

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلكايد – تلمسان –
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Génie civil

Spécialité : Réhabilitation Intelligente des Bâtiments

Par :

Attar Amina

Bensaad Nourhane

Sujet

Chemisage des structures en béton armé : Conception et techniques utilisées

Soutenu publiquement, le 18 / 06 /2026, devant le jury composé de :

Mme BENMANSOUR Nassima	MCA	Université de Tlemcen	Président
Mr MAACHOU Omar	MAA	Université de Tlemcen	Examineur
Mr BOUMECHRA Nadir	Professeur	Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2025/2026



Remerciements

Nous exprimons notre profonde gratitude à Dieu, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la santé, la force et la persévérance nécessaires afin de mener à bien ce mémoire.

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à notre encadrant, Monsieur Boumchera Nadir, pour son accompagnement.

Nous sommes honorées que Mme Benmansour Nassima nous a conféré en présidant le jury de ce mémoire.

Nous remercions sincèrement Monsieur Maachou Omar d'avoir accepté de faire partie du jury et d'examiner notre mémoire.

Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs au cours de nos années d'études.





Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur tendresse, leurs soutiens et leurs prières tout au long de mes études.

À mon père, qui a tout fait pour m'offrir le meilleur possible, et

À ma mère, qui a fait tout pour que je sois à l'aise.

Je vous chérirai pour toujours.

Je vous remercie pour la confiance que vous m'avez accordée.

À moi-même, avec fierté

À ma tante, dont les prières ont été un soutien précieux tout au long de mon parcours.

Mes chères sœurs et à leurs époux pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

À mes neveux et mes nièces, source de bonheur et de tendresse dans ma vie.

À ma chère binôme Nourhane, pour son soutien, sa patience et tous les efforts partagés durant ce projet.

Amina





Dédicaces

À ma petite famille, et tout particulièrement à mes parents, pour leur amour et leur encouragement constant, qui ont toujours été ma force.

À moi-même, pour la persévérance et le courage investis tout au long de ce travail

À tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont encouragée tout au long de mon parcours universitaire

À ma binôme Amina, en témoignage de notre travail commun et de notre belle coopération.

Nourhane



TABLE DES MATIERES

Résumé (Français) :	12
English Summary :	12
:الملخص (العربية)	12
INTRODUCTION GENERAL :	13
Introduction :	2
I.1 Le chemisage en Béton Armé :	3
I.1.1 Définition du chemisage en BA :	3
I.1.2 Objectifs mécaniques et fonctionnels :	4
I.1.3 Cas d'application du chemisage en BA :	4
I.1.4 Types de chemisage en béton armé :	7
I.1.5 Application du chemisage en béton armé aux éléments structuraux :	9
I.1.6 Avantages du chemisage en béton armé :	12
I.1.7 Inconvénients et limites :	13
I.1.8 La réglementation du chemisage en BA (Algérie) :	13
I.2 Le chemisage métallique :	14
I.2.1 Définition de chemisage métallique :	14
I.2.2 Objectifs Mécaniques et Fonctionnels :	15
I.2.3 Cas d'Application :	16
I.2.4 Type de chemisage métallique :	17
I.2.5 Avantages du chemisage métallique :	18
I.2.6 Inconvénients et limites :	18
I.2.7 Comparaison entre le chemisage métallique et le chemisage en béton armé :	18
I.3 Chemisage en fibre de carbone :	19
I.3.1 Définition du chemisage en FRP :	19
I.3.2 Objectifs mécaniques et fonctionnels :	20
I.3.3 Cas d'application du chemisage :	21
I.3.4 Les propriétés de la fibre de carbone :	22
I.3.5 Avantages de la fibre de carbone :	23
I.3.6 Inconvénients de la fibre de carbone :	23
I.4 Comparaison des techniques de chemisage : Béton armé, Métallique et PRF :	24
I.5 Choix du type de chemisage adapté :	25
I.5.1 Chemisage en béton armé (Enrobage classique) :	25

I.5.2 Chemisage métallique :	25
I.5.3 Chemisage par matériaux composites (PRF / Carbone) :	25
I.5.4 Cas spécifiques et variantes :	25
Conclusion :	26
Introduction :	29
II.1 Historique de Chemisage :	29
II.1.1 Origines et premières applications (avant 1970) :	29
II.1.2 Adoption et Développement après les normes sismiques (1970–1985) :	29
II.1.3 Développements techniques et normalisation (1985–2000) :	32
II.1.4 Chemisage des colonnes en béton armé (2000–aujourd’hui) et tendances futures :	33
II.1.5 Synthèse de l’évolution des techniques de chemisage et de leur codification :	35
II.2 Principe du chemisage en béton armé :	35
II.2.1 Principe général du renforcement par augmentation de section :	35
II.2.2 Collaboration entre l’ancien et le nouveau béton :	36
II.2.3 Rôle des armatures ajoutées :	37
II.2.4 Amélioration de la capacité portante (compression, flexion, cisaillement) :	38
II.2.5 Contribution au comportement parasismique selon le RPA 2024 :	38
II.3 Méthodologie du chemisage en béton armé (Partie étude et organisation avant exécution) :	39
II.3.1 Diagnostic et évaluation de l’élément existant :	39
II.3.3 Analyse des causes de dégradation :	40
II.3.3 Dimensionnement et vérifications de calcul :	41
II.3.4 Vérification réglementaire (RPA, DTR) :	41
II.3.5 Planification et organisation des travaux :	42
II.4 Technique de mise en œuvre du chemisage (Partie pratique chantier) :	44
II.4.1 Préparation du support (piquage, nettoyage, traitement) :	44
II.4.2 Mise en place des connecteurs et ancrages :	45
II.4.3 Pose des armatures longitudinales et transversales :	46
II.4.4 Coffrage du chemisage :	48
II.4.5 Coulage du béton et vibration :	48
II.4.6 Cure et contrôle qualité :	49
II.4.7 Détails constructifs et aspects technologiques :	49
II.5 Analyse de structure renforcer par chemisage :	49
II.5.1 Modélisation de la structure renforcée :	50
II.5.2 Évaluation de la capacité portante après renforcement :	51

