **1.5**

$\mathbf{P_q}$ est la pénalité à retenir selon que le critère de qualité q " est satisfait ou non".

❖ D'après le RPA99/2003 Les critères de qualité "Q" à vérifier sont :

1. Conditions minimales sur les files de contreventement :

- **système de portiques** : chaque file de portique doit comporter à tous les niveaux, au moins trois (03) travées dont le rapport des portées n'excède pas 1,5. Les travées de portique peuvent être constituées de voiles de contreventement.

- **système de voiles** : chaque file de voiles doit comporter à tous les niveaux, au moins un (01) trumeau ayant un rapport "hauteur d'étage sur largeur" inférieur ou égal à 0,67 ou bien deux (02) trumeaux ayant un rapport "hauteur d'étage sur largeur «inférieur ou égal à 1,0. Ces trumeaux doivent s'élever sur toute la hauteur de l'étage et ne doivent avoir aucune ouverture ou perforation qui puisse réduire de manière significative leur résistance ou leur rigidité.

2. Redondance en plan :

Chaque étage devra avoir, en plan, au moins quatre (04) files de portiques et/ou de voiles dans la direction des forces latérales appliquées.

Ces files de contreventement devront être disposées symétriquement autant que possible avec un rapport entre valeurs maximale et minimale d'espacement ne dépassant pas 1,5.

3. Régularité en plan :

La structure est classée régulière en plan. (cf 3.5 1a)

4. Régularité en élévation :

La structure est classée régulière en élévation. (cf 3.5 1b)

5. Contrôle de la qualité des matériaux :

Des essais systématiques sur les matériaux mis en œuvre doivent être réalisés par l'entreprise.

6. Contrôle de la qualité de l'exécution :

Il est prévu contractuellement une mission de suivi des travaux sur chantier. Cette mission doit comprendre notamment une supervision des essais effectués sur les matériaux.

R : Le facteur de comportement, Indique le comportement réel d'une structure en béton armé par rapport à son comportement idéal initial. Il est classé en quatre catégories :

- Catégorie A : Structures en béton armé.
- Catégorie B : Structures en acier.
- Catégorie C : Structures en maçonnerie.
- Catégorie D : Autres structures.

En fonction du système de contreventement**.**

W : est égal à la somme des poids W_i, calculés à chaque niveau (i) :

$$W=\sum_{i=1}^{n} W_i \qquad \textbf{1.6}$$

$$\text{Avec : } W_i= W_{Gi}+ \beta\, W_{Qi} \qquad \textbf{1.7}$$

W_{Gi} : poids dû aux charges permanentes et à celles des équipements fixes éventuels, solidaires de la structure.

W_{Qi} : charges d'exploitation.

β: Coefficient de pondération, fonction de la nature et de la durée de la charge d'exploitation.

1.2.3.2 Méthode Modale Spectrale

La méthode modale spectrale c'est une approche d'analyse linéaire élastique, permet d'une représentation efficace de la réponse dynamique de la structure. Basée sur la décomposition modale de la structure en modes propres, en considérant les sollicitations sismiques par un spectre de réponse, cette méthode vise à identifier les modes propres et de déterminer les réponses modales. Couramment employée dans la conception parasismique.

1.2.3.2.1 Hypothèses de calcul

- Masse concentrée au niveau du nœud principal.
- Seuls les déplacements horizontaux sont pris en compte.
- Les planchers et les fondations sont considérés comme rigides dans leurs plans.
- Le nombre de modes à prendre en compte est tel que la somme des coefficients de participations modales soit au moins égale à 90%.[5]

1.2.3.2.2 Spectre de réponse de calcul

L'action sismique est représentée par le spectre de calcul suivant :

$$\frac{S_a}{g}\begin{cases} 1.25A\left(1+\frac{T}{T_1}\left(2.5\eta\frac{Q}{R}-1\right)\right) & 0 \le T \le T_1 \\ 2.5\eta(1.25A)\left(\frac{Q}{R}\right) & T_1 \le T \le T_2 \\ 2.5\eta(1.25A)\left(\frac{Q}{R}\right)\left(\frac{T_2}{T}\right)^{2/3} & T_2 \le T \le 3.0s \\ 2.5\eta(1.25A)\left(\frac{T_2}{T}\right)^{2/3}\left(\frac{3}{T}\right)^{5/3}\left(\frac{Q}{R}\right) & T > 3.0s \end{cases} \qquad \textbf{1.8}$$

Avec :

g : Accélération de la pesanteur.

A: Coefficient d'accélération de zone.

η : Facteur de correction d'amortissement.

R : Coefficient de comportement de la structure.

T1, T2 : Périodes caractéristiques associées à la catégorie de site.

Q : Facteur de qualité.

Avec substitution de ces paramètres par leurs valeurs appropriées, on va obtenue la courbe de spectre suivante :

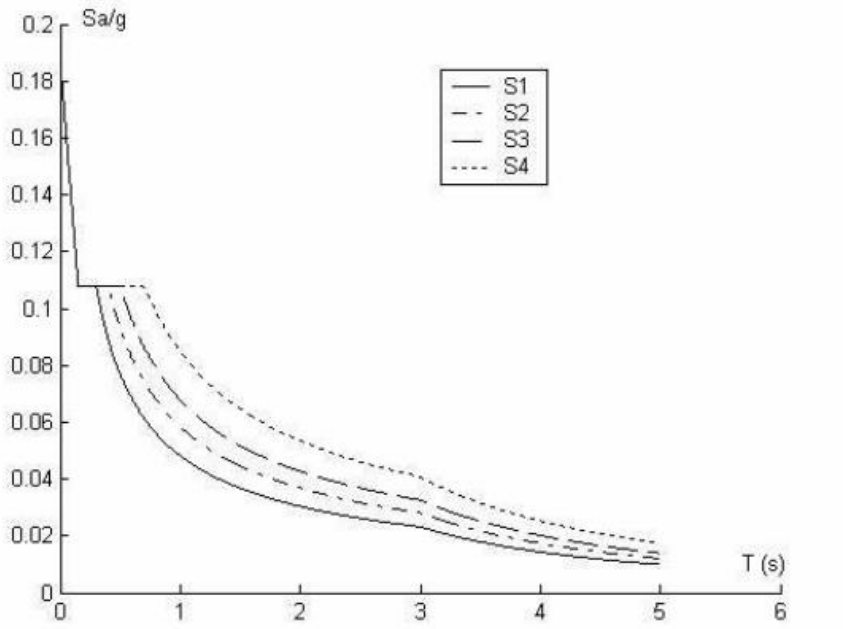


Figure 1. 3*.Courbe de Spectre de réponse.* **[6]**

Les courbes du spectre de réponse autorisent l'évaluation de la réponse d'un bâtiment à un séisme avec représentation graphique des déplacements, vitesses ou accélérations maximaux du système en fonction de la période.

1.3 Combinaisons d'actions

- ***A état limite ultime (ELU) :*** 1.35G+1.5Q ***(BAEL 91)***
- ***A état limite service (ELS) :*** G+Q ***(BAEL 91)***
- ***A état limite accidentelle (ELA) :*** ***(RPA99/2003)***

L'action sismique est traitée comme une action accidentelle dans le cadre de la philosophie de calcul aux États Limites.

Les combinaisons d'actions pour déterminer les sollicitations et déformations sont :

$$(G + Q \pm E) \qquad (1.9)$$

$$(0.8G \pm E) \qquad (1.10)$$

Pour les poteaux dans les ossatures auto-stables, la combinaison **(1.9)** est remplacée par la combinaison **(1.11)** : $(G + Q \pm 1.2E)$.

G : charges permanentes.

Q : charges d'exploitation non pondérées.

E : action du séisme représentée par ses composantes horizontale.

En ce qui concerne les effets de l'accélération verticale due aux séismes :

La combinaison **(1.9)** comprend la totalité de la charge d'exploitation ainsi que la charge sismique. Comme la charge d'exploitation est très peu probable, une grande partie de celle-ci (environ 40% à 60%) peut réellement représenter les effets des accélérations verticales des séismes.

La combinaison **(1.10)** prend en considération la réduction de la charge verticale due aux effets de l'accélération verticale.

Toutes les combinaisons prennent en compte la réversibilité des charges sismiques. En ce qui concerne les poteaux, la combinaison **(1.11)** vise à renforcer leur résistance aux moments de renversement dus aux mouvements sismiques majeurs. **[4]**

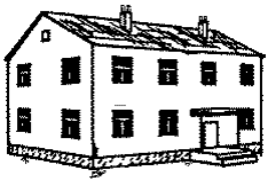
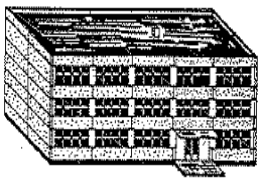
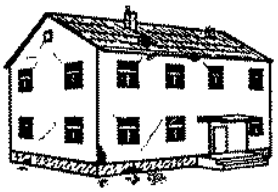
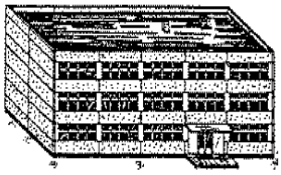
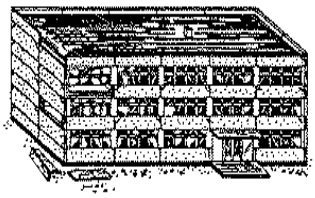
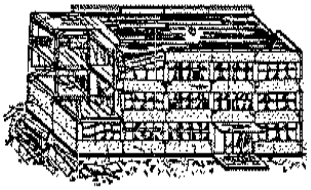
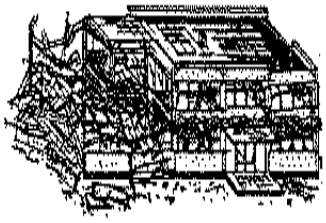
1.4 Dommages sismiques des portiques auto-stables en béton Armé

1.4.1 Classification des dégâts

Selon l'échelle EMS 98 (Européan Macroseismic Scale) les dégâts causés par un séisme sur les bâtiments peuvent être divisés en 5 degrés.

Cette classification est donnée en fonction des bâtiments en Maçonnerie et en Béton armé par le tableau 3.1.

Tableau 1.1.Dommages structuraux et non structuraux : Classification des dégâts aux bâtiments en Maçonnerie et en Béton armé. **[7]**

MAÇONNERIE	BETON ARME	Description des dommages
		**Degré 1 (D1) :** **Dégâts négligeables à légers** (aucun dégât structural, légers dégâts non structuraux)
		**Degré 2 (D2) :** **Dégâts modérés** (dégâts structuraux légers, dégâts non structuraux modérés)
		**Degré 3 (D3) :** **Dégâts sensibles à importants** (dommages structuraux modérés, dommages non structuraux importants)
		**Degré 4 (D4) :** **Dégâts très importants** (Dégâts structuraux importants, dégâts non structuraux très importants)
		**Degré 5 (D5) : Destruction** (Dégâts structuraux importants) Effondrement total ou presque total.

Dans le cas des portiques, les figures 1.4, 1.5 et 1.6 montrent les dégâts aux niveaux des poutres, poteaux et au niveau des nœuds poteau-poutre.

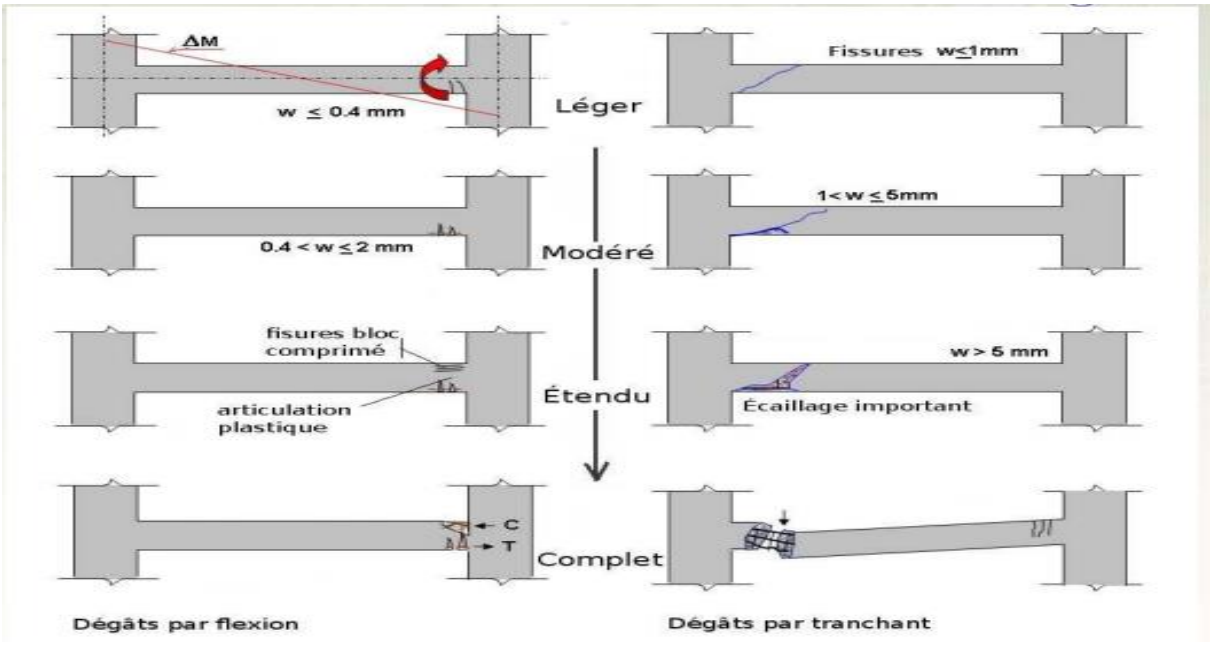


Figure 1. 4*. Dégâts aux Poutres.* **[8]**

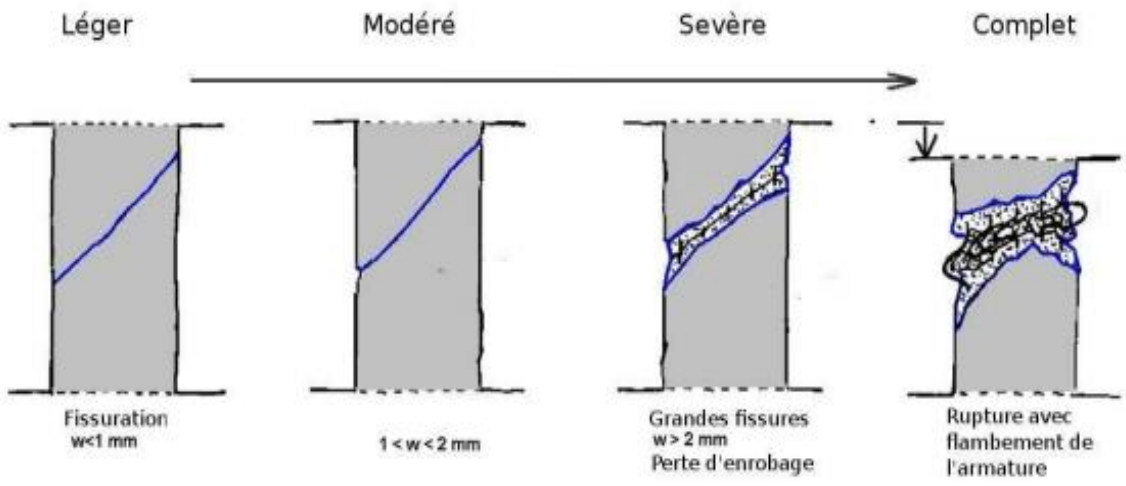


Figure 1. 5. *Dégâts aux Poteaux.* **[8]**

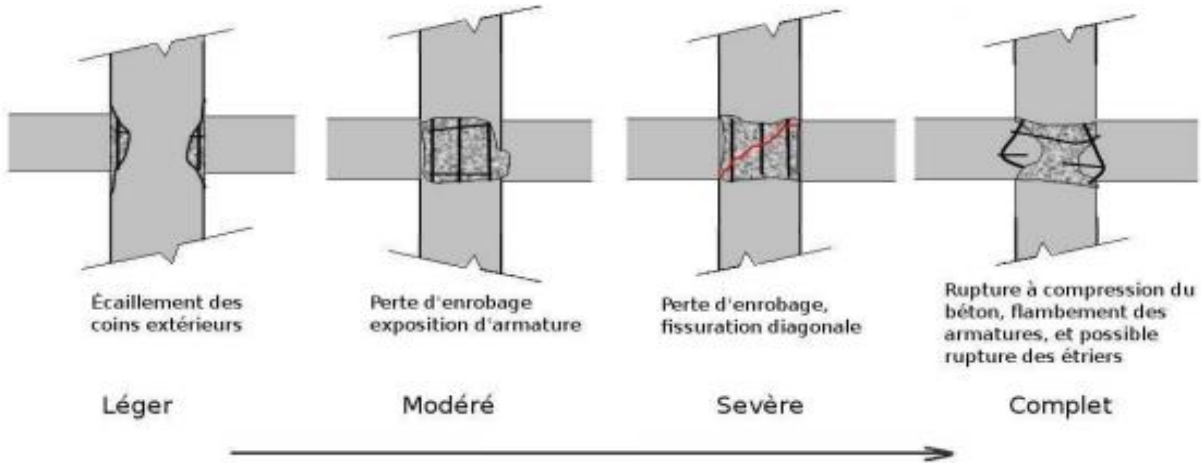


Figure 1. 6.*Dégâts aux Nœuds poteau-poutre.* **[8]**

1.4.2Types des dommages subis par les portiques lors d'un séisme

1.4.2.1 Poutres

Les dommages des poutres en béton armé causés par l'action sismique sont les suivants :

- *Les fissures dans la zone tendue le long des travées :* C'est le type de dommages le plus fréquent dans les poutres en cas de séisme. Ce type de fissures résulte du caractère cyclique de l'action sismique où le fléchissement de la zone tendue augmente les microfissures. [6]

La figure 1.7 schématise ce type de fissures.