II.5.4 Comparaison entre la structure avant et après renforcement :	51
Conclusion :	52
Partie 1 : Méthodologie pour la vérification des structures BA renforcés par chemisage	57
III.1.1 Introduction :	57
III.1.2 Organigramme de la Méthodologie pour la vérification des structures BA renforcés par chemisage :	57
Partie 2 : Application Réhabilitation bâtiment BA par chemisage	59
III.2.1 Données du projet :	59
III.2.1.1 Description générale de l'ouvrage :	59
III.2.1.2 Contexte géotechnique et sismique :	61
III.2.1.3 Description de la structure :	61
III.2.2 Modélisation et analyse de la structure :	63
III.2.2.1 Modélisation de la structure :	63
III.2.2.2 Analyse de la structure :	64
III.2.2.3 Vérification de la résistance des éléments de la structure :	69
III.2.3 Proposition de renforcement par chemisage en béton armé :	73
III.2.3.1 Chemisage des poteaux :	73
III.2.3.2 Chemisage des poutres :	74
III.2.3.3 Chemisage des chainages :	75
III.2.4 Vérification de la résistance des éléments renforcés par chemisage de la structure :	75
III.2.5 Mise en œuvre des opérations de chemisage en béton armé :	82
Partie 3 : Vérification de la résistance sismique globale de la structure par la méthode Push over.	84
III.3.1 Présentation de la méthode Push over :	84
III.3.2 Méthodologie de l'analyse Push over par le logiciel Sap2000 :	84
III.3.3 Application de la méthode de Push over pour le bâtiment avant et après chemisage :	89
III.3.3.1 Avant chemisage :	90
III.3.3.1 Apres chemisage :	91
Conclusion :	94
CONCLUSION GENERALE :	95
Références :	96

LISTE DES FIGURES

- Figure I.1:** Chemisage en béton pour augmenter la section de poteau
- Figure I.2 :** Chemisage d'un poteau en Beton arme
- Figure I.3 :** Carbonatation du béton d'enrobage
- Figure I.4 :** Dégradation des éléments d'un ouvrage par carbonatation
- Figure I.5 :** Corrosion des armatures
- Figure I.6 :** Corrosion par piqûres liées aux chlorures
- Figure I.7 :** chemisage en béton armé
- Figure I.8 :** Chemisage d'un poteau en Beton arme
- Figure I.9:** Chemisage d'un poteau en Beton arme
- Figure I.10:** Chemisage d'un poteau en Beton arme
- Figure I.11:** Chemisage d'une poutre en Beton arme
- Figure I.12:** Chemisageur voile
- Figure I.13:** Renforcement de fondations existantes
- Figure I.14:** Renforcement de plancher par béton arme
- Figure I.15 :** Chemisage métallique des poteaux
- Figure I.16:** Renforcement d'une structure par chemisage en acier
- Figure I.17:** Différentes configurations de chemisage en acier appliquées aux poteaux
- Figure I.18:** Chemisage en fibre d'un poteau
- Figure I.19:** Chemisage en fibre de carbone
- Figure I.20:** Renforcement des nœuds par chemisage en FRP
- Figure I.21:** Fibre de carbone tissé
- Figure I.22:** chemisage en BA, Métallique, FRP
- Figure II.1 :** Dommages à l'Olive View Médical Center (9 février 1971)
- Figure II.2 :** Un support en acier armé du passage supérieur des autoroutes a été endommagé lors du San Fernando en 1971
- Figure II.3 :** Dégâts causés à un bâtiment par le tremblement de terre du Frioul
- Figure II.4 :** Séisme de 1985 à Mexico effondrement vertical d'un immeuble
- Figure II.5 :** Innovations matérielles
- Figure II.6 :** Enlèvement du béton de couverture et rugosité de la surface
- Figure II.7 :** Réfection des bétons et protection des armatures
- Figure II.8 :** Renforcement avec ajout d'armatures
- Figure II.9 :** Pose des armatures longitudinales et transversales
- Figure II.11 :** Réparation par chemisage en béton armé
- Figure II.12 :** Coffrage du chemisage
- Figure II.13 :** Coulage du béton
- Figure III.1 :** Organigramme de la Méthodologie pour la vérification des structures BA renforcés par chemisage
- Figure III.2 :** Plan de plancher Niv = +4.20m, +7.60m, +10.05m
- Figure III.3 :** Plan de fondation et ferrailage de poteaux
- Figure III.4 :** Plan de ferrailage de poutre
- Figure III. 5 :** vue en 3D

Figure III.6 : Résultats de l'analyse modale : périodes propres et masses participantes cumulées.

Figure III.7: Moment fléchissant (M) A ELU

Figure III.8 : Moment fléchissant (M) A ELS

Figure III.9 : Effort normal (N) A ELU

Figure III.10 : Effort normal (N) A ELS

Figure III.11 : Effort tranchant (V) A ELU

Figure III.12 : Effort tranchant (V) A ELS

Figure III.13 : Vérification du ratio de résistance des poteaux

Figure III.14: Vérification du ferrailage des poutres principales et des chaînages (Z=4.05 m)

Figure III.15 : Vérification du ferrailage des poutres principales et des chaînages (Z=7.45 m)

Figure III.16 : Vérification du ferrailage des poutres principales et des chaînages (Z=9.9 m)

Figure III.17 : Vérification de la résistance des poteaux (ratio<1,0) après chemisage

Figure III.18: Résultats de l'analyse modale : périodes propres et masses participantes cumulées.

Figure III.19: Moment fléchissant (M) A ELS

Figure III.20 : Moment fléchissant (M) A ELU

Figure III.21 : Effort normal (N) A ELS

Figure III.21 : Effort normal (N) A ELU

Figure III.22 : Effort tranchant (V) A ELS

Figure III.23 : Effort tranchant (V) A ELU

Figure III.24 : chemisage des poteaux

Figure III.25 : chemisage des chaînages

Figure III.26 : Load Case "G + 0.3 Q"

Figure III.27 : Load case "Pushover"

Figure III.28 : Déformée de la structure après l'exécution (Run) de l'analyse

Figure III.29 : Courbe de capacité S_A-S_D de la structure avant renforcement par chemisage

Figure III.30 : Paramètres du calcul Push over

Figure III.31 : La courbe de Capacité V-D de la structure avant renforcement par chemisage

Figure III.32 : Les courbes de Capacité et de demande de la structure avant renforcement par chemisage.

Figure III.33 : La courbe de Capacité de la structure après renforcement par chemisage

Figure III.34 : Les courbes de Capacité et de demande de la structure après renforcement par chemisage.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Réglementation algérienne applicable au chemisage en béton armé (RPA, 2024) et (DTR-BE 2.1) et (Journal Officiel de la République Algérienne)

Tableau I.2: Comparaison entre le chemisage métallique et le chemisage en béton armé

Tableau I.3: Comparaison des techniques de chemisage : BA, Métallique et FRP .