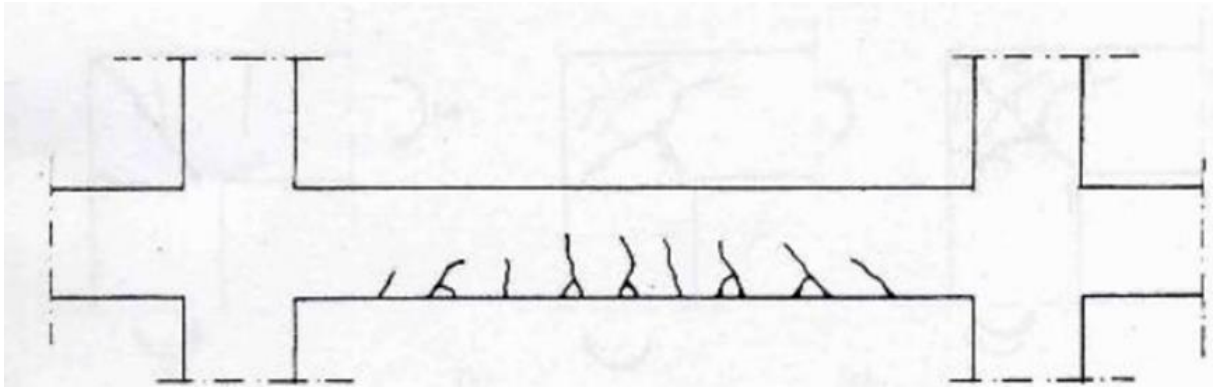


Figure 1. 7.*Fissures orthogonales sur l'axe de la poutre le long de la travée dans la zone de tendue.* **[9]**

- *Fissures de Flexion sur les faces supérieure ou inférieure aux appuis de la poutre :* dues à divers paramètres, tels que le mauvais ancrage dans les armatures inférieures dans les appuis (Figure 1.8). [9]

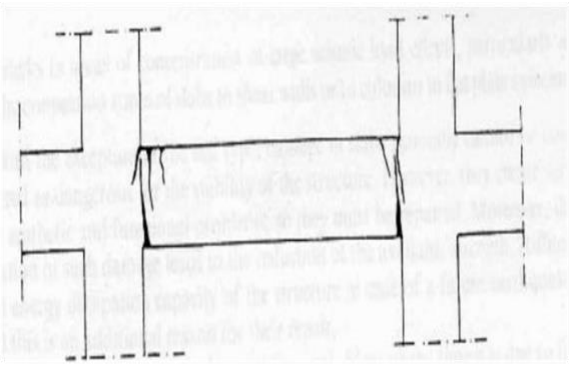


Figure 1. 8.Fissures de Flexion sur les faces supérieure ou inférieure aux appuis de la poutre. **[9] [10]**

- *Les fissures de cisaillement :* Ce sont des fissures causées par les contraintes de cisaillement engendrées par la charge de flexion. Elles peuvent prendre la forme de X dans les poutres courtes (linteaux) reliant les murs de cisaillement (voiles), et apparaissent souvent de manière similaire à celles observées dans les poteaux courts. (Figure 1.9)**.** [9]

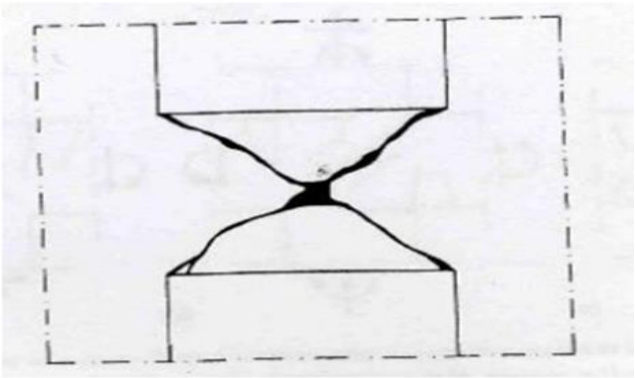


Figure 1. 9.*Fissures de cisaillement de forme X dans les poutres courtes (linteaux).* **[9]**

- *L'échec de cisaillement ou de flexion aux points d'appui des poutres secondaires* **:** c'est une rupture ou défaillance dans les points d'appui, dû à la composante verticale de la force sismique qui augmente la charge concentrée (Figure 1.10). **[9]**

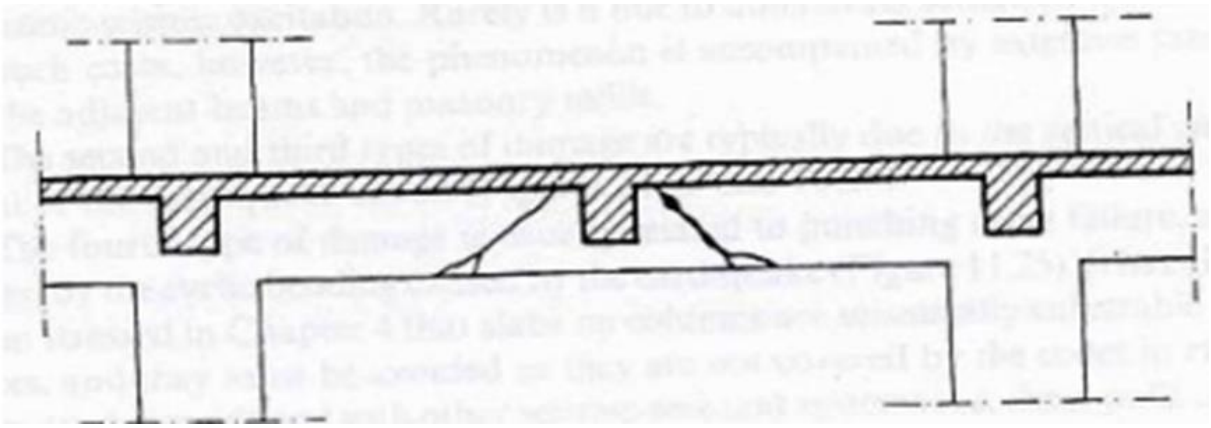


Figure 1. 10.Échec de cisaillement ou de flexion dans les points où les poutres principales sont les supports des poutres secondaires. **[9]**

- *L'échec par cisaillement ou flexion près des appuis* **:** représente un type de dommage particulièrement sérieux en raison de son caractère fragile, pouvant menacer la stabilité globale de la structure. (Figure 1.11). [9]

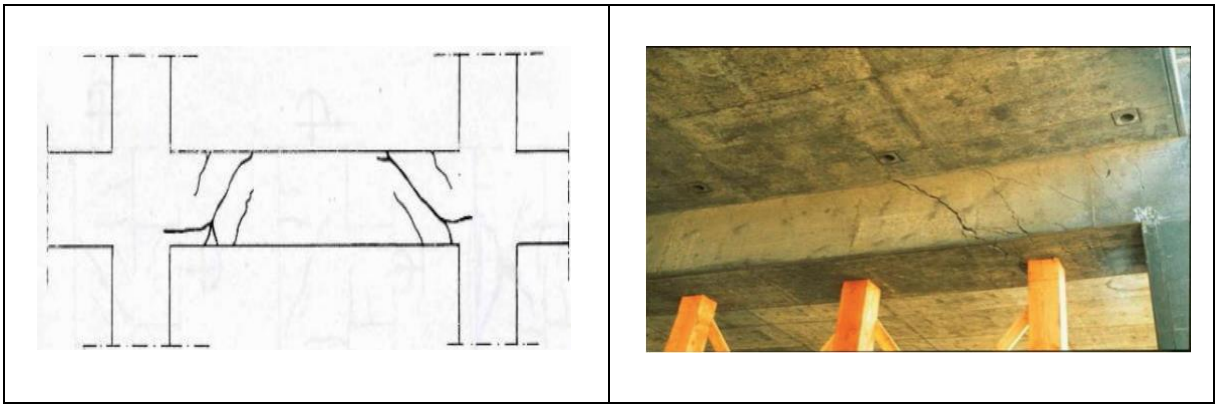


Figure 1. 11*.L'échec des poutres par flexion - cisaillement près des appuis*. **[9] [11]**

La figure 1.12 montre le mode de ruine des poutres (Rupture dans les poutres par flexion)

Figure 1. 12.*Rupture dans les poutres par flexion*. **[11]**

1.4.2.2 Poteaux

- *Le cisaillement des poteaux* : Ce genre de ruptures est brutal (fragile) et non dissipatif, il se distingue par l'apparition de fissures diagonales dans le béton puis par la rupture des armatures transversales, suivie du flambement des armatures longitudinales, cela se produit lorsque les poteaux sont **courts** ou présentent des problèmes de ferraillage, tels que la discontinuité et l'insuffisance de l'acier transversal, ou par l'interaction des poteaux avec les remplissages de maçonnerie (Figure 1.16). [10]

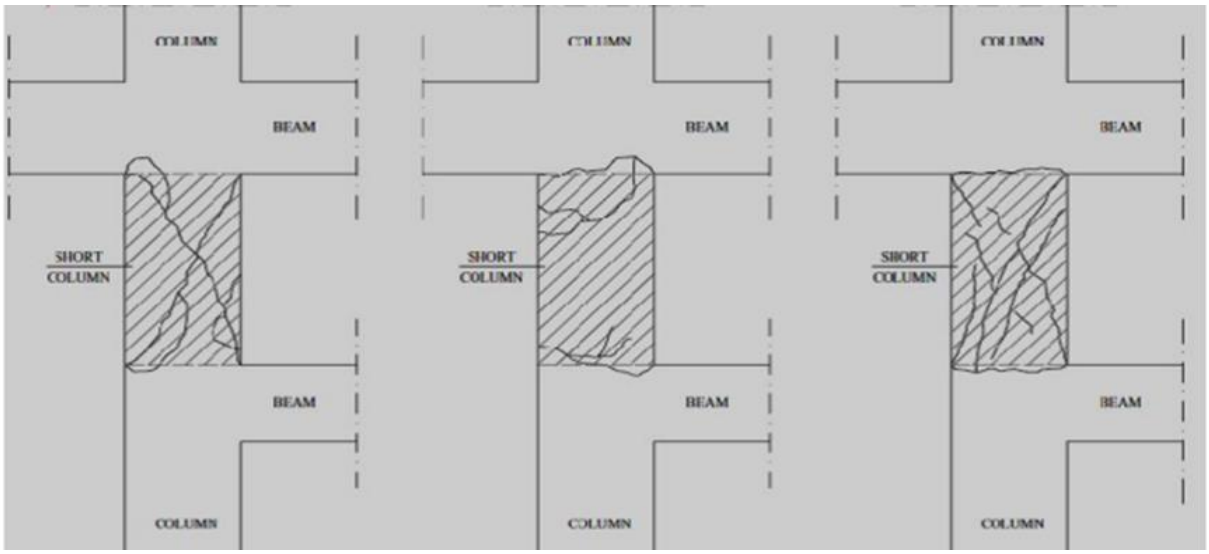


Figure 1. 13*.Modes de défaillance dans les poteaux courts.* **[12]**

Figure 1. 14*.Fissure de cisaillement induite par l'effet de poteau court.* **[13]**

Figure 1. 15*.Destruction par cisaillement du poteau court.*

(Séisme Boumerdes -2003). **[14]**

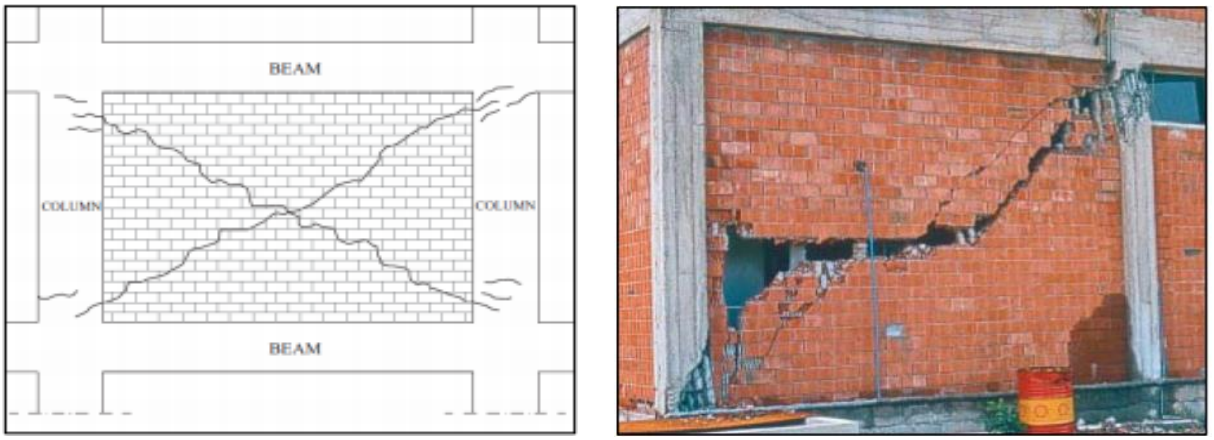


Figure 1. 16.*Cisaillement des poteaux dus à l'interaction avec la maçonnerie*

(Adana – Ceyhan Turquie 1998). **[15]**

La Figure 1.17 montre l'effet d'un étage souple qui peut parvenir à d'autres niveaux hors le rez de chaussée (RDC) du bâtiment.

Figure 1. 17.*Cisaillement des poteaux d'une construction à Bordj el bahri. Séisme de Boumerdes, Algérie 2003.* **[9]**

- *Rupture et endommagement sous flexion composée*

Les déplacements engendrés par les séismes induisent des flexions dans les éléments porteurs verticaux. Selon la stabilité globale de la structure, cela peut entraîner la rupture en flexion des poteaux. (Figure 1.18). Au niveau local, l'équilibre de la section fléchie ne peut être assuré en raison des effets de flexion composée. Cela peut entraîner des écrasements du béton et des ruptures des aciers tendus. En cas de compression, les contraintes normales peuvent provoquer un flambement. (Figure 1.19). **[10]**

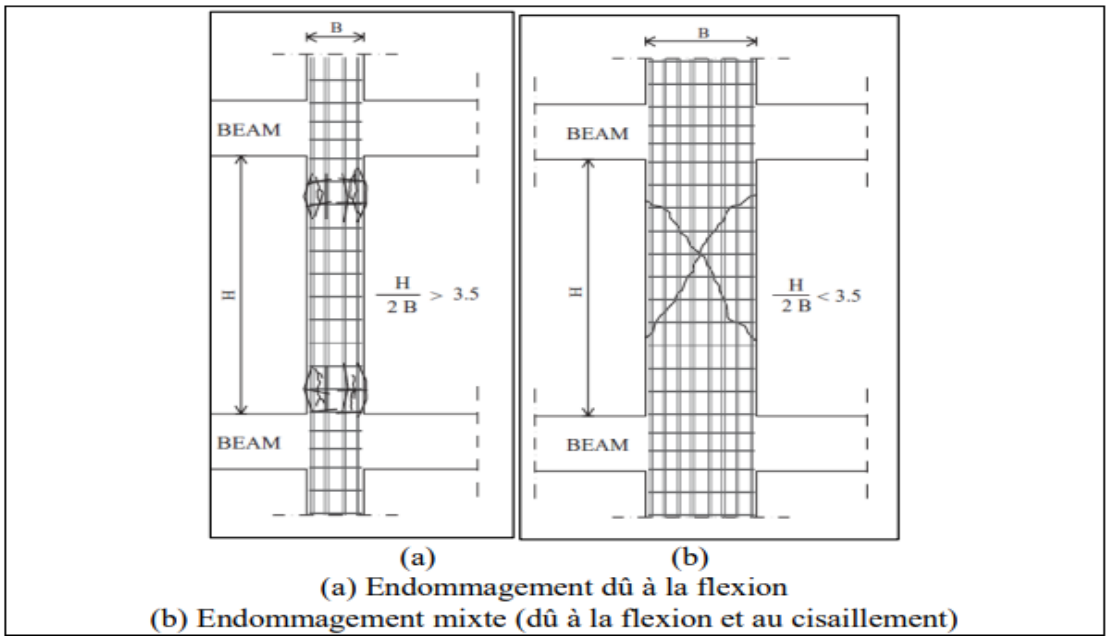


Figure 1. 19*.Dommages typiques dans les poteaux.* **[15]**

Figure 1. 18.*Ecrasement de béton et flambement des aciers dans les deux poteaux.* **[11]**

- *Rupture par plastification des zones critiques*

Les zones critiques sont les parties des poteaux ou des poutres où les contraintes sont maximales, nécessitant une ductilité élevée. Ces zones incluent également les endroits où la quantité de ferraillage diminue, généralement aux extrémités, ce qui peut entraîner la formation de rotules plastiques à ces points. (Figure 1.20)

Il se manifeste par l'éclatement du béton d'enrobage (Figure 1.21), suivi par l'apparition de fissures de flexion dues à la prolongation des armatures longitudinales. Finalement, un

allongement et/ou une rupture des armatures transversales provoque un écrasement du noyau de béton et/ou le flambement des armatures longitudinales. **[10]**

Figure 1. 20*.Décollement du béton d'enrobage.* **[11]**

Figure 1. 21.Rotule dans les extrémités d'un poteau. **[11]**

1.4.2.3 Jonction poteaux – poutres (nœuds)

Les portiques en béton armé ayant subi des dégradations lors de missions post-sismiques sont principalement classés en trois catégories : les dommages dus aux efforts de compression et de traction, les dommages causés par la flexion associée aux courbures ou rotations, et les dommages résultant de l'effort tranchant lié au cisaillement des poutres ou poteaux (Fig 1.22). **[12]**

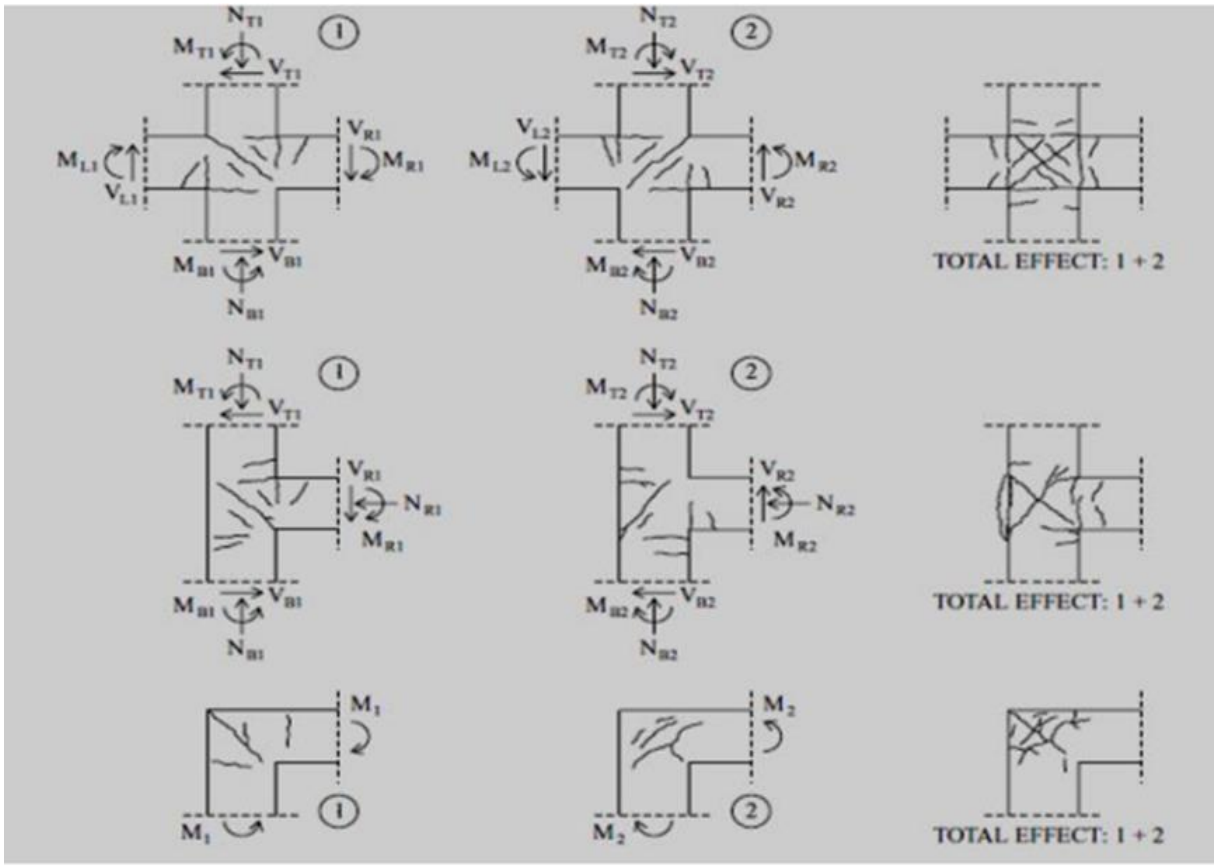


Figure 1. 22.*Dommages aux joints poteau-poutre.* **[12]**

Les figures 1.23 et 1.24 illustrent les dommages de la jonction poteau-poutre :

Figure 1. 24*.Joint poutre-poteau non endommagé.* **[16]**

Figure 1. 23*.Joint poutre-poteau endommagé.* **[16]**

Les récents tremblements de terre, comme ceux d'Izmit (Turquie), montre la catastrophe des ruptures dans les joints poteau-poutre. La figure 1.25 illustre l'état d'effondrement total des portiques.

Figure 1. 25.*Manque de conception appropriée des connexions poutre-poteau.* **[17]**

1.5 Conclusion

À la fin de ce chapitre, nous avons passé en revue quelques définitions concernant les séismes, puis nous nous sommes intéressés aux méthodes d'évaluation des actions sismiques selon le RPA99 V2003, ainsi qu'aux types de dommages causés par ce phénomène naturel sur les portiques auto-stables en béton armé.

Chapitre 2

Techniques et méthodes de renforcement des portiques auto-stables en béton armé endommagés par l'action sismique

2.1 Introduction

Après chaque séisme, l'évaluation des dommages enregistrés dans les portiques auto-stables en béton armé est une étape nécessaire pour choisir une technique de renforcement fiable et durable. En premier lieu, il a été question d'optimiser la résistance et la ductilité de ces structures, de façon à leur rendre leur niveau initial de sécurité et de résistance. De ce fait, l'ingénieur doit réaliser un bon diagnostic des dommages pour s'orienter vers la méthode de renforcement la plus adéquate. Ces méthodes de réhabilitation dépendent du type et du degré d'endommagement des portiques.

2.2 Définition de renforcement

Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service (augmentation de la ductilité, de la rigidité et de la résistance). Une fois terminé, le renforcement permet à la structure de fonctionner comme prévu initialement. En utilisant diverses techniques et méthodes qui varient selon le degré d'endommagement des structures, ces renforcements peuvent avoir pour objectif de répondre à des demandes non prévues dans la conception initiale. **[18]**

2.3 Stratégie de renforcement

En parasismique, plusieurs chercheurs se sont engagés dans le développement des stratégies de renforcement des structures en béton armé. Les stratégies de renforcement sismique ont pour but d'améliorer les performances d'origine et de réduire les effets sismiques.

- *Mise à niveau des performances des éléments*

Pour atteindre un certain niveau de protection sismique, un plan d'adaptation sismique prévoit la modification de la rigidité, de la résistance ou de la ductilité des structures. Il est important de noter que, de manière générale, les améliorations se concentrent sur la ductilité dans les systèmes mal conçus (cadres de raidisseurs insuffisants ou longueurs de recouvrement inadéquates), tandis que l'amélioration de la résistance et de la rigidité est privilégiée pour les systèmes à faible capacité lorsque la demande sismique est élevée. **[19]**

La figure 2.1 présente la courbe de l'augmentation des performances initiales par rapport à la structure initiale.

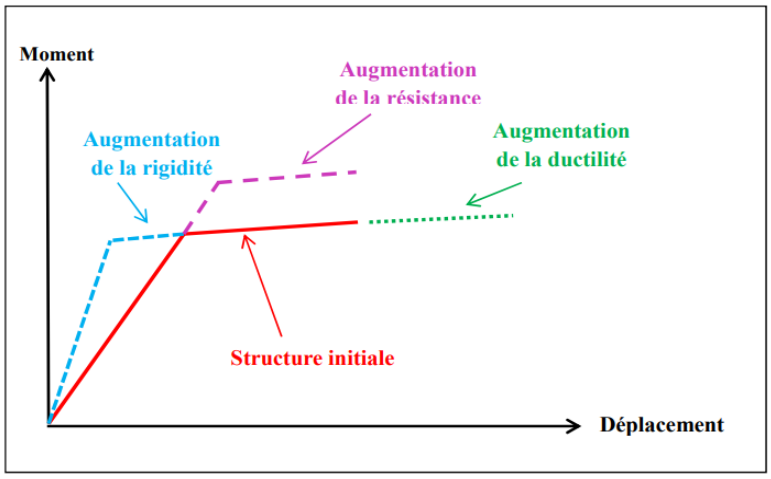


Figure 2. 1. *Stratégies de renforcement.* **[20]**

- *Réduction des effets de la demande sismique*

Dans cette approche, les déformations induites par la demande sismique sur les éléments structuraux ou non structuraux existants sont réduites en dessous de leurs capacités. Pour diminuer la demande de déformation sismique, la méthode la plus efficace consiste généralement à augmenter la rigidité latérale globale. Cette rigidité peut être améliorée par plusieurs moyens, tels que :

- L'ajout d'un nouveau système de résistance pour absorber l'action sismique (comme des contreventements en acier ou de nouveaux murs en béton).
- L'introduction d'appuis parasismiques. **[19]**

2.4 Choix d'une solution de renforcement

L'étude préliminaire doit prendre en considération les données et envisager toutes les solutions avec leurs avantages et inconvénients, avant de choisir la solution optimale de renforcement. Le choix de la solution efficace doit tenir compte des points ci-dessous :

Aspect technique : l'état des lieux, de la structure existante, sa conception et l'état de ces facteurs jouent un rôle crucial dans le choix de la méthode à adopter.

Aspect économique : avant de prendre une décision, il est nécessaire d'évaluer les coûts et les bénéficies d'un renforcement de la structure.

Importance du bâtiment : en relation directe avec le niveau de performance et ensuite les techniques de renfort.

Disponibilité : disponibilité des moyens relatifs aux méthodes de renforcement. Donc les différentes méthodes peuvent ne pas être accessibles dans les régions des structures à renforcer.

Délais des travaux : la fonctionnalité de la structure peut restreindre les délais de réalisation des travaux, ensuite affecter la méthode choisie. **[21]**

2.5 Préparation d'une opération de renforcement

En général l'approche adoptée dans tous les cas comporte les actions suivantes :

1. L'étude de l'état de la section de la structure à renforcer.
2. Définition des objectifs à atteindre.
3. Choix des outils et méthodes à utiliser.
4. L'étude de l'opération en détail

Le succès du processus dépend de la bonne exécution des deux premières procédures, pour leur grande importance. **[18]**

2.6 Méthodes de renforcement

Les méthodes de renforcement des portiques auto-stables endommagés par l'action sismique varient en fonction des dommages de ces structures. Donc, le choix de la méthode de renforcement dépend de façon préliminaire de dégrée des dommages des portiques

2.6.1 Traitement des fissures par l'injection

La méthode de traitement la plus polyvalente et économique des structures est basée sur le processus d'injection de fissures. Cette méthode consiste à faire pénétrer un produit dans les fissures qui va créer une continuité mécanique ou une étanchéité entre les parties disjointes. Elle est applicable lorsque les fissures présentent une ouverture au moins comprise entre 0,1 et 0,2 mm. L'injection par un produit souple permet son adaptation aux mouvements générés par les variations thermiques et hydro-thermiques. En revanche, l'injection par un produit rigide permet d'assurer la continuité de la matière. **[22]**

- ***Avantages et inconvénients de quelques produits d'injection :***

Dans le tableau 2.1 quelques produits d'injection avec leurs avantages et inconvénients.

Tableau 2. 1.Avantages et inconvénients de quelques produits d'injection. **[18]**

Type de produits	***Avantages***	***Inconvénients***
Coulis de ciment	-Faible coût. -Possibilité de mise en œuvre par des moyens simples.	-Retrait. -Ségrégation – Ressuage (produit hétérogène). -Utilisation délicate dans les fissures fines.
Silicates	-Utilisables pour le traitement de fissures très fines.	-Emploi délicate. -Retrait en milieu asséché. -injection de vides importants déconseillée.

Résines époxydiques	- Faible retrait. - Excellente adhérence. –Faible viscosité : Injection des fissures ≥0,2 mm. -Propriétés mécaniques élevées. -Bon comportement aux agents agressifs.	-Emploi délicat. -coût élevé.
Résines polyester	- Propriétés mécaniques élevées. - Faible viscosité.	-Retrait. - coût relativement élevé. -Emploi délicat.
Résines polyuréthanes	-Blocage provisoire de venue d'eau par formation de mousse expansive. - En milieu sec possibilité d'injecter des fissures actives avec des polyuréthanes "souples". - Fissures > 0,2 mm. - Faible viscosité.	-Léger retrait. -Sensibilité à l'eau. -Emploi délicat

La réparation des fissures dans la jonction entre les poteaux et les poutres est illustrée dans la figure 2.2, où le produit coulis de ciment est injecté.

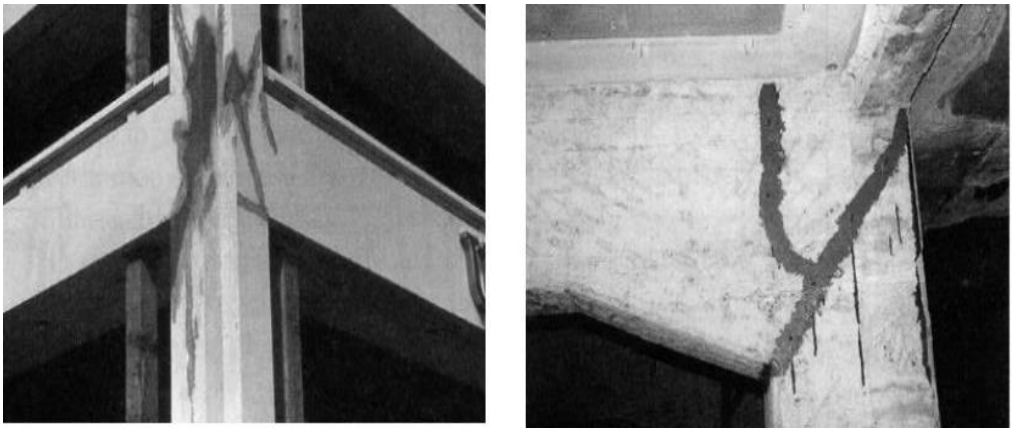


Figure 2. 2.*Traitement de fissure par injection*. **[23]**

2.6.2 Projection du béton

Cette technique est largement utilisée pour renforcer et réparer les structures (Figure 2.3). En général, le principe du béton projeté se base sur le transport d'un mélange de ciment et de granulats dans un tuyau et la projection de ce mélange à l'aide d'un air comprimé.

Figure 2. 3.*Renforcement au moyen de béton projeté.* **[24]**

Il existe deux méthodes de projection, qui sont les suivantes :

- **Projection du béton par voie sèche :** le mélange (ciment / granulat) transporté sec dans les tuyaux, ensuite l'introduction d'eau en bout de lance par la porte lance.
- **Projection du béton par voie humide ou mouillée :** le mélange de béton classique (ciment /granulats/ eau), transporté dans les tuyaux jusqu'à la surface à projeter.