Tableau II. 1 : Synthèse de l'évolution des techniques de chemisage et de leur codification

Tableau III.1 : Descente des charges Plancher courant et terrasse accessible

Tableau III.2 : Descente des charges Plancher terrasse inaccessible

Tableau III.3 : surcharge de la Maçonnerie

Tableau III.4 : Reconnaissance du Sol d'Assise

Résumé (Français) :

Ce projet de fin d'études porte sur le renforcement des structures en béton armé par la technique du chemisage, utilisée comme solution de réhabilitation face aux différentes dégradations (vieillesse, charges d'exploitation et actions sismiques). L'étude présente les principales techniques de chemisage (béton armé, métallique et composites) ainsi qu'une comparaison de leurs performances, avec un intérêt particulier pour le chemisage en béton armé. La partie pratique concerne un bâtiment modélisé à l'aide du logiciel SAP2000, où une analyse push over a été réalisée pour évaluer la résistance sismique avant et après renforcement. Les résultats montrent l'efficacité du chemisage dans l'amélioration du comportement structural des ouvrages en béton armé.

Mots-clés : béton armé, chemisage, réhabilitation, analyse push over, SAP2000.

English Summary:

This final-year project focuses on the strengthening of reinforced concrete structures using the jacketing technique, which is considered an effective rehabilitation method against deterioration caused by aging, service loads, and seismic actions. The study presents the main jacketing techniques (RC jacketing, steel jacketing, and composite materials) with a comparative analysis, with particular emphasis on reinforced concrete jacketing. The practical part involves the modelling of a building using SAP2000, where a pushover analysis was carried out to evaluate the seismic performance before and after strengthening. The results demonstrate the effectiveness of jacketing in improving the structural behavior of reinforced concrete buildings.

Keywords: reinforced concrete, jacketing, rehabilitation, push over analysis, SAP2000.

المخلص (العربية):

يتناول هذا مشروع التخرج موضوع تدعيم المنشآت الخرسانية المسلحة باستخدام تقنية التغليف والتي تُستعمل كحل لإعادة تأهيل المنشآت المتضررة بسبب عوامل مختلفة مثل تقادم المواد، الأحمال التشغيلية، أو الزلازل. تتضمن الدراسة عرض أهم تقنيات التغليف (الخرسانة المسلحة، المعدني، والمواد المركبة) مع إجراء مقارنة بينها، مع التركيز بشكل خاص على التغليف بالخرسانة المسلحة. أما الجانب التطبيقي فيتعلق بنمذجة بناية باستخدام برنامج SAP2000 ، حيث تم إجراء تحليل push over لتقييم المقاومة الزلزالية قبل وبعد التدعيم. أظهرت النتائج فعالية تقنية التغليف في تحسين الأداء الإنشائي للمنشآت الخرسانية المسلحة.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة المسلحة، التغليف، إعادة التأهيل، تحليل push over ، SAP2000

INTRODUCTION GENERAL :

Avec le temps, les structures en béton armé peuvent subir des dégradations dues aux actions sismiques, à la corrosion des armatures, au vieillissement des matériaux, aux erreurs de conception, ou encore à l'augmentation des charges d'exploitation. Ces dégradations entraînent une réduction de la capacité portante et de la durabilité des ouvrages, le renforcement des éléments existants devient indispensable afin d'assurer leur sécurité et de prolonger leur durée de vie.

Parmi les différentes techniques de réhabilitation utilisées dans le domaine du génie civil, le chemisage constitue une solution efficace et largement adoptée pour le renforcement des structures en béton armé. Cette technique permet d'améliorer la résistance, la rigidité ainsi que la ductilité des éléments structuraux par l'ajout d'une nouvelle enveloppe autour de la section existante.

Le présent travail a pour objectif d'étudier la technique du chemisage en béton armé, en mettant en évidence ses principes fondamentaux, ses domaines d'application ainsi que son efficacité dans l'amélioration du comportement des structures existantes. Il comprend également une présentation des différentes techniques de chemisage, notamment le chemisage en béton armé, métallique et en matériaux composites, tout en établissant une comparaison entre elles afin de déterminer la solution la plus adaptée.

Une attention particulière est accordée au chemisage en béton armé à travers l'étude de son évolution historique, de ses principes de fonctionnement, de sa méthodologie de mise en œuvre ainsi que de son influence sur le comportement des structures renforcées.

Afin d'illustrer les aspects théoriques abordés, une étude appliquée sur une structure en béton armé a été réalisée dans le but d'évaluer l'efficacité du renforcement par chemisage et son impact sur les performances globales de la structure.

Dans la partie pratique, une modélisation de la structure a été effectuée à l'aide du logiciel SAP2000, suite à la transformation du bâtiment d'un usage d'habitation en local commercial, ce qui a entraîné une modification des charges et du comportement structural. Une vérification de la résistance sismique globale de la structure a ensuite été réalisée à travers l'analyse non linéaire par la méthode push over, permettant d'évaluer les performances de la structure avant et après renforcement.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre présente le renforcement des éléments en béton armé par chemisage, ainsi que les différentes techniques utilisées.
- Le deuxième chapitre est consacré au chemisage en béton armé, en détaillant son principe, sa méthodologie de mise en œuvre et ses domaines d'application.
- Le troisième chapitre traite de la méthodologie de vérification et de l'application du renforcement des structures en béton armé par chemisage, incluant la modélisation de la structure et la vérification de sa résistance sismique globale par la méthode push over.



Chapitre I :
Renforcement des éléments
En Beton arme par chemisage



Introduction :

Au cours de leur durée de vie, les structures en béton armé sont soumises à diverses sollicitations et agressions pouvant provoquer leur dégradation progressive, notamment les actions sismiques, la corrosion des armatures, le vieillissement des matériaux, ainsi que les modifications liées aux conditions d'exploitation. Ces altérations entraînent une diminution de la capacité portante et de la durabilité des ouvrages, ce qui nécessite la mise en place de solutions de renforcement adaptées afin d'assurer leur sécurité et leur pérennité. Dans ce contexte, le renforcement des éléments on a renforcement par chemisage, apparaît comme une solution technique efficace, permettant de restaurer les performances initiales des structures tout en prolongeant leur durée de vie.

Le chemisage consiste à appliquer une enveloppe protectrice destinée à améliorer l'étanchéité, la résistance mécanique et la protection contre la corrosion, sans recourir à des travaux lourds de reconstruction .Il est principalement utilisé dans les bâtiments existants ne répondant plus aux exigences des normes actuelles, dans les structures ayant subi des dommages suite à un séisme ou un incendie, ainsi que dans les ouvrages nécessitant une augmentation de leur capacité portante à la suite d'un changement d'usage. Cette technique peut être appliquée aussi bien dans le cadre d'une réparation locale que d'un renforcement global de la structure.