La déférence entre ces deux techniques est reliée à la composition du mélange, à la manière d'introduction de l'eau et de l'air comprimé. La figure Ⅳ. 3 indique ces différences à travers le

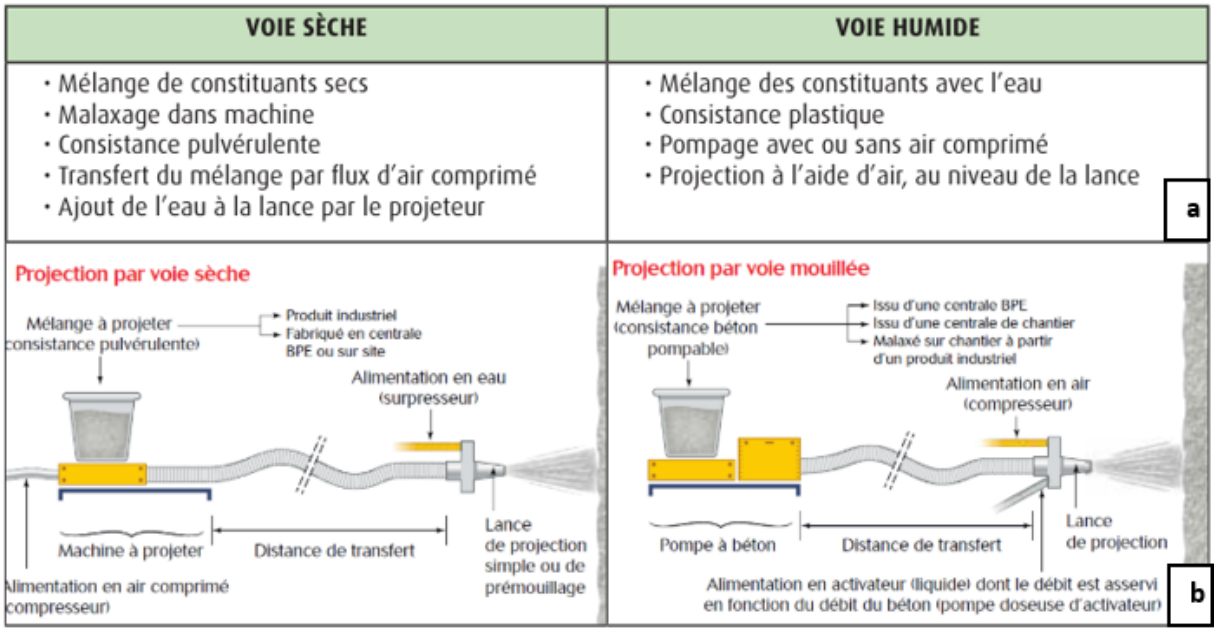


Figure 2. 4. ***a****. Tableau montrant les différences entre les deux méthodes.*

tableau et l'illustration.

b. *schématisation des deux méthodes.* **[25]**

- ***Avantages et inconvénients des deux méthodes***

- Pour chacune des deux méthodes, on a des avantages ainsi que des inconvénients, ce qui est montré au suivant par des tableaux.

-Par voie humide

Tableau 2. 2.Avantages et inconvénients de la projection par voie humide. **[26]**

Avantages	***Inconvénients***
- Composition uniforme de la couche projetée - Pertes faibles. - Pas de production de poussières.	- Dosage en eau et en ciment plus élevé pour assurer une plasticité nécessaire. -Adhérence moindre. - Compactage faible. - Nécessité d'accélérateurs de prise. - Retrait.

-Par voie sèche

Tableau 2. 3.Avantages et inconvénients de la projection par voie sèche. **[26]**

Avantages	***Inconvénients***
-Mise en œuvre plus facile. -Possibilité d'utiliser des granulats de grande dimension (15 à 20 mm). - Retrait maîtrisable. - Dosage relativement faible en ciment. - Faible rapport E/C. - Béton très compact (meilleure performance mécanique). - Bonne adhérence sur le support. - Pénétration en grande profondeur dans les pores.	- Pertes de volume du béton projeté importantes par rebondissement. - Conditions de travail difficiles (poussières, pollution). - Nécessite un porte-lance très qualifié.

2.6.3 Renforcement à l'aide de profiles métalliques

Les profilés métalliques sont associés aux structures en béton armé afin d'augmenter la résistance de la structure. La compatibilité entre le béton et l'acier doit être assurée lors de la réalisation d'une structure mixte. Cette compatibilité entre les deux matériaux est associée directement à la qualité de l'interface (acier-béton) pour une bonne transmission des efforts internes. **[23]**

Dans le domaine du renforcement des portiques, les cornières en L sont les plus couramment utilisées (Figure 2.5).

Figure 2. 5.*Renforcement de poteaux au moyen de profilés métallique.* **[27]**

- ***Avantages et inconvénients du renforcement à l'aide de profiles métalliques***

Ces avantages et inconvénients sont présentés au tableau 2.4.

Tableau 2. 4.Avantages et inconvénients du renforcement à l'aide de profiles métalliques. **[26]**

Avantages	*Inconvénients*
- rapidité de réalisation sur chantier. -légèreté des éléments à monter. -caractère sec de l'intervention.	- possibilités d'ajustement au montage à prévoir. -positionnement correct des forages. - Précision requise lors du mesurage de la structure existant et de la fabrication des éléments métalliques.

2.6.4 Renforcement par Gainage métallique

Le gainage métallique consiste à enfermer la structure dans une cage ou tube métallique constitué par des fers plats et des cornières ou des tôles soudées (Figure 2.6), généralement utilisé pour les poteaux. Le collage, le vissage ou l'ancrage peuvent être utilisés pour attacher la platine à la structure. Selon la transmission des efforts, la meilleure technique est celle du collage

Les matériaux utilisés :

- ***La colle :*** cette résine époxy a été choisie pour ses propriétés d'adhérence sur l'acier et sur le béton. La transmission intégrale des efforts à la tôle par adhérence nécessite une faible épaisseur de film résiduel et une rigidité adéquate. Cette rigidité étant réduite par une augmentation de température, il est nécessaire de prendre des mesures particulières lorsqu'il s'agit de structures soumises à des températures élevées. **[22]**

La colle n'apporte pas de résistance mécanique, mais elle doit transmettre les efforts.

- ***La tôle :*** en général, les tôles d'acier sont de bonne qualité, avec une épaisseur inférieure à 3 mm de façon à leur permettre de suivre les courbures du support. Lorsque les sections d'acier plus importantes sont nécessaires, il est préférable de la superposition des tôles que de l'augmentation d'épaisseur dans le but d'épouser l'allure déformée de la section de béton renforcé. **[22]**

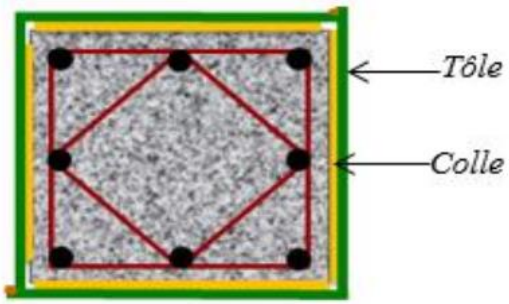


Figure 2. 6.*Renforcement par gainage métallique.* **[23]**

- ***La mise en œuvre des plats collés :*** voici les étapes à suivre :

1. Traitement par sablage des plats destinés à coller pour donner une surface plus rugueuse, puis de les revêtir d'un produit de protection.

2. Transport des tôles avec soin pour éviter tout défaut de planéité, de rayure ou de choc.

3. Piquage de la surface.

4. Reprise de la planéité par ragréage de 20 % par rapport à la surface à encoller.

5. Application de la colle.

6. Mise en place des plaques métalliques. **[15**]

- ***Avantages et inconvénients du renforcement par Gainage métallique :***

Ces avantages et inconvénients sont présentés au tableau 2.5.

Tableau 2. 5. Avantages et inconvénients du renforcement par Gainage métallique**. [26]**

Avantages	***Inconvénients***
- Augmentation légère de la section. - Une durée de réalisation courte.	- Les longueurs sont limitées. - Problème de la durabilité vis-à-vis de la corrosion et de la fatigue. - L'étaiement des éléments structuraux est parfois nécessaire.

2.6.5 Renforcement par chemisage en béton armé

Le chemisage en béton armé est une méthode couramment utilisée pour renforcer les éléments en béton armé. Cette technique consiste à augmenter la section d'un élément en ajoutant une couche de béton ainsi que des armatures longitudinales et transversales sur tout son périmètre. Les armatures sont installées avant le bétonnage, avec des tiges de connexion pour relier le ferraillage additionnel à l'ancien. Un micro béton auto-nivelant et auto-compactable est utilisé pour remplir les interstices sans aiguilles vibrantes.

La préparation du support est cruciale : il est nécessaire de réaliser des décaissés dans le béton existant pour améliorer la transmission des efforts et traiter les surfaces avec une peinture primaire en résine époxy. Les décaissés sont remplis de béton avant que les résines ne sèchent. Si des armatures sont utilisées pour le renforcement, elles doivent être mises en place avant le coulage ou le pompage du béton, qui doit être traité avec des adjuvants pour éviter la vibration et le compactage. (Figure 2.7). **[28]**

Cette technique est appliquée selon les besoins suivants :

- Augmentation de la portance.
- Augmentation de la résistance en flexion et/ou au cisaillement.
- Augmentation de la capacité de déformation.
- Amélioration de la résistance des jonctions par recouvrement défaillant.

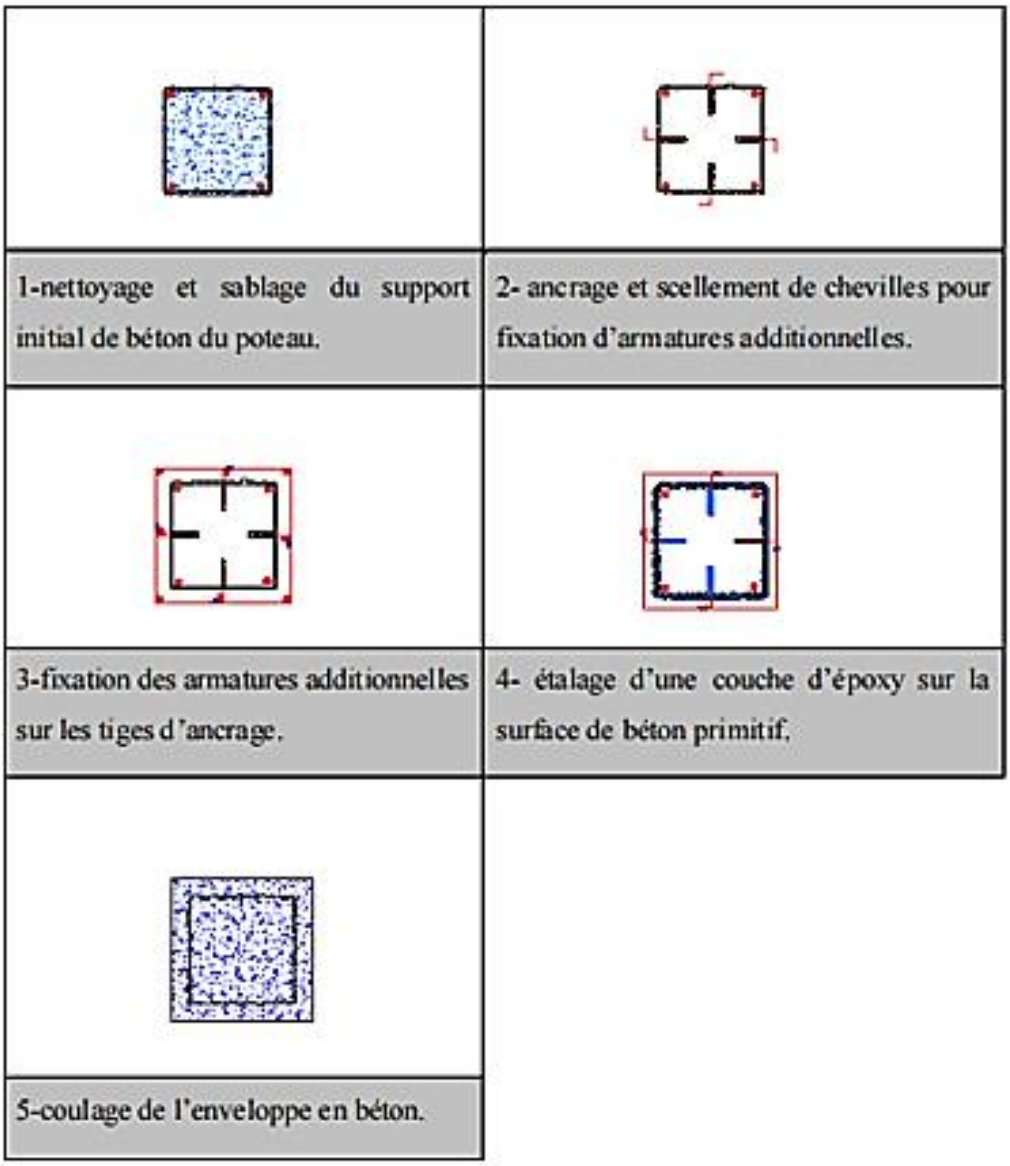


Figure 2. 7.*Etapes de chemisage en béton armé.* **[29]**

La figure 2.8 montre le renforcement d'une poutre par le chemisage en béton armé.

Figure 2. 8*.Chemisage d'une poutre.* **[23]**

Les figures 2.9, 2.10 et 2.11 indiquent les phases de chemisage des 4 poteaux centraux en béton armé.

Figure 2. 9.*Chemisage des 4 poteaux centraux.* **[29]**

Figure 2. 11. Coffrage à mi-hauteur et résultat après décoffrage. **[29]**

Figure 2. 10.*Chemisage des 4 poteaux terminés*. **[29]**

- ***Avantages et inconvénients du renforcement par chemisage en béton armé :***

Ces avantages et inconvénients sont présentés au tableau 2.6.

Tableau 2. 6.Avantages et inconvénients du renforcement par chemisage en béton armé. **[26]**

Avantages	*Inconvénients*
-Main d'œuvre peu qualifiée. -Technique peu coûteuse en raison des matériaux employés.	- Augmentation considérable des sections donc du poids de la structure. -Travaux relativement lourds.

2.6.6 Renforcement par chemisage en acier

Cette technique est utilisée de façon principale pour les poteaux dans le but d'augmenter leur résistance au cisaillement et leur capacité de ductilité. Les chemisages en acier peuvent être incorporés dans un chemisage en béton (Figure 2.12-a).

Généralement, les chemisages en acier appliqués autour des poteaux se composent de quatre cornières auxquelles sont soudées soit des plaques en acier continues, soit des bandes d'acier horizontales discontinues plus épaisses (Figure 2.12-b / Figure 2.12-c). Ces cornières peuvent être collées au béton par l'intermédiaire d'un liant époxydique, ou peuvent y être plaquées, sans aucun espace sur toute leur hauteur. Avant de souder les bandes, il est possible de procéder à un traitement thermique préalable au soudage, afin d'assurer par la suite un certain confinement positif sur le poteau. **[19]**

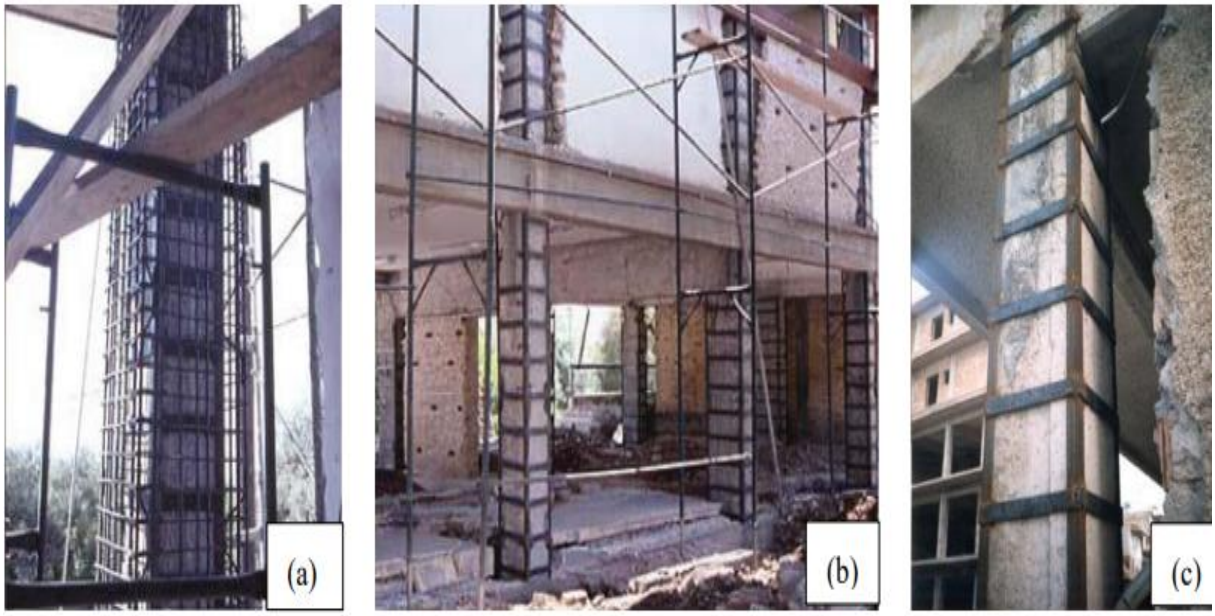


Figure 2. 12.*Chemisage en acier appliqué aux poteaux.* **[19]**

Les différentes configurations de chemisage en acier sont illustrées sur la Figure 2.13.

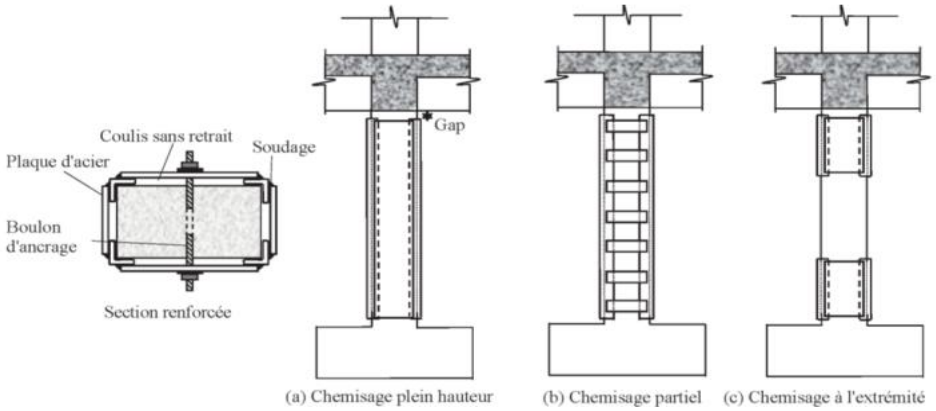


Figure 2. 13.*Différentes configurations de chemisage en acier appliquées aux poteaux.* **[19]**

Pour la jonction poteau-poutre, les chemisages en acier peuvent assurer une couture efficace des assemblages poteau-poutre par recouvrement, afin d'augmenter la capacité de déformation. La chemise en acier est formée d'une plate en acier préfabriquée et soudée en place. Cette chemise en forme d'ondulation exerce une pression de confinement par l'application d'une retenue passive dans la zone de confinement (Figure2.14). **[19]**

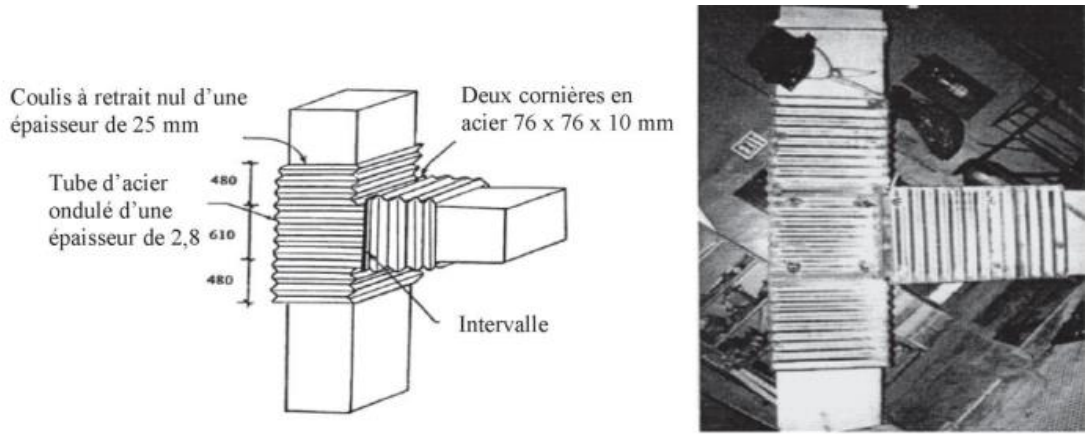


Figure 2. 14.*Assemblage de chemise d'un nœud poutre-poteau.* **[19]**

- ***Avantages et inconvénient du renforcement par chemisage en acier :***

Ces avantages et inconvénients sont présentés au tableau 2.7.

Tableau 2. 7.Avantages et inconvénients du renforcement par chemisage en acier. **[26]**

Avantages	***Inconvénients***
- Courte durée de réalisation par rapport au chemisage en béton. - Bonne performance des éléments renforcés (bonne ductilité). - Faible augmentation des sections.	- Coûts relativement élevés. - Nécessité de soudures donc d'une main-d'œuvre qualifiée. - Problème de corrosion ce qui nécessite un entretien régulier. - Poids des chemises et difficulté de découpage.

2.6.7 Renforcement par voiles de contreventement

L'une des solutions les plus couramment utilisées, c'est la mise en place des voiles de contreventement (Figure 2.15). Leur introduction vise à prévenir un effondrement d'ensemble. La proposition concerne principalement d'ajouter des voiles sur les façades de structures contreventées en portiques. L'objectif étant de ne pas modifier la distribution architecturale à l'intérieur des appartements. Néanmoins, pour améliorer la rigidité des éléments structuraux ou réparer des ensembles de poteaux de niveaux fortement touchés, cette condition n'a pas pu être respectée et des travaux de conformément importants ont été entrepris avec des réaménagements internes rendus obligatoires. **[30]**

Figure 2. 15.*Renforcement en béton armé par voiles de contreventement*. **[23]**

Il est important de fournir une attention particulière à la liaison du voile sur le poteau repris (Figure IV.15), en assurant la continuité des barres horizontales par un ancrage dans la masse

de ce dernier et la transmission des efforts efficaces entre les différents niveaux à travers des dispositions de ferraillage adaptées. **[30]**

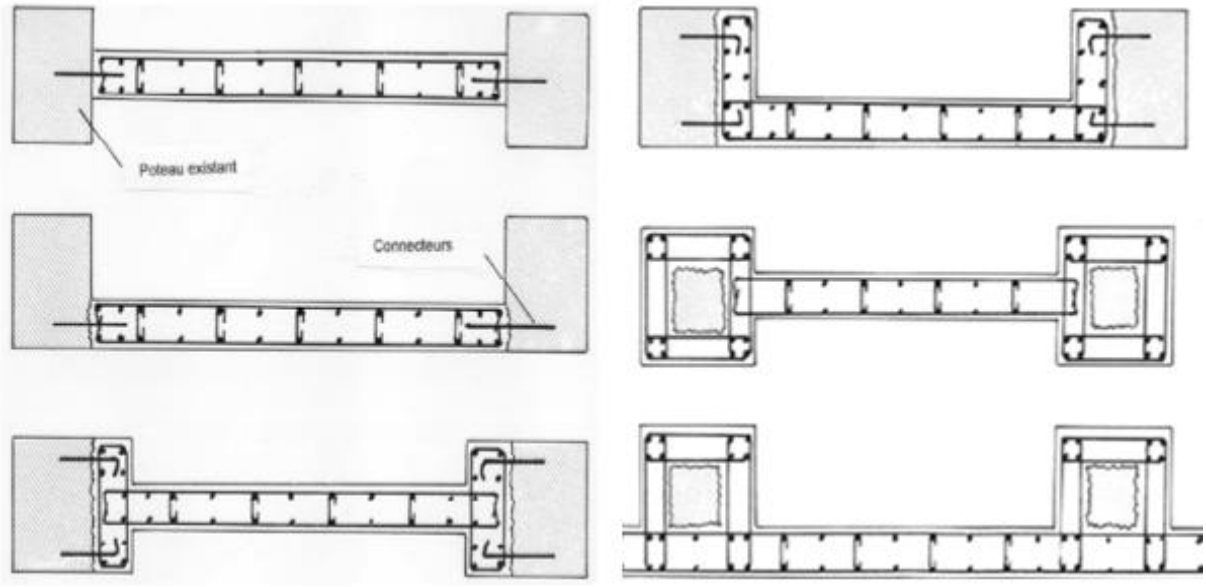


Figure 2. 16*.Liaison du voile avec le poteau.* **[31]**

La configuration que l'on retrouve est la disposition d'un voile prolongeant un poteau chemisé (Figure Ⅳ.16). Il est nécessaire que ce type d'intervention respecte la symétrie d'ensemble, ce qui veut dire qu'il faut prévoir un second dispositif de ce renforcement qui sera disposé à son opposé pour assurer l'équilibre de la structure tout en conservant sa symétrie en plan. Dans le cas de plusieurs niveaux, il est nécessaire de prolonger le voile verticalement pour satisfaire les conditions de rigidité, de niveaux et de régularité en élévation. **[30]**

Figure 2. 17*.Création de voile avec chemisage des poteaux en place*. **[30]**

- ***Avantages et inconvénients du renforcement par voiles de contreventement***

Ces avantages et inconvénients sont présentés au tableau 2.8.

Tableau 2. 8.Avantages et inconvénients du renforcement par voiles de contreventement. **[26]**

Avantages	*Inconvénients*
-contribue à réduire la torsion. -Meilleure répartition des efforts (Amélioration de la stabilité globale).	-coût financier. -peut être inacceptable architecturalement. -nécessite un calcul complet du bâtiment. - Risque de déplacement des charges vers des zones de faible importance.

2.6.8 Renforcement par contreventement métalliques

Le contreventement métallique offre l'avantage de permettre des ouvertures et de n'ajouter qu'un poids léger à la structure. Dans la phase de mise en œuvre, les entretoises sont reliées principalement aux cadres aux niveaux de la jonction poutre-poteau. La transmission des forces dans les entretoises aux joints prenant la forme de forces axiales, à la fois en compression et en traction. Ce système de contreventement fournit une augmentation significative de la capacité de la structure horizontale. **[19]**

Les contreventements métalliques peuvent être utilisés sous différentes formes en V, en X ou en K. (Figure 2.18***)***

Figure 2. 18.*Exemple de contreventement métallique.* **[19]**

- ***Avantages et inconvénients du renforcement par contreventement métallique***

Ces avantages et inconvénients sont présentés au tableau 2.10.

Tableau 2. 9.Avantages et inconvénients du Renforcement par contreventement métallique. **[26]**

Avantages	*Inconvénients*
-Meilleure répartition des efforts. -Structure légère sans fondations propres. - Travaux légers.	-Peut être inacceptable architecturalement. -Modification des espaces intérieurs. -Risque de créer des irrégularités en élévation. -Nécessite un calcul complet du bâtiment.

2.6.9 Réduction des charges sismique par des dispositifs amortisseurs

L'approche efficace pour la dissipation d'énergie induite lors d'un séisme, c'est l'utilisation des dispositifs amortisseurs. Cette énergie est dissipée en une énergie thermique, en général par frottement entre divers matériaux. Le rôle d'un dispositif amortisseur dans une structure est semblable à celui d'un amortisseur dans une automobile. De la même façon que l'amortisseur réduit les chocs causés par les routes cahoteuses, le dispositif amortisseur réduit l'impact des mouvements du sol sur la structure du bâtiment et sur ses occupants. Il y a quatre types de dispositifs amortisseurs : visco-élastique, à friction, visqueux et métallique. **[32]**

Dans des amortisseurs visqueux et visco-élastiques, un piston se déplace le long d'un dispositif de friction (chambres à liquide) pour dissiper l'énergie sous forme de friction et de chaleur (Figure 2.19)**.** [32]

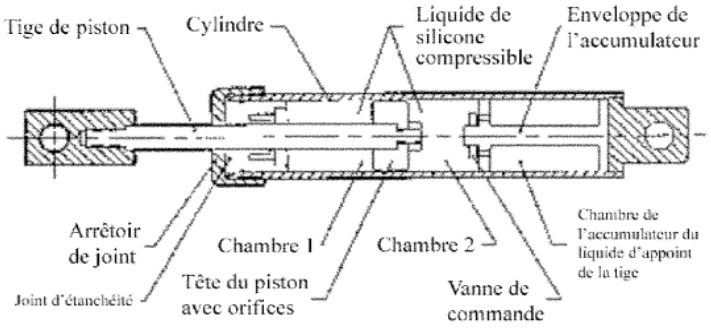


Figure 2. 19*.Exemple d'un amortisseur visqueux.* **[23]**

Les amortisseurs à friction utilisent la friction et la chaleur produites par des plaques d'acier protégé qui coulissent l'une contre l'autre pour diffuser l'énergie induite lors d'un séisme (Figure 2.20).

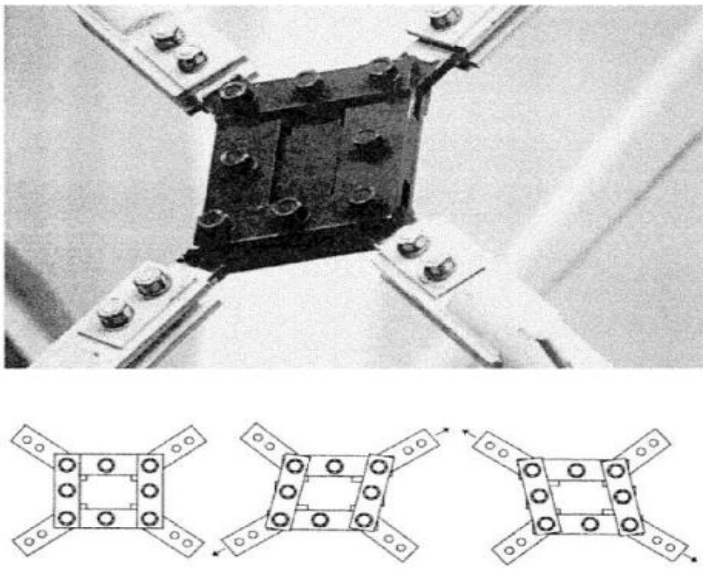


Figure 2. 20.*Exemple d'un amortisseur à friction.* **[23]**

De plus, il existe des croix de contreventement qui possèdent des amortisseurs pour dissiper l'énergie au moyen d'une déformation inélastique des éléments métalliques (Figure 2.21).

Figure 2. 21.*Contreventement amortissant***. [24]**

- ***Avantages et inconvénients du contreventement amortissant***

Ces avantages et inconvénients sont présentés au tableau 2.10.

Tableau 2. 10.Avantages et inconvénients du renforcement par contreventement amortissant. [26]

Avantages	*Inconvénients*
-Meilleure répartition des efforts. -Structure légère sans fondation.	-Peut être inacceptable architecturalement. -Modification des espaces intérieurs. -Coût élevé. -Nécessite un calcul complet du bâtiment.

2.6.10 Renforcement par matériaux composites (Polymères Renforcés en Fibres)

On utilise souvent les termes « matériau composite renforcé de fibres », « polymère renforcé de fibres PRF » pour décrire les matériaux constitués de fibres synthétiques enchâssées dans une matrice. Généralement, le rapport résistance-poids pour les composites de fibres est plus élevé que celui des matériaux de construction conventionnels, y compris l'acier, avec une résistance à la corrosion exceptionnelle.

Les matériaux composites en polymères renforcés de fibres (PRF) sont des produits de synthèse constitués principalement de renforts fibreux, supportés par un liant appelé matrice (Figure 2.22)**.** Principalement, leur comportement est influencé par le taux de fibres et les caractéristiques mécaniques des composants. Grâce aux renforts fibreux, les composites obtiennent des propriétés hautement directionnelles, leur imposant un comportement anisotrope et principalement linéaire élastique jusqu'à la rupture. **[33]**

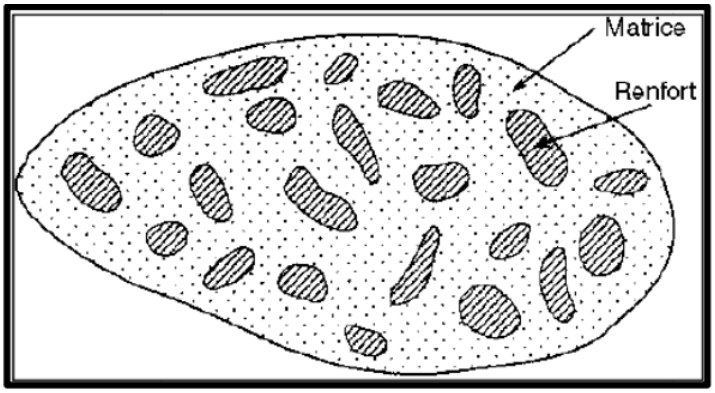
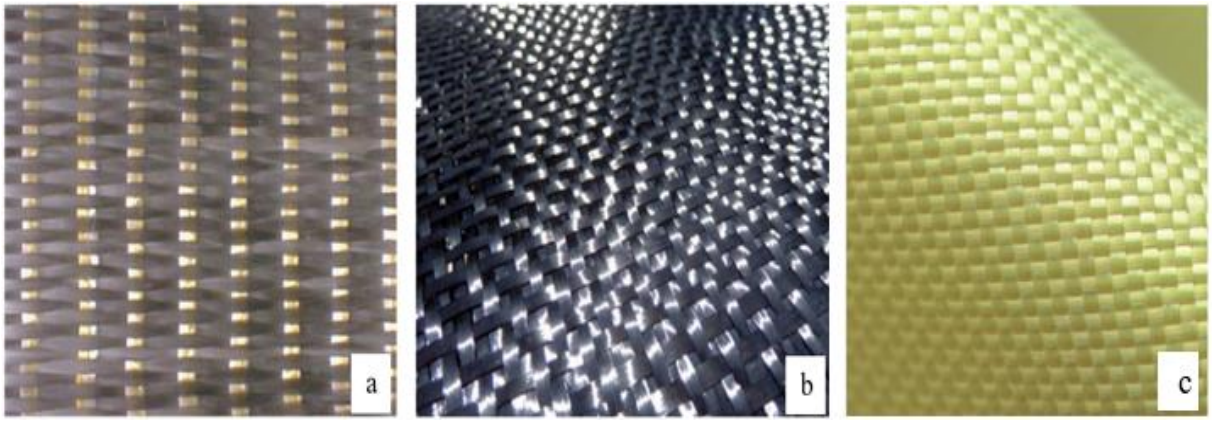


Figure 2. 22*.Schéma d'un matériau composite.* **[33]**

- ***Fibre :***

Les fibres (renforts) prennent la forme filamentaire, allant de la particule de la forme allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet directif, aident à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites. Les fibres les plus couramment employées dans le domaine du génie civil sont : le carbone (haut module élastique et résistances mécaniques importantes à la fatigue), le verre (résistances moyennes, très utilisé pour renforcer les bétons) et l'aramide (de haute résistance à la traction, utilisée en câbles de hautes performances) (Figure 2.23). **[33]**



(a)tissus de fibre verre. (b) tissus de fibre de carbone. (c) tissus de fibre d'aramide.