Plusieurs types de chemisage peuvent être distingués : Le chemisage en béton armé est la méthode la plus répandue en raison de son efficacité et de son coût relativement modéré, Le chemisage métallique utilisant des profilés ou des plaques en acier, permet une mise en œuvre rapide, mais nécessite une protection contre la corrosion, Le chemisage par matériaux composites, tels que les fibres de carbone (FRP), offre une solution légère et performante, bien que son coût reste élevé et son usage plus limité.

I.1 Le chemisage en Béton Armé :

I.1.1 Définition du chemisage en BA :

Le chemisage en béton armé est une technique de renforcement structurel qui consiste à augmenter la section transversale d'un élément porteur existant par l'ajout d'une enveloppe supplémentaire en béton armé, solidaire de l'élément initial. Cette méthode est largement utilisée dans la réhabilitation des structures anciennes, la réparation des éléments endommagés, ou encore dans le renforcement parasismique des bâtiments. Le principe fondamental repose sur la collaboration mécanique entre l'ancien et le nouveau béton, assurée par une liaison efficace grâce au scellement des armatures et à une adhérence contrôlée au niveau de l'interface. L'augmentation de la section permet d'améliorer la capacité portante, la rigidité globale, la résistance au cisaillement et à la flexion, ainsi que la ductilité de l'élément renforcé. Cette technique est particulièrement adaptée aux poteaux, poutres et voiles porteurs soumis à des sollicitations importantes ou présentant des déficiences structurelles [1].



Figure I.1: Chemisage en béton pour augmenter la section de poteau



Figure I.2 : Chemisage d'un poteau en Beton arme [16]

I.1.2 Objectifs mécaniques et fonctionnels :

L'objectif du chemisage est de remédier aux défauts de résistance ou de dégradation causés par le vieillissement, la corrosion des armatures ou les erreurs de conception. Ses objectifs principaux comprennent :

Objectifs mécaniques :

- Augmentation de la capacité portante : Il accroît la résistance à la compression et la résistance à la flexion.
- Amélioration de la ductilité : En confinant le béton ancien, on accroît la capacité de déformation de la structure, ce qui est essentiel pour la mise en conformité parasismique et la dissipation de l'énergie pendant un séisme.
- Augmentation de la rigidité : Il renforce la rigidité globale de l'élément, limitant ainsi les déplacements horizontaux de l'ouvrage.
- Amélioration de la résistance en flexion : Le chemisage en béton armé permet d'augmenter significativement la résistance en flexion des éléments structuraux en accroissant la section résistante et en ajoutant des armatures longitudinales supplémentaires.
- Amélioration de la résistance au cisaillement : Le chemisage contribue à améliorer la résistance au cisaillement grâce à l'ajout d'armatures transversales (étriers, cadres ou épingles) disposées autour ou à l'intérieur de l'élément renforcé.
- Amélioration du comportement sismique : Le chemisage en béton armé constitue une technique efficace pour améliorer le comportement sismique des structures existantes.

Il permet d'augmenter à la fois la résistance, la rigidité et la ductilité des éléments porteurs, réduisant ainsi le risque de rupture fragile lors d'un séisme. Le confinement accru des poteaux et l'amélioration des nœuds poutre-poteau favorisent un mécanisme de dissipation d'énergie plus stable et plus ductile. De plus, le chemisage contribue à corriger certaines insuffisances constructives des ouvrages anciens, conçus selon des règlements parasismiques obsolètes ou inexistantes.

Objectifs fonctionnels :

- Réparation structurelle : il permet de traiter les dommages causés par la fissuration ou la surcharge accidentelle.
- Mise en conformité des ouvrages existants : Le chemisage corrige les insuffisances constructives des structures anciennes conçues selon des règlements parasismiques obsolètes ou inexistantes.
- Problèmes de fondation : Cas où le tassement ou l'inclinaison de la structure dépasse les limites admissibles.
- Amélioration de la sécurité et de la durabilité : En réduisant les risques de rupture et de dégradations progressives, le chemisage contribue à prolonger la durée de vie de l'ouvrage et à assurer la sécurité des usagers [2].

I.1.3 Cas d'application du chemisage en BA :

Le chemisage en béton armé est une solution de renforcement polyvalente appliquée dans diverses situations critiques du génie civil pour restaurer ou accroître la sécurité des ouvrages. On a plusieurs cas d'application majeurs :

1. Réparation des dégradations et pathologies :

Le chemisage est utilisé pour remédier aux pathologies du béton armé résultant du vieillissement naturel des matériaux (le béton est de faible résistance, l'acier présente une corrosion avancée, et les matériaux naturels (sol, pierre, briques anciennes) ne respectent pas les normes), telles que la fissuration généralisée ou la corrosion des armatures. Il permet également de corriger des défauts d'exécution ou des erreurs de conception initiale qui compromettent la durabilité de l'ouvrage. Enfin, il est employé pour réparer des structures ayant subi des dommages.



Figure I.3 : Carbonatation du béton d'enrobage

2. Renforcement parasismique :

Dans les zones sismiques, cette technique est une solution de référence pour la mise en conformité parasismique des bâtiments anciens dont la résistance est jugée inadéquate face aux normes actuelles. Elle vise spécifiquement à :

- Augmenter la ductilité et la capacité de dissipation d'énergie des poteaux pour éviter les ruptures fragiles lors des secousses.
- Réparer les éléments structuraux (poteaux, poutres, nœuds...) endommagés après un séisme pour assurer la stabilité résiduelle du bâtiment.
- Renforcer les zones critiques (les nœuds poteau-poutre) où se forment les rotules plastiques, particulièrement au niveau du rez-de-chaussée.
- Améliorer la capacité globale au séisme : il permet de remettre l'ouvrage aux normes parasismiques.
- Mise en conformité avec les normes : Les réglementations et normes de construction évoluent au fil du temps, intégrant de nouvelles exigences en matière de sécurité et de résistance sismique. Face à ces mises à jour, il devient parfois indispensable de renforcer les poteaux existants afin de garantir leur conformité aux normes en vigueur [3].

3. Adaptation aux changements de charges :

Le chemisage est nécessaire lorsque les conditions d'exploitation d'un bâtiment évoluent, notamment dans les cas suivants :

- Un changement d'usage de l'ouvrage entraînant une augmentation significative des charges d'exploitation ou des surcharges permanentes.
- Des modifications structurales, comme la suppression de planchers pour créer des doubles niveaux, ce qui augmente l'élancement et la longueur de flambement des poteaux existants.
- Transformation.
- Augmentation du niveau de sécurité.