Figure 2. 23. *Divers tissus de fibres.*

[10]

- ***Matrice :***

C'est un polymère thermostable ou thermoplastique donnant le monolithisme à l'ensemble. Elle fournit le mécanisme nécessaire au transfert de la charge, de part et d'autre des fibres. Elle protège également les fibres des risques d'abrasion et des autres attaques environnementales et chimiques. Les polymères les plus utilisés sont les polyesters, vinylesters et époxy. **[33]**

Selon les fibres utilisées, les composites PRF sont répartis en trois catégories :

- Polymère renforcé de fibres de verre [glass fibre reinforced polymer] : PRFV.
- Polymère renforcé de fibres de carbone [carbon fibre reinforced polymer] : PRFC.
- Polymère renforcé de fibres d'aramide [aramid fibre reinforced polymer] : PRFA.

En général, les composites de fibres de carbone sont plus solides et plus rigides que les autres composites.

Le Tableau 2.11 résume les principales propriétés mécaniques des matériaux composites couramment utilisés en génie civil.

Tableau 2. 11. Propriétés mécaniques typiques des composites PRFV, PRFC et PRFA. **[22]**

	Contenu en fibres (% par poids)	Densité (kg / m^3)	Module d'élasticité longitudinale (Gpa)	Résistance à La traction (MPa)
Fibres de verre / polyester (PRFV laminé)	50 - 80	1600 - 2000	20 -55	400 – 1800
Carbone / époxy (PRFC laminé)	65 - 75	1600 - 1900	120 - 250	1200 – 2250
Aramide / époxy (PRFA laminé)	60 - 70	1050 - 1250	40 - 125	1000 - 1800

La mise en œuvre : Le processus passe généralement par les étapes suivantes :

1. Inspecter la surface de l'élément de structure à renforcer.

2. Réparer les fissures et les surfaces effritées avec une injection d'époxy et de mortier à base de résine époxy.

3. Préparer la surface de l'élément de structure (avec des meules et du sablage humide au besoin) en éliminant les saillies et en s'assurant que le profil est adéquat.

4. Appliquer une couche d'apprêt puis du mastic de vitrier afin d'assurer l'adhérence des tissus de fibres.

5. Appliquer une première couche d'agent d'imprégnation.

6. Appliquer les tissus de fibres sur la surface, comme s'il s'agissait de papier peint.

7. Appliquer une deuxième couche d'agent d'imprégnation, une fois que les tissus auront bien durci, généralement au bout d'une heure.

8. Répéter les étapes 6 et 7, jusqu'à ce que toutes les couches de fibres soient installées. **[33]**

Après ces étapes, on va obtenir un système multicouche comme il est illustré dans la figure 2.24**.**

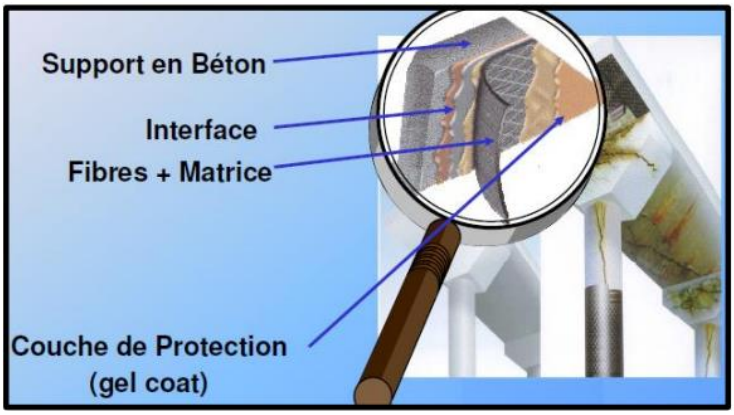


Figure 2. 24.*Conception du système multicouche***. [33]**

L'enveloppement des poteaux par les matériaux composites tient plusieurs méthodes (Figure 2.25).

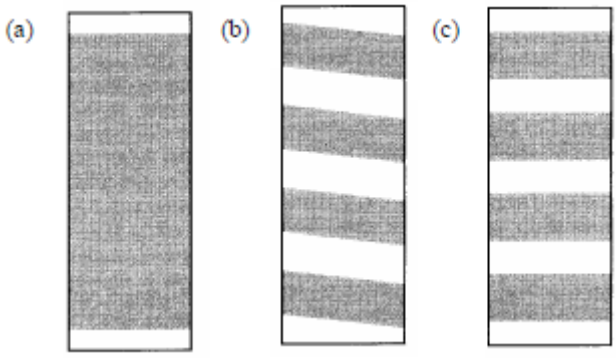


Figure 2. 25*.Méthodes typiques d'enveloppement des poteaux en BA par PRF.* **[28]**

Les figures 2 .26 et 2.27 et 2.28 montrent le renforcement des portiques par les matériaux composites (polymère renforcé en fibre de carbone), pour chacune de poutre, du poteau et de la jonction poteau-poutre.

Figure 2. 26.*Renforts des poutres par collage de plats composites.* **[22]**

***Figure 2. 27**.Renforts des poteaux par fibres de carbone.* **[21]**

***Figure 2. 28.**Renforts des nœuds par fibre de carbone.* **[23]**

Les phases de fonctionnement séquentielles pour l'intervention des nœuds par fibre de carbone sont illustrées dans la figure 2.29**.**

Figure 2. 29*.Phases de fonctionnement séquentielles pour l'intervention des nœuds par fibre de carbone.* **[17]**

- ***Avantages et inconvénients du renforcement par matériaux composites (PRF)***

Ces avantages et inconvénients sont présentés au tableau 2.13.

Tableau 2. 12. Avantages et inconvénients du Renforcement par matériaux composites (PRF). **[26]**

Avantages	*Inconvénients*
-Faible poids. -Travaux légers. -Non sensibilité à la corrosion. -facilité de transport. - grande flexibilité avec une faible épaisseur.	-Mise œuvre spécialisée. -Coût élevé. -Qualités techniques à confirmer.

2.6.11 Renforcement des fondations existant

Ce type de renforcement nécessite l'augmentation des dimensions des semelles existantes afin d'accroître la surface de contact avec le sol. Dans le cas où le poteau est lui-même renforcé par chemisage, il est facile de réaliser un renforcement simple de la semelle (Figure 2.30).

La ceinture entourant la semelle existante et réalisée à sa base joue un rôle crucial dans la transmission des forces inclinées. Pour cela, il est nécessaire de réaliser une ceinture assez rigide**. [18]**

Figure 2. 30.*Renforcement des fondations.* **[29]**

Dans le cas où le poteau n'est pas renforcé, il est possible que la pression du sol exercée sur la nouvelle partie de semelle soit transmise directement à la semelle existante. Ceci est possible grâce à l'introduction, par exemple, de profilés métalliques sous les bords de la semelle. Réalisation d'une enveloppe en béton armé par la suite.

- ***Avantages et inconvénients du renforcement des fondations existantes :***

Ces avantages et inconvénients sont présentés au tableau 2.13.

Tableau 2. 13.Avantages et inconvénients du Renforcement des fondations existantes. **[26]**

Avantages	*Inconvénients*
-Augmente la charge admissible par le bâtiment. -Évite les fissures dues aux tassements différentiels.	-Travaux très lourds. -Création de désordres dans les murs lors des travaux (tassements, décompression…). -Accès délicats. -Peut modifier le comportement du sol (excentricité, surface portante…).

2.7 Conclusion

Ce chapitre présente les techniques et méthodes de renforcement sismique des portiques auto-stables en béton armé endommagés par une action sismique. Ces techniques sont cruciales pour assurer la sécurité et la résilience des portiques, ainsi que pour protéger les vies humaines.

Le principe du renforcement consiste à ajouter de la matière dans les zones endommagées. Parmi les diverses méthodes de renforcement, on trouve : le chemisage en béton armé ou en acier, le collage de matériaux composites (polymères renforcés de fibres), le contreventement par des voiles ou des éléments métalliques, etc.

Le choix de la méthode de renforcement des portiques dépend de plusieurs facteurs, tels que l'importance des dommages constatés, les considérations techniques, économiques, ainsi que les délais des travaux.

Chapitre 3

Etude de cas

3.1 Introduction

Pour l'étude du projet, on se propose d'étudier un bâtiment contreventé par le système de portique auto stable en béton armé. Ces portiques sont endommagés théoriquement par l'action sismique en utilisant une fonction disponible dans le logiciel ROBOT STRUCTURAL ANALYSES. Cette fonction permet de tenir compte des dommages par la réduction de l'inertie pour chaque un des poteaux et des poutres.

3.2 Présentation du cas étudié

Le bâtiment qui fait l'objet de notre étude est un bâtiment R+3 à usage d'habitation, implanté à Bejaia sur un sol ferme de classe S2, classé en zone II-a selon les règlements parasismiques Algériens (RPA 99 /2003).

Les caractéristiques géométriques sont résumées dans le tableau

Tableau3. 1. Caractéristiques géométriques du bâtiment.

Dimensions en élévation	Hauteur totale du bâtiment **(m)**	12.64
	Hauteur du RDC **(m)**	3.06
	Hauteur d'étage courant **(m)**	3.06
Dimensions en plan	Largeur **(m)**	18.06
	Longueur **(m)**	29.65

-Les planchers sont en corps creux (16+4).

-Poutre principale (40 × 30) cm.

-Poutre secondaire (30 ×30) cm.

- Les poteaux (40 × 40) cm pour tous niveaux.

-La terrasse est inaccessible.

La figure obtenue à l'aide du logiciel ROBOT STRUCTURAL ANALYSES :

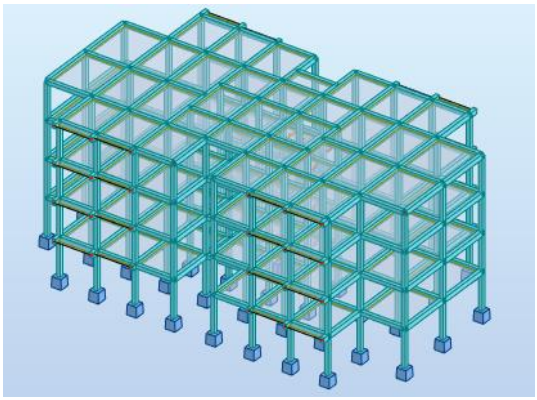


Figure 3. 1. *Vue en 3D du model obtenu par le logiciel* ROBOT STRUCTURAL ANALYSES.

3.3 Etude de cas

Résultats

Pour tenir compte de l'effort sismique sur les portiques auto stables en béton armé, les résultats obtenus à l'aide de logiciel ROBOT STRUCTURAL ANALYSES qui suivent représentent la variation des sollicitations (M, N, T) pour les éléments de structure selon les trois cas suivants.

les résultats sont présentés en forme de comparaison entre les 03 cas (structure initiale, structure endommagée, structure renforcée)

3.3.1 Comparaison des résultats

3.3.1.1 Résultats des efforts normaux et moments pour les poteaux

Tableau 3. 2.Comparaison des résultats des efforts normaux et moments pour les poteaux entre la structure initiale et endommagée (États Limites Ultimes - ELU).

	Structure initiale		**Structure endommagée**		**Comparaison**	
	N_{max} (kN)	**M_{max}** (kN.m)	**N_{max}** (kN)	**M_{max}** (kN.m)	**N_{max}**	**M_{max}**
RDC	914,76	25,36	918,94	27,84	0,45 %	9 %
1er Etage	687,54	31,12	692,10	34,37	0,66 %	10 %
2éme étage	463,05	31,71	466,45	34,33	0.73 %	8 %
3éme étage	241,91	33,78	242,67	34,54	0,31 %	2 %

D'après les résultats du tableau 3.2, on remarque qu'il n'y a pas de variation significative des efforts normaux des poteaux pour les 02 configurations, ceci peut être expliqué comme suit : les charges verticales sont constantes pour les 2 cas (Initiale et endommagée). Pour les moments de flexion, on remarque une légère variation surtout au niveau du RDC,1er et 2éme étage.

Tableau 3. 3.Comparaison des résultats des efforts normaux et moments pour les poteaux entre la structure endommagée et renforcée (États Limites Ultimes - ELU).

	Structure endommagée		**Structure renforcée**		**Comparaison**	
	N_{max} (kN)	**M_{max}** (kN.m)	**N_{max}** (kN)	**M_{max}** (kN.m)	**N_{max}**	**M_{max}**
RDC	918,94	27,84	903,99	26,40	1 %	5 %
1er Etage	692,10	34,37	678,46	36,18	1 %	5 %
2éme étage	466,45	34,33	456,38	37,47	2 %	9 %
3éme étage	242,67	34,54	238,00	28,56	1 %	17 %

D'après les résultats du tableau 3.4, on remarque qu'il n'y a pas de variation significative des efforts normaux des poteaux pour les 02 configurations, ceci peut être expliqué comme suit : les charges verticales sont constantes pour les 2 cas (Initiale et endommagée). Pour les moments de flexion, on remarque une légère variation surtout au niveau du 3éme étage.

Tableau 3. 4.Comparaison des résultats des efforts normaux et moments pour les poteaux entre la structure initiale et endommagée (États Limites de Service - ELS).

	Structure initiale		**Structure endommagée**		**Comparaison**	
	N_{max} (kN)	**M_{max}** (kN.m)	**N_{max}** (kN)	**M_{max}** (kN.m)	**N_{max}**	**M_{max}**
RDC	668,16	18,42	671,20	20,22	0,45 %	9 %
1er Etage	502,46	22,61	505,78	24,96	0,66 %	10 %
2éme étage	338,76	23,03	341,22	24,93	0,72 %	8 %
3éme étage	177,49	24,73	178,03	25,30	0.30 %	2 %

D'après les résultats du tableau 3.4, on remarque qu'il n'y a pas de variation significative des efforts normaux des poteaux pour les 02 configurations, ceci peut être expliqué comme suit : les charges verticales sont constantes pour les 2 cas (Initiale et endommagée). Pour les moments de flexion, on remarque une légère variation surtout au niveau du, 1er étage.

Tableau 3. 5. *Comparaison des résultats des efforts normaux et moments pour les poteaux entre la structure endommagée et renforcée (États Limites de Service - ELS).*

	Structure endommagée		Structure renforcée		Comparaison	
	N_{max} (kN)	M_{max} (kN.m)	N_{max} (kN)	M_{max} (kN.m)	N_{max}	M_{max}
RDC	671,20	20,22	660,29	19,18	1 %	5 %
1er Etage	505,78	24,96	495,83	26,29	1 %	5 %
2éme étage	341,22	24,93	333,88	27,23	2 %	9%
3éme étage	178,03	25,30	174,63	20,91	1 %	17 %

D'après les résultats du tableau 3.5, on remarque qu'il n'y a pas de variation significative des efforts normaux des poteaux pour les 02 configurations, ceci peut être expliqué comme suit : les charges verticales sont constantes pour les 2 cas (endommagée, renforcée). Pour les moments de flexion, on remarque une légère variation surtout au niveau du 3éme étage.

Tableau 3. 6. Comparaison des résultats des efforts normaux et moments pour les poteaux entre la structure initiale et endommagée (États Limites Accidentels - ELA).

	Structure initiale		Structure endommagée		Comparaison	
	N_{max} (kN)	M_{max} (kN.m)	N_{max} (kN)	M_{max} (kN.m)	N_{max}	M_{max}
RDC	879,64	78,63	1020,24	67,57	15 %	14 %
1er Etage	613,31	56,60	722,99	45,85	17 %	18 %
2éme étage	344,92	49,74	402,85	44,50	16 %	10 %
3éme étage	179,22	41,88	180,12	38,94	0,5 %	7 %

D'après les résultats du tableau 3.6, on remarque qu'il y a une réduction significative des efforts normaux des poteaux pour les 02 configurations, ceci peut être expliqué comme suit : ceci est due à la redistribution des efforts normaux dans la structure endommagée, vu que des poteaux sains reprennent les efforts normaux des poteaux endommagés par le séisme (initiale, endommagée). Pour les moments de flexion, on remarque une variation significative (une réduction de l'initiale à l'endommagée) surtout au niveau du RDC, 1er, et 2éme étage, ceci est dû à notre avis à la formation des rotules plastiques.

Tableau 3. 7. Comparaison des résultats des efforts normaux et moments pour les poteaux entre la structure endommagée et renforcée (États Limites Accidentels - ELA).

	Structure endommagée		**Structure renforcée**		**Comparaison**	
	N_{max} (kN)	**M_{max}** (kN.m)	**N_{max}** (kN)	**M_{max}** (kN.m)	**N_{max}**	**M_{max}**
RDC	1020,24	67,57	838,95	25,38	17 %	62 %
1er Etage	722,99	45,85	547,05	29,67	24%	35 %
2éme étage	402,85	44,50	336,08	35,19	16 %	20 %
3éme étage	180,12	38,94	174,98	27,71	2 %	28 %

D'après les résultats du tableau 3.7, on remarque qu'il y a une réduction significative des efforts normaux des poteaux pour les 02 configurations, ceci peut être expliqué comme suit : ceci est due à la redistribution des efforts normaux dans la structure renforcée, vu que des poteaux renforcés permettent de redistribuer les efforts normaux (endommagée, renforcée). Pour les moments de flexion, on remarque une variation significative (une réduction de l'endommagée au renforcée) pour tous les, ceci est dû à notre avis à la mise à niveau du bâtiment par le renforcement.

3.3.1.2 Résultats des contraintes pour les poteaux

Tableau 3. 8. Comparaison des résultats des contraintes pour les poteaux (ELU).

	S MPa		Comparaison	**S MPa**		Comparaison
	Structure initiale	Structure endommagée		Structure endommagée	Structure renforcée	
RDC	8,23	10,48	27 %	10,48	6,85	34 %
1er étage	7,40	10,05	35 %	10,05	6,35	36 %
2éme étage	5,69	8,01	40 %	8,01	5,39	32 %
3éme étage	5,20	7,45	43 %	7,45	4,37	41 %

D'après les résultats du tableau 3.8, on remarque qu'il y a une augmentation significative des contraintes dans les poteaux pour les 02 configurations (Initiale et endommagée), ceci est due à l'action sismique, par contre, on remarque une diminution importante des contraintes en passant de l'endommagée à la structure renforcée.

Tableau 3. 9. Comparaison des résultats des contraintes pour les poteaux (ELS).

	S MPa		Comparaison	**S MPa**		Comparaison
	Structure initiale	Structure endommagée		Structure endommagée	Structure renforcée	
RDC	5,99	7,63	27 %	7,63	4,99	34 %
1er étage	5,39	7,31	35 %	7,31	4,62	36 %
2éme étage	4,14	5,83	40 %	5,83	3,93	32 %
3éme étage	3,81	5,46	43 %	5,46	3,19	41 %

D'après les résultats du tableau 3.9, on remarque qu'il y a une augmentation significative des contraintes dans les poteaux pour les 02 configurations (Initiale et endommagée), ceci est due à l'action sismique, par contre, on remarque une diminution importante des contraintes en passant de l'endommagée à la structure renforcée.

Tableau 3. 10. Comparaison des résultats des contraintes pour les poteaux (ELA).

	S MPa		Comparaison	**S MPa**		Comparaison
	Structure initiale	Structure endommagée		Structure endommagée	Structure renforcée	
RDC	16,05	24,02	49 %	24,02	7,64	68 %
1er étage	14,50	21,62	49 %	21,62	7,30	66 %
2éme étage	12,93	20,87	61 %	20,87	7,04	66 %
3éme étage	7,60	9,82	29 %	9,82	4,91	50 %

D'après les résultats du tableau 3.10, on remarque qu'il y a une augmentation significative des contraintes dans les poteaux pour les 02 configurations (Initiale et endommagée), ceci est due à l'action sismique, par contre, on remarque une diminution importante des contraintes en passant de l'endommagée à la structure renforcée.

3.3.1.3 Résultats des contraintes pour les poutres principales

Tableau 3. 11. Comparaison des résultats des contraintes pour les poutres principales (ELU).

	S MPa		Comparaison	**S MPa**		Comparaison
	Structure initiale	Structure endommagée		Structure endommagée	Structure renforcée	
RDC	7,60	21,78	100 %	21,78	7,70	64 %
1er étage	7,46	21,55	100 %	21,55	7,51	65 %
2éme étage	7,59	21,78	100 %	21,78	7,53	65 %
3éme étage	8,20	23,81	100 %	23,81	8,20	65 %

D'après les résultats du tableau 3.11, on remarque qu'il y a une augmentation significative des contraintes dans les poteaux pour les 02 configurations (Initiale et endommagée), ceci est due à l'action sismique, par contre, on remarque une diminution importante des contraintes en passant de l'endommagée à la structure renforcée.

3.3 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à une étude comparative entre trois configurations :

1. Structure initiale (Avant l'endommagement)
2. Structure endommagée (en tenant compte de la réduction d'inertie selon l'ACI)
3. Structure renforcée (ajout de voile de contreventement)

La comparaison s'intéresse aux efforts internes (M, N, T) selon les trois configurations les principaux résultats obtenus sont :

1. ***Pour les sollicitations (M, N, T) :***
   - Une augmentation significative des valeurs de sollicitation (N, M, T) pour l'ELU et ELS.
   - Une augmentation notable des valeurs de sollicitation (N, M, T) pour l'ELA.
2. ***Pour les contraintes :***
   - Les contraintes augmentent dans le passage de la structure initiale à endommagée.
   - Les contraintes diminuent dans le passage de la structure endommagée à la structure renforcée.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les structures en béton armé conçues en portiques auto-stables en béton armé représentent près de 80 % du parc national de logements. Ces types de structures implantées dans les zones sismiques classées par le RPA 99 version 2003 sont vulnérables à l'action sismique. Le dernier séisme de Boumerdes le 21 mai 2003 témoigne des dégâts observés dans ce type de structures.

L'opération de mise à niveau ou de renforcement de ces structures après le séisme devient une priorité pour la sauvegarde de ces structures légèrement touchées. L'efficacité de ces renforcements dépend de plusieurs paramètres, en particulier, le taux de participation du renforcement à la reprise des charges horizontales par rapport au béton endommagé. Tenir compte du pourcentage des dégâts causés par le séisme sur les portiques auto-stables est une opération difficile en pratique. L'option intégrée dans le logiciel ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS permet de tenir compte des dégâts en réduisant l'inertie des éléments porteurs (poteaux et poutres).

Ce mémoire est composé de 3 chapitres. Le premier chapitre a mis l'accent sur des généralités sur les séismes, la classification des dégâts des portiques auto-stables en béton armé, ainsi que sur les dommages des portiques auto-stables en béton armé, principalement au niveau des nœuds poteaux-poutres.

Les méthodes de renforcement post-sismique des portiques auto-stables en béton armé ont été mises en revue. Ces diverses méthodes permettent à l'ingénieur de choisir la technique qui convient selon la dégradation observée. Ces méthodes ont été détaillées au niveau du deuxième chapitre.

Un cas d'étude d'un bâtiment R+3 implanté en zone sismique II-a (Bejaia), celui-ci est conçu en portique auto-stable en béton armé. Pour mener cette étude, trois configurations sont proposées en utilisant le logiciel ROBOT Structural Analysis :

- Structure initiale (pré-sismique).
- Structure endommagée (en utilisant une option de réduction d'inertie tenant compte de la fissuration, disponible dans le logiciel ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS).
- Structure renforcée par des voiles de contreventement.

Ces trois configurations sont modélisées et les résultats obtenus sont récapitulés dans le troisième chapitre. Ces résultats sont décrits dans ce qui suit :

- Après la transition de la structure initiale à endommagée, les contraintes diminuent, puis augmentent après le renforcement, ce qui indique la réussite de la méthode de renforcement qui démontre une meilleure capacité de charge et une résistance accrue aux déformations permanentes.
- On remarque qu'il y a une augmentation significative des contraintes dans les poteaux pour les 02 configurations (Initiale et endommagée), ceci est due à l'action

sismique, par contre, on remarque une diminution importante des contraintes en passant de l'endommagée à la structure renforcée.

- On remarque qu'il y a une réduction significative des efforts normaux des poteaux pour les 02 configurations, ceci peut être expliqué comme suit : ceci est due à la redistribution des efforts normaux dans la structure renforcée, vu que des poteaux renforcés permettent de redistribuer les efforts normaux (endommagée, renforcée). Pour les moments de flexion, on remarque une variation significative (une réduction de l'endommagée au renforcée) pour tous les cas, ceci est dû à notre avis à la mise à niveau du bâtiment par le renforcement.

Enfin, les résultats obtenus représentent un point de départ pour les futures recherches dans le domaine du parasismique.

Annexes

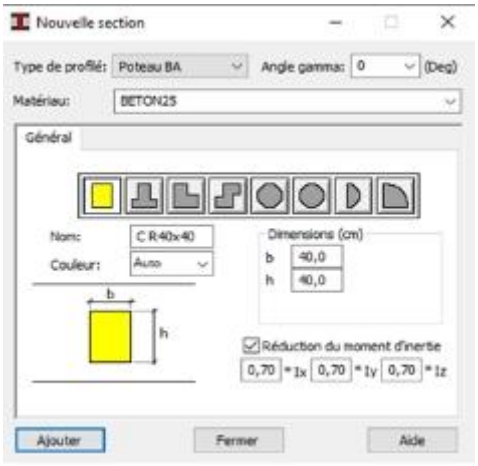
Annexes

Conformément aux normes ACI, le tableau 6.6.3.1.1(a) est utilisé pour réduire l'inertie des poteaux et des poutres.

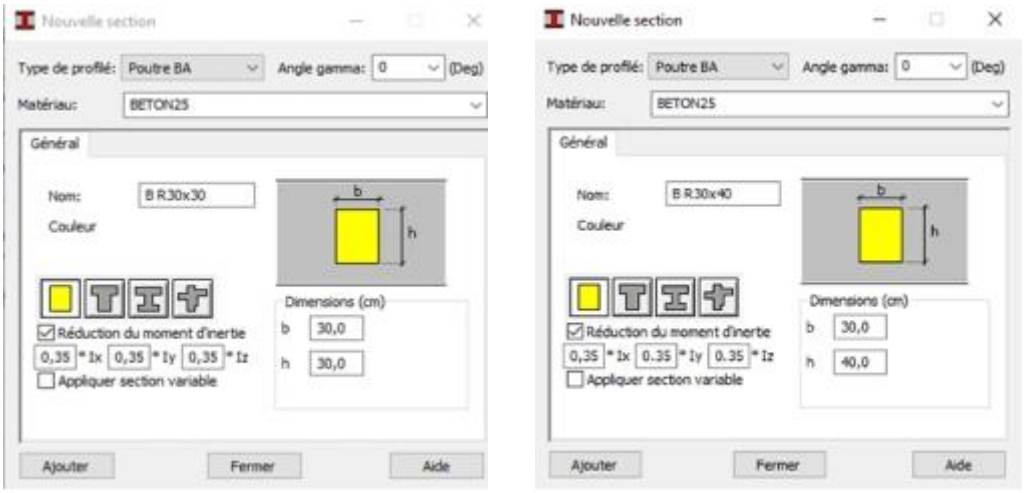
Table 6.6.3.1.1(a) **-** Moment of inertia and cross-sectional area permitted for elastic analysis at factored load level

Member and condition		Moment of inertia	Cross-sectional area
Columns		**0.70 *Ig***	**1.0*Ag***
Walls	**Uncracked**	**0.70*Ig***	
	Cracked	**0.35 *Ig***	
Beams		**0.35 *Ig***	
Flat plates and flat slabs		**0.25 *Ig***	

La réduction d'inertie dans le logiciel ROBOT STRUCTURAL ANALYSES

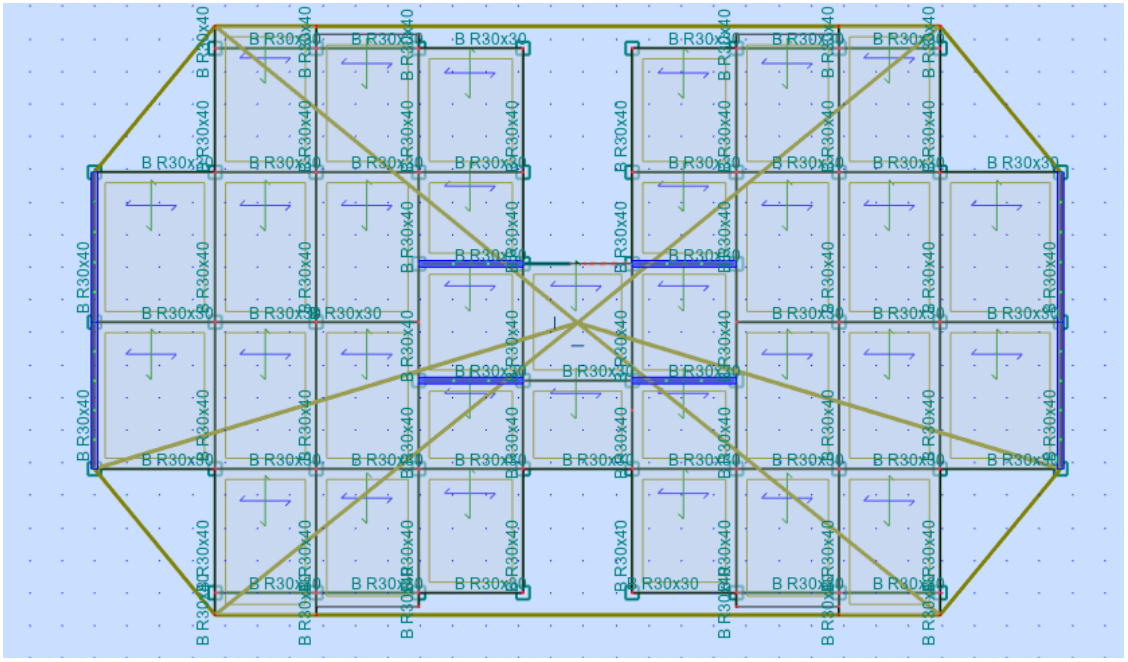


Réduction d'inertie pour les poteaux.



Réduction d'inertie pour les poutres.

Disposition des voiles

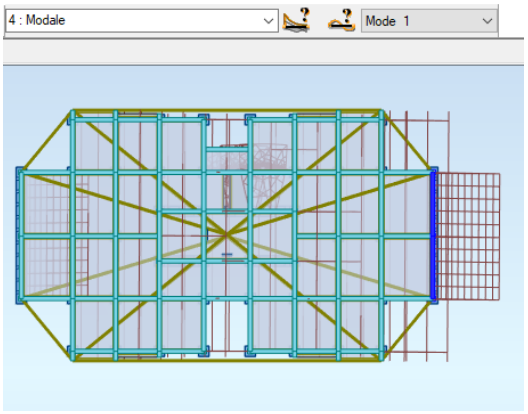


Cas/Mode	Fréquence [Hz]	Période [sec]	Masses Cumulées UX [%]	Masses Cumulées UY [%]	Masses Cumulées UZ [%]	Masse Modale UX [%]	Masse Modale UY [%]	Masse Modale UZ [%]	Tot.mas.UX [kg]	Tot.mas.UY [kg]
4/ 1	3,52	0,28	72,09	0,00	0,0	72,09	0,00	0,0	2031693,60	2031693,60
4/ 2	6,62	0,15	72,09	75,80	0,0	0,00	75,80	0,0	2031693,60	2031693,60
4/ 3	10,01	0,10	72,10	76,76	0,0	0,00	0,96	0,0	2031693,60	2031693,60
4/ 4	15,52	0,06	91,53	76,76	0,0	19,43	0,00	0,0	2031693,60	2031693,60
4/ 5	23,41	0,04	91,53	93,45	0,0	0,00	16,69	0,0	2031693,60	2031693,60
4/ 6	29,84	0,03	92,57	93,46	0,0	1,04	0,01	0,0	2031693,60	2031693,60
4/ 7	33,24	0,03	96,51	93,46	0,0	3,93	0,00	0,0	2031693,60	2031693,60
4/ 8	35,48	0,03	96,56	93,64	0,0	0,06	0,19	0,0	2031693,60	2031693,60
4/ 9	37,66	0,03	96,65	93,65	0,0	0,09	0,01	0,0	2031693,60	2031693,60
4/ 10	40,62	0,02	96,67	94,76	0,0	0,02	1,11	0,0	2031693,60	2031693,60

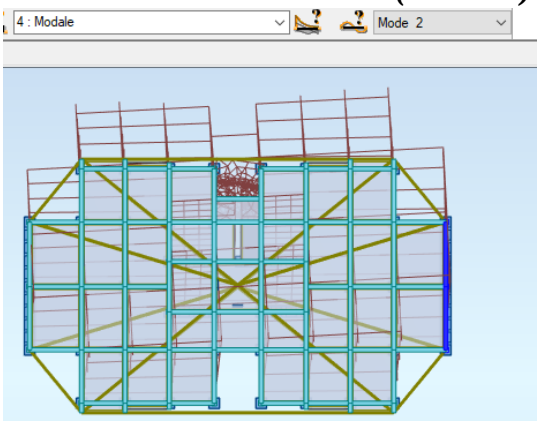
❖ **Tableau** : Périodes et taux de participation massique de la structure.