4. Réhabilitation d'ouvrages souterrains et galeries :

Pour les tunnels et les galeries hydrauliques, le chemisage est appliqué dans des contextes spécifiques :

- En cas de perte de force portante due à l'érosion ou à l'agressivité chimique des eaux transportées, comme dans les réseaux d'assainissement sous chaussée.
- Lorsque la structure est soumise à des charges extérieures nouvelles, telles que la mise en service d'une route ou le creusement d'un tunnel à proximité.
- Pour renforcer des voussoirs gravement endommagés situés en terrain aquifère, là où leur remplacement est techniquement impossible sous pression d'eau.
- Pour traiter la corrosion sévère dans des environnements industriels spécifiques, comme les puits de mine de sel ou de potasse [4].

5. Dégradation naturelle :

Il s'agit de l'usure progressive due au temps et aux conditions environnementales :

- Carbonatation du béton (très élevé) : le chemisage en béton armé apparaît comme une solution efficace de renforcement et de durabilité. Cette technique consiste à ajouter une nouvelle enveloppe en béton armé autour de l'élément dégradé, permettant à la fois de restaurer les performances mécaniques initiales et de créer un nouvel enrobage à PH élevé.



Figure I.4 : Dégradation des éléments d'un ouvrage par carbonatation

- Corrosion des armatures (très élevé) : le béton de chemisage agit également comme une barrière protectrice contre les agents agressifs, tout en augmentant la section résistante et la rigidité de l'élément, contribuant ainsi à restaurer la capacité portante et à prolonger la durée de vie de l'ouvrage.



Figure I.5 : Corrosion des armatures

- Infiltration d'eau (très élevé) : le béton de chemisage réduit la perméabilité de la structure, limite les infiltrations futures et protège les armatures contre l'action de l'eau, tout en améliorant les performances mécaniques et la durabilité globale de l'ouvrage.
- Réactions chimiques internes (ex. réaction alcali-granulat).



Figure I.6 : Corrosion par piqûres liées aux chlorures [5]

- Problèmes de fondation : cas où le tassement ou l'inclinaison de la structure dépasse les limites admissibles.

6. Bâtiments anciens ne répondant plus aux normes de calcul actuelles :

Par exemple, un bâtiment construit selon le RPA 2003, présentant un bon état structurel (absence de pathologies), nécessite une mise en conformité avec le RPA 2024.

I.1.4 Types de chemisage en béton armé :

Le chemisage en béton armé est une technique de renforcement qui consiste à ajouter une nouvelle enveloppe de béton armé autour des éléments existants, afin d'améliorer leur résistance, leur rigidité et leur ductilité. Il peut être réalisé sous deux formes : le chemisage total et le chemisage partiel [6].

I.1.4.1 Chemisage total (sur tout le périmètre) :

Le chemisage total est considéré comme la solution idéale pour le renforcement structural. Il consiste à envelopper l'élément (généralement un poteau) sur toute sa périphérie, avec une nouvelle couche de béton armé. Cette méthode est privilégiée pour :

- Assurer un confinement maximal du noyau de béton existant, ce qui améliore considérablement la ductilité et la résistance à la compression.
- Garantir un comportement monolithique optimal entre l'ancien et le nouveau béton.
- Traiter les cas de résistance sismique inadéquate ou de dommages structuraux graves.



Figure I.7 : chemisage en béton armé [7]

I.1.4.2 Chemisage partiel (une, deux ou trois faces) :

Lorsque les contraintes d'accès ou architecturales empêchent un enveloppement complet, un chemisage partiel peut être appliqué sur une ou plusieurs faces de l'élément. On le retrouve souvent pour le renforcement des poutres (souvent sur 3 faces) ou des poteaux intégrés dans des murs de remplissage.



Figure I.8 : Chemisage d'un poteau en Béton armé [8]

I.1.5 Application du chemisage en béton armé aux éléments structuraux :

Le chemisage en béton armé est utilisé pour réhabiliter ou améliorer la capacité portante. Il consiste à envelopper l'élément par une jaquette en béton armé, pour qu'il fonctionne comme un seul élément. Le chemisage peut être utilisé pour les éléments suivants :

I.1.5.1 Chemisage des poteaux :

Le renforcement des poteaux est l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour réhabiliter les structures en béton armé. Son objectif principal est d'augmenter la résistance axiale, la résistance au cisaillement, la rigidité, et la ductilité de l'élément renforcé. En termes de performance mécanique, cette approche permet de sécuriser de façon efficace le noyau de béton déjà présent, ce qui améliore le comportement du matériau face à des sollicitations statiques et dynamiques, en particulier lors de charges sismiques cycliques. Le chemisage est spécialement recommandé pour les poteaux qui ne sont pas résistants aux séismes ou qui présentent des pathologies structurelles telles que le flambement des armatures longitudinales ou la fissuration avancée du béton.

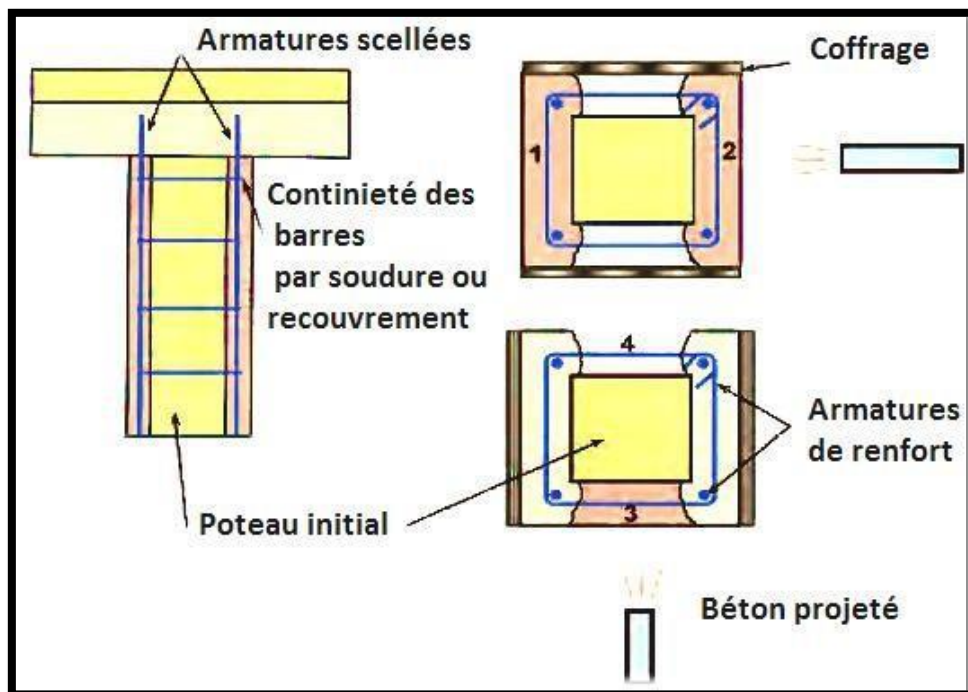
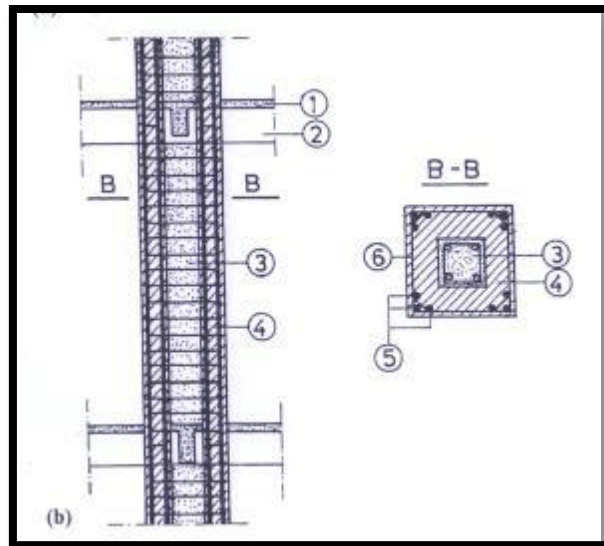


Figure I.9: Chemisage d'un poteau en Beton arme [16]



1 : plancher ,2 : poutre ,3 : ancien poteau, 4 : gaine en béton, 5 : barre longitudinale ajoutée, 6 : cadre ajouté.

Figure I.10: Chemisage d'un poteau en Beton arme [6]

I.1.5.2 Chemisage des poutres :

Le chemisage des poutres est une technique de renforcement destinée à restaurer ou à accroître la capacité de l'élément à résister aux moments de flexion ainsi qu'aux efforts de cisaillement. Cette méthode consiste à ajouter une enveloppe en béton armé, qui peut être réalisée sur une, trois ou quatre faces de la poutre existante, en fonction du niveau de renforcement requis et des contraintes géométriques du site [9].



Figure I.11: Chemisage d'une poutre en Beton arme [6]

I.1.5.3 Chemisage des murs porteurs :

Le chemisage des murs porteurs (ou voiles) est une technique de renforcement visant à améliorer la résistance aux forces latérales (séisme, vent) et à restaurer ou accroître la ductilité de la structure. Cette intervention est particulièrement préconisée lorsque les murs existants présentent une insuffisance de section, une mauvaise qualité de béton, ou pour transformer des portiques auto-stables en structures mixtes plus rigides.



Figure I.12: Chemisage sur voile [10]

I.1.5.4 Chemisage des fondations :

Le chemisage des fondations est une technique locale de renforcement. Son but est d'améliorer la capacité de charge et la stabilité des bases d'une construction, surtout lors de rénovations parasismiques. Cela permet d'agrandir la surface d'appui pour diminuer la pression sur le sol. On renforce aussi l'armature pour rendre la semelle plus rigide et résistante. Cela assure aussi une meilleure transmission des forces sismiques de la partie supérieure vers le sol [11].



Figure I.13: Renforcement de fondations existantes [9]

I.1.5.5 Chemisage des dalles :

Le chemisage des dalles permet de renforcer les planchers anciens en augmentant leur capacité portante, rigidité, et transmission des efforts sismiques. Il peut être réalisé par le dessus (nouvelle dalle monolithique) ou par le dessous (béton projeté), en assurant un comportement monolithique grâce à la préparation du support, l'adhérence par résine, et, si nécessaire, des connecteurs mécaniques. Le dimensionnement du nouveau béton reprend les efforts internes critiques [9].



Figure I.14 : Renforcement de plancher par béton armé [9]

I.1.6 Avantages du chemisage en béton armé :

Le chemisage en béton armé présente de nombreux avantages qui expliquent sa large utilisation dans les projets de renforcement structurel [11]:

- Technique économiquement rentable et largement maîtrisée par les ingénieurs et les entreprises de construction.
- Augmentation significative de la rigidité et de la capacité portante des éléments structurels.
- Amélioration du moment résistant en flexion, de la résistance au cisaillement et de la capacité de confinement du béton grâce aux armatures transversales.
- Amélioration de la ductilité et de la capacité de dissipation d'énergie en zones sismiques.
- Le béton est un matériau polyvalent, capable de s'adapter à presque toutes les formes géométriques.
- Le béton est un matériau résistant en compression (20 à 40 MPa) mais faible en traction, avec un module d'élasticité de 25 à 35 GPa.

I.1.7 Inconvénients et limites :

Malgré ses nombreux avantages, le chemisage en béton armé présente certaines limitations [11] :

- L'augmentation des dimensions des éléments peut réduire l'espace utile à l'intérieur des bâtiments.
- Le poids propre de la structure augmente également, ce qui peut nécessiter un renforcement des fondations existantes.
- Les travaux sont généralement longs et génèrent des nuisances importantes telles que la poussière, le bruit et les débris.
- La qualité du résultat dépend fortement de la rigueur de la préparation du support et du respect des procédures techniques.
- Une mauvaise adhérence ou un scellement inadéquat peut compromettre l'efficacité du renforcement.

I.1.8 La réglementation du chemisage en BA (Algérie) :

Le chemisage en béton armé, en tant que technique de renforcement des structures existantes, doit être réalisé conformément aux textes réglementaires en vigueur en Algérie. Ces documents définissent les règles de conception, de calcul, de vérification parasismique ainsi que les exigences relatives aux travaux de réparation et de réhabilitation. Ils imposent notamment le respect des dispositions constructives, des critères de ductilité, des longueurs d'ancrage des armatures et des conditions garantissant la collaboration entre l'ancien et le nouveau béton. Le tableau ci-après présente les principaux textes réglementaires algériens encadrant la mise en œuvre du chemisage en béton armé, notamment le RPA 2024, le DTR-BE 2.1 (Règles de conception et de calcul des structures en béton armé) ainsi que l'Arrêté Ministériel 309/91 relatif aux recommandations techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages.

Texte réglementaire	Domaine d'application	Exigences liées au chemisage	Rôle dans le renforcement
RPA 2024	Conception et vérification parasismique des structures.	- Respect des exigences de ductilité. - Confinement des poteaux. - Détails des armatures transversales. - Vérification sismique après intervention	Assure la conformité parasismique de l'élément renforcé.
DTR-BE 2.1	Dimensionnement des structures en béton armé	- Vérifications aux ELU et ELS - Calcul en compression, flexion et cisaillement - Longueurs d'ancrage - Dispositions constructives	Base de calcul de la nouvelle section chemisée.
Arrêté Ministériel 309/91	Réparation et renforcement des ouvrages.	- Préparation du support - Liaison ancien/nouveau béton. - Conditions d'exécution - Contrôle qualité.	Encadre techniquement les travaux de chemisage.