- La période fondamentale : T=0.04 sec.
- Nombre de modes à retenir c'est : 5 modes.

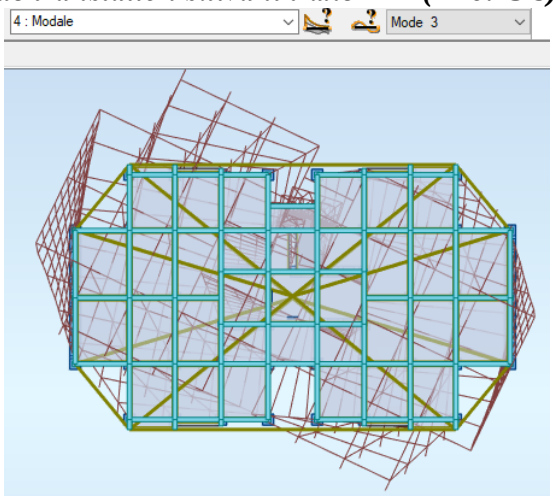
Les modes



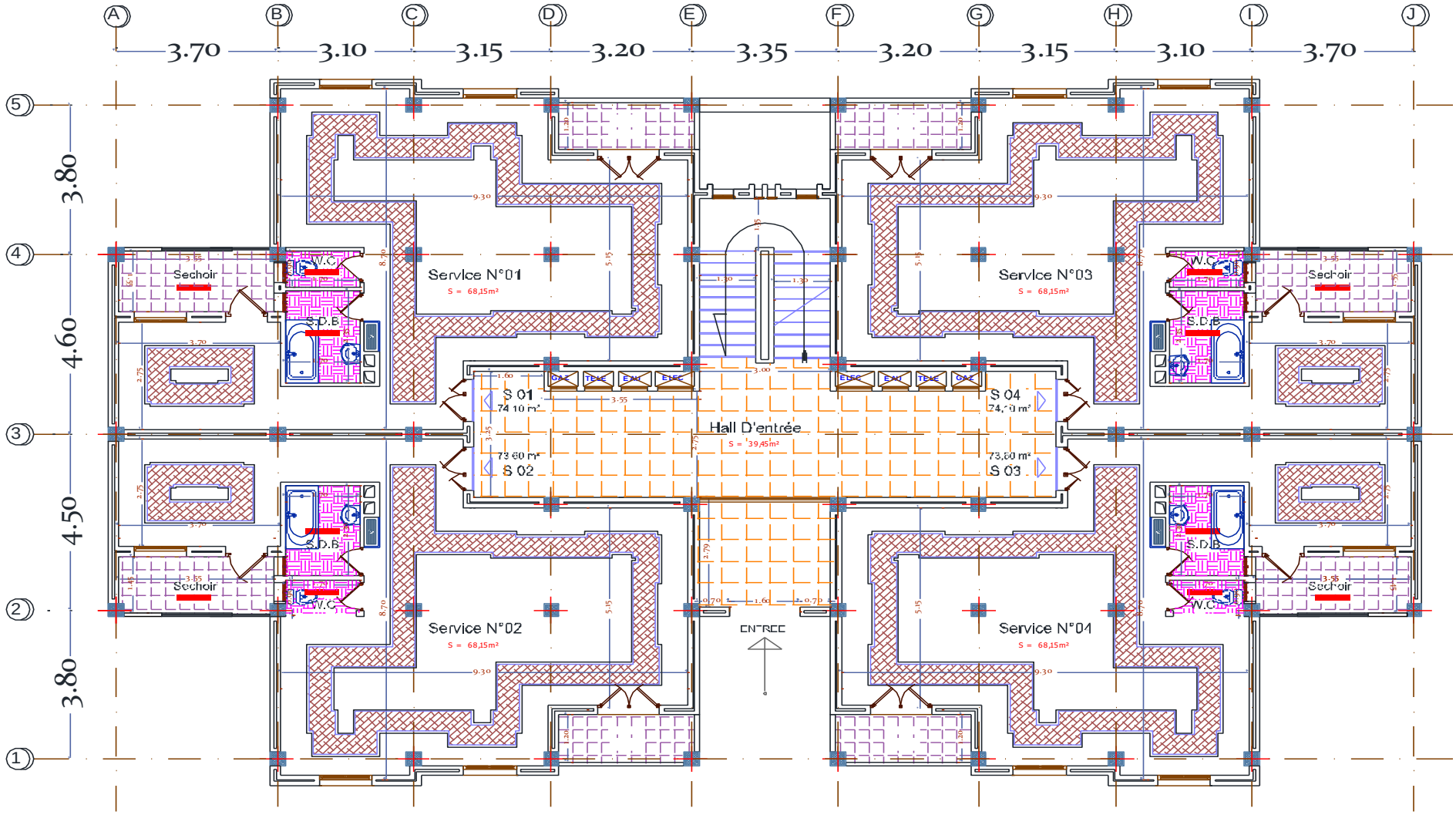
- ***1er Mode translation suivant l'axe X-X (T=0.28 s).***



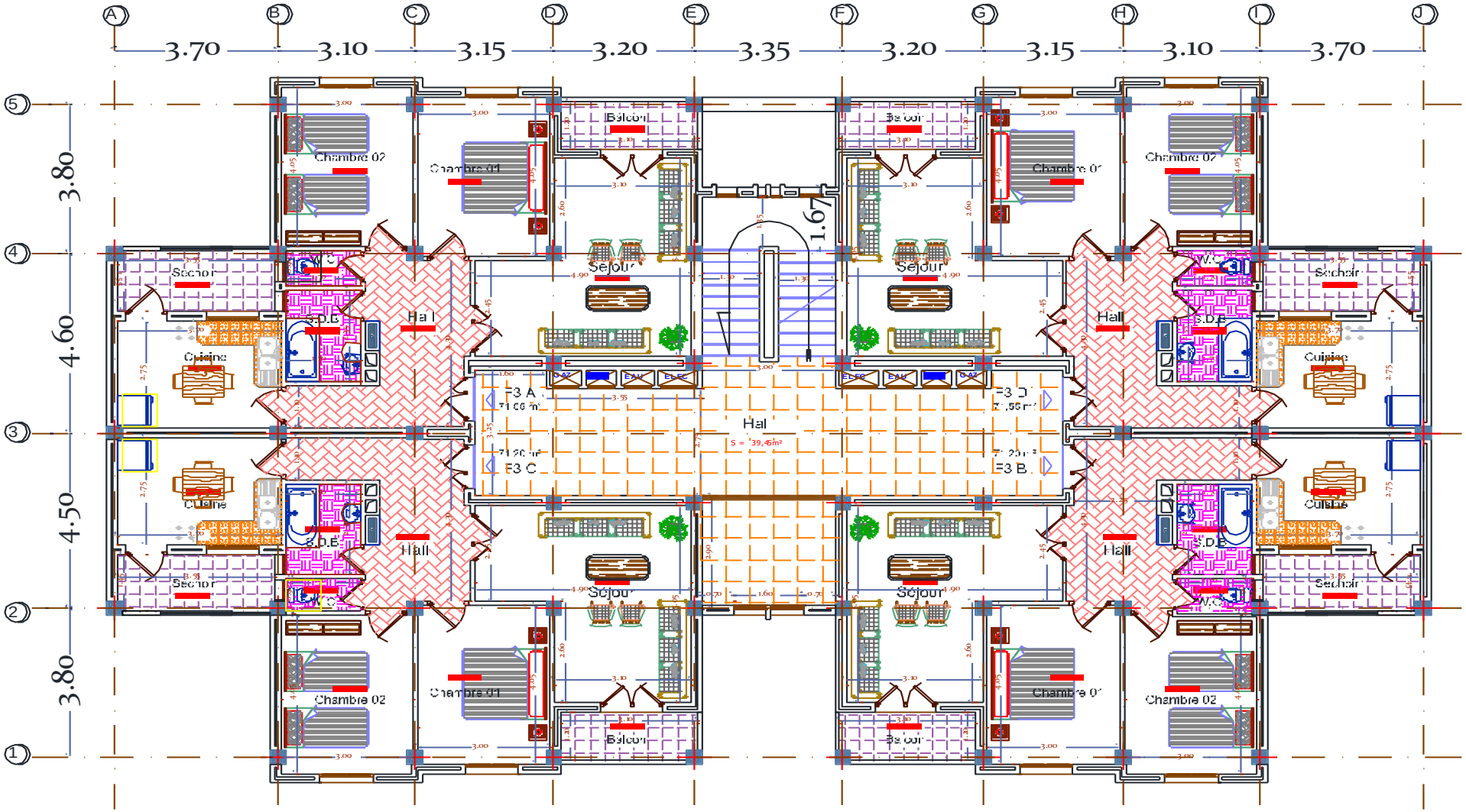
- ***2 eme Mode translation suivant l'axe Y-Y (T=0.15 s).***



- ***3eme Mode Rotation selon l'axe Z-Z (T=0. 1 s).***



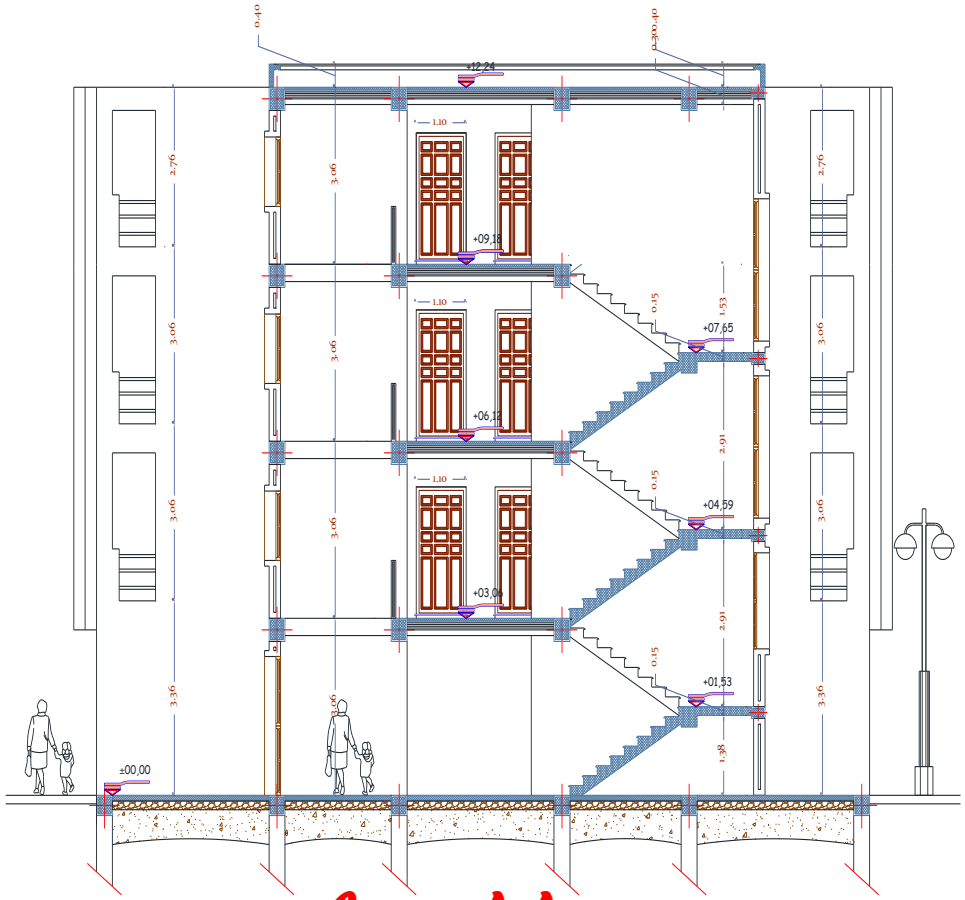
Plan RDC echelle 1/50



Plan Etage Courant echelle 1/50

Façade Principale echelle 1/50

Façade Arière echelle 1/50



Coupe A-Acenelle 1/50

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1] Shedlock, K. M., & Pakiser, L. C. (2014). Earthquakes.

[2] Achour, B. (2020). Surface acoustic wave sensors operating at 104 and 208 MHz : Modeling, design and application for the detection of heavy metal ions. [Thèse de doctorat, LE MANS université].

[3] Cherifi, F. (2016). Évaluation de la vulnérabilité sismique des bâtiments existants en Algérie [Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri].

[4] RPA99, R. P. A. (2003). RPA 99 version 2003 : Centre National de recherche en Génie Parasismique. Algérie.

[5] Mekki, M. (2022). Génie Parasismique. Université Mohamed khider -Biskra.

[6] Benmansour-Meddane, N. (2019). Méthode Dynamique Modale Spectrale.

[7] Grünthal, G. (1998). European macro-seismic scale 1998 (EMS-98). Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie.

[8] Cervera, J. (2012). Dynamique des structures. Vulnérabilité aux bâtiments. Construction parasismique. Centre d'Innovation en Technologie pour le Développement Humain. Université Polytechnique de Madrid.

[9] Dr. KASSOUL, A. (2017). Pathologie des bâtiments endommagés par les séismes. Université Hassiba Ben-Bouali-Chlef.

[10] Bigaud, D. (2015). Renforcement parasismique de structures en béton armé par matériaux composites, Recommandations provisoires. Association Française du Génie Civil (AFGC).

[11] SEGHIR, A. (2007). Séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003 Pathologie de construction et dommages sismiques.

[12] MENASRI, Y. (2018). Approche de la Vulnérabilité Sismique des Structures Portiques en Béton Armé-Cas Bâtis Algériens [Thèse de doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma].

[13] Chen, H., Xie, Q., Dai, B., Zhang, H., & Chen, H. (2016). Seismic damage to structures in the M s6.5 Ludian earthquake. Earthquake Engineering and Engineering Vibration.

[14] Davidovici, V. (2003). Rapport préliminaire séisme de Boumerdes 21 mai 2003.Alger.

[15] Kahil, A. (2015). Evaluation de la performance sismique des structures en

Béton Armé en tenant compte de la nocivité du signal sismique [Thèse de doctorat,

Université Mouloud Mammeri].

[16] G. Doğan, M. H. Arslan. (2016). Failure modes of RC columns under loading.

[17] Humberto Salazar, A. V. (2003). Seismic assessment, strengthening and repair of existing buildings [Thèse de doctorat, Université de Aveiro].

[18] Ministère de l'habitat et de l'urbanisme. Catalogue des méthodes de réparation et de renforcement des ouvrages. CGS Centre National de recherche appliquée en génie parasismique.

[19] Le Nguyen, K. (2015). Contribution à la compréhension du comportement des structures renforcées par FRP sous séismes [Thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de LYON].

[20] Boukais, S. (2018). Evaluation des structures endommagées par le séisme, leur confortement et réparation [Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou].

[21] Chehimi, A. (2016). Renforcement d'un bâti existant vis -à-vis du séisme : Ministère de Justice à Beyrouth [Mémoire Présenté en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur CNAM].

[22] Touati, M. (2015). Etude et analyse des différents types de renforcement dans les poutres-ponts [Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabès ,Sidi Bel Abbès].

[23] Djafar Henni,I. (2021). Polycopié Pathologies et Réhabilitation des Structures.

[24] CEREMA Ouest. (2020). Réparations d'éléments en béton en milieu marin Béton projeté.

[25] The Freyssinet Group. (2013).Seismic repair and strengthening of existing buildings.

[26] Groupe de travail AFPSCSTB. (2013). Diagnostic et renforcement du bâti existant vis-à-vis du séisme.

[27] Belhannachi, H. (2009). Réhabilitation et renforcement des poteaux en béton armé [Thèse Présentée pour l'obtention du Diplôme de Magister en Génie Civil, Université Mentouri, Constantine].

[28] Miranda-Vizuete, J. (2000). Techniques et systèmes de renfort des structures en béton.

[29] Abou Chakra, F. (2016). Renforcement des poteaux en béton armé au moyen de polymère renforcé par fibre de carbone : Comparaison des codes [Mémoire Présenté en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur CNAM, ISSAE – Centre associe du LIBAN].

[30] Chalah, F., Falek, K., Aoudjane, K., Chalah, L., Nechnech, A., Kaci, S., & Bali, A. (2009). De quelques procèdes de réparation de structures : portiques en béton arme.

[31] Plumier, A. (2011). Pathologies et réparations structurales des constructions.

[32] Amar, K. (2017). Réhabilitations des constructions en béton armé. Université Hassiba Ben-Bouali,Chlef.

[33] Gherdaoui, M. (2018). Renforcement des ouvrages en béton arme soumis aux actions gravitaires avec matériaux composites [Thèse de Doctorat, université 8 Mai 1945, Guelma].