Tableau I.1 : Réglementation algérienne applicable au chemisage en béton armé [12] , [13] et [14]

I.2 Le chemisage métallique :

I.2.1 Définition de chemisage métallique :

Le chemisage métallique, également appelé gainage par chemise en acier, constitue une technique avancée de renforcement des éléments structuraux en béton armé, principalement utilisée pour les poteaux et les poutres soumis à une perte de capacité portante due à la dégradation, à une surcharge, ou à des sollicitations sismiques. Cette méthode consiste à entourer l'élément existant par une enveloppe métallique formée de profils en acier tels que des tubes, des cornières, des plats ou des grilles soudées, fixés mécaniquement ou chimiquement autour de la section en béton. Contrairement au chemisage en béton armé, le chemisage métallique se distingue par sa légèreté, sa rapidité d'exécution et son caractère partiellement réversible, ce qui le rend particulièrement adapté aux bâtiments en exploitation ou aux structures nécessitant une intervention rapide [7].

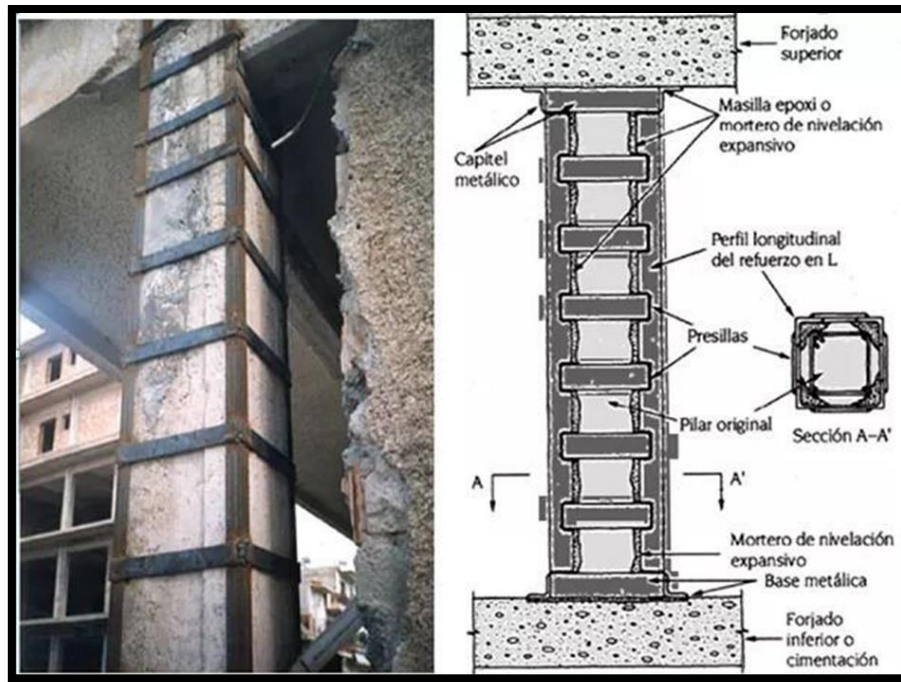


Figure I.15 : Chemisage métallique des poteaux



Figure I.16 : Renforcement d'une structure par chemisage en acier [8]

I.2.2 Objectifs Mécaniques et Fonctionnels :

L'objectif principal est d'améliorer la résistance en compression, d'augmenter la ductilité et de renforcer la capacité de dissipation d'énergie de l'élément [2].

Objectifs Mécaniques :

- Confinement : Il assure un confinement du noyau de béton, empêchant l'éclatement du béton d'enrobage et augmentant la capacité de déformation.

- Ductilité : Il augmente significativement la ductilité de l'élément, ce qui est crucial pour la résistance aux séismes.
- Résistance au cisaillement : Il améliore la résistance aux efforts tranchants, transformant souvent une rupture fragile potentielle en une rupture ductile.
- Capacité de charge : Il rehausse la capacité de charge axiale et ultime de la structure.

Objectifs Fonctionnels :

- Rapidité : c'est une technique rapide à mettre en œuvre, souvent privilégiée pour des renforcements d'urgence après un séisme.
- Encombrement réduit : contrairement au chemisage en béton, il entraîne une faible augmentation des sections transversales, préservant l'espace utilisable.

I.2.3 Cas d'Application :

Le chemisage métallique est utilisé dans les situations suivantes :

1. Renforcement et Réhabilitation des Bâtiments et Ponts :

Cette méthode est principalement utilisée pour les poteaux en béton armé afin d'améliorer leur performance sismique, leur résistance, et leur ductilité dans les cas suivants :

- Réparation après sinistre : Restauration de la force et de la ductilité d'éléments endommagés par des séismes, des incendies, des explosions ou des collisions.
- Renforcement préventif : Intervention sur des structures anciennes dont la capacité est dégradée par le vieillissement, la corrosion des armatures ou la détérioration du béton.
- Mise aux normes sismiques : Mise à niveau de bâtiments conçus avant l'intégration des directives de détails sismiques.
- Modification de la structure ou de l'usage :
 - Ajout d'étages supplémentaires impliquant une augmentation des charges.
 - Changement d'usage du bâtiment.
- Correction d'erreurs : Rectification de défauts de conception, d'erreurs de calcul ou de malfaçons durant la construction.
- Problèmes de fondation : Cas où le tassement ou l'inclinaison de la structure dépasse les limites admissibles.

2. Réhabilitation d'Infrastructures Hydrauliques :

Le chemisage prend ici la forme de tubages métalliques pour la restauration de buses ou collecteurs existants.

- Consolidation structurelle : Utilisé lorsque les buses présentent des déformations critiques comme l'inversion de courbure ou l'aplatissement.
- Rétablissement de l'étanchéité : Cas de perforation du radier ou de corrosion feuilletante importante.
- Maintien des capacités : Permet de prolonger la vie de l'ouvrage sans démolition, tout en préservant le débit hydraulique.

3. Tuyauterie Industrielle et Systèmes d'isolation :

Le chemisage métallique est également employé comme protection externe pour les tuyaux isolés. Pour :

- Installations extérieures : Protection des tuyaux situés sur les toits ou dans les zones de processus contre les intempéries.

- Protection mécanique : En intérieur, pour offrir une meilleure résistance aux dommages physiques (chocs, écrasement).
- Sécurité incendie : Amélioration de la résistance au feu des systèmes de tuyauterie.

I.2.4 Type de chemisage métallique :

Le chemisage métallique constitue une méthode de renforcement des éléments en béton armé, visant à améliorer la rigidité, la résistance et la ductilité des poteaux ou colonnes existants, par confinement mécanique ou adhérence de profilés métalliques, selon le type d'ouvrage et les contraintes spécifiques. Le chemisage métallique peut être classé en trois types principaux selon la zone d'intervention sur l'élément en béton armé :

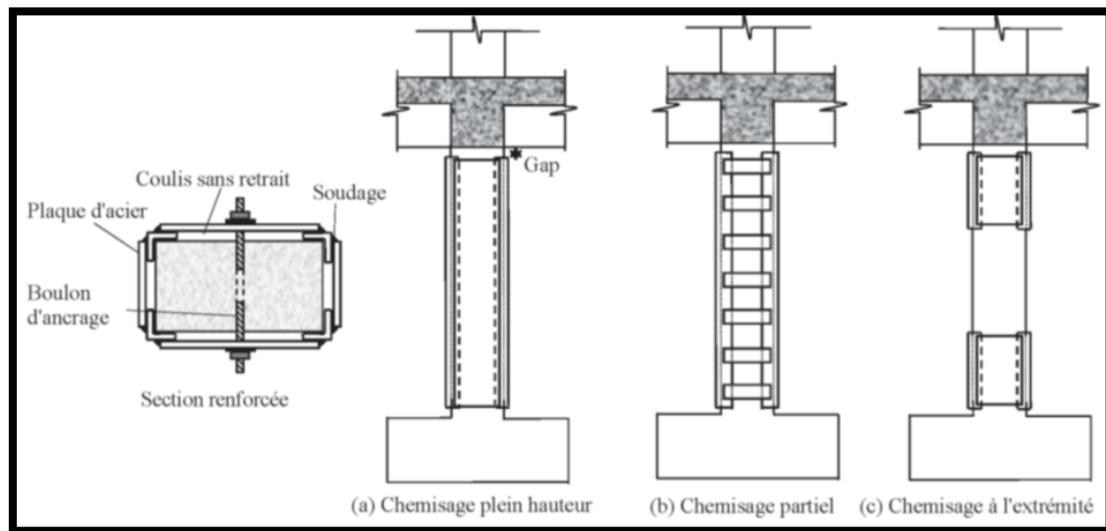


Figure I.17: Différentes configurations de chemisage en acier appliquées aux poteaux [15]

1. Chemisage plein hauteur :

Ce type consiste à envelopper l'élément (généralement un poteau) sur toute sa hauteur à l'aide de dispositifs métalliques tels que cornières, liernes ou tôles continues. Il assure un confinement global, permettant d'augmenter la résistance, la rigidité et la ductilité de l'élément. Ce procédé est recommandé lorsque toute la structure présente des insuffisances ou des dégradations importantes.

2. Chemisage partiel :

Le chemisage partiel concerne uniquement une zone spécifique du poteau, là où les contraintes sont les plus importantes (zone fissurée ou sollicitée). Il peut être réalisé à l'aide de plats métalliques, profilés ou systèmes de moilage. Cette solution permet un renforcement ciblé tout en réduisant le coût et le temps d'intervention.

3. Chemisage à l'extrémité :

Ce type est appliqué au niveau des extrémités des éléments (pieds ou têtes de poteaux), où se concentrent généralement les efforts (efforts tranchants ou moments). Le renforcement est localisé et vise à améliorer la résistance aux zones critiques, notamment en cas de risque de rupture ou de défaillance locale.

I.2.5 Avantages du chemisage métallique :

Le chemisage métallique présente plusieurs avantages techniques et fonctionnels :

- Légèreté du matériau, permettant d'éviter une augmentation significative des charges permanentes sur la structure, contrairement au chemisage en béton.
- Faible épaisseur du renforcement, assurant un gain d'espace appréciable, notamment dans les bâtiments existants soumis à des contraintes architecturales importantes.
- Rapidité d'exécution, limitant l'interruption des activités dans les bâtiments en service.
- Ductilité élevée de l'acier, améliorant considérablement la capacité de dissipation d'énergie et renforçant la sécurité globale de la structure en cas de séisme [2].
- L'acier est un matériau très résistant et ductile, avec un module d'élasticité d'environ 200 GPa et une résistance à la traction de 400 à 600 MPa.
- Le chemisage métallique peut être utilisé pour un étage grâce à sa légèreté, alors que le chemisage en béton armé est préférable pour les niveaux bas en raison de sa rigidité et de sa capacité à reprendre des charges importantes.

I.2.6 Inconvénients et limites :

Malgré ses performances élevées, le chemisage métallique présente certains inconvénients :

- Coût généralement plus élevé que celui du chemisage en béton armé, pouvant atteindre deux à trois fois le prix selon la complexité de l'intervention [16].
- Risque de corrosion élevé, nécessitant l'application de protections anticorrosion adaptées [16].
- Diminution significative de la résistance à haute température, notamment au-delà de 400 °C, imposant parfois des mesures de protection incendie supplémentaires.
- Rentabilité réduite pour les éléments de grande section, rendant cette technique moins économique que le chemisage en béton dans certains cas [11].

I.2.7 Comparaison entre le chemisage métallique et le chemisage en béton armé :

Le tableau suivant synthétise les principaux critères de comparaison où le choix entre le chemisage métallique et le chemisage en béton armé dépend de plusieurs paramètres structurels et économiques :

	Chemisage métallique	Chemisage en béton armé
Épaisseur / finesse	Très fin	Plus épaisseur
Rapidité d'exécution	Rapide	Plus lente
Gain de portance	Élevé : 50 à 100 %	Modéré à élevé : 30 à 80 %
Ductilité sismique	Très bonne	Bonne
Résistance au feu	Faible→ nécessite protection	Bonne
Coût pour grandes sections	Plus élevé	Plus économique
Adaptation architecturale	Très favorable	Moyenne
Domaines d'application	Projets nécessitant rapidité, finesse et gain d'espace	Éléments massifs, grandes sections
Critère de choix	Contraintes architecturales et sismiques	Contraintes économiques et résistance au feu

Tableau I.2: Comparaison entre le chemisage métallique et le chemisage en béton armé

I.3 Chemisage en fibre de carbone :

I.3.1 Définition du chemisage en FRP :

Le chemisage en polymères renforcés de fibres (FRP) est une technique moderne de renforcement et de réparation structurale qui consiste à envelopper un élément de structure existant (poteau, poutre ou nœud) avec des tissus, des bandes ou des feuilles de fibres de haute résistance. La fabrication commence par la dissolution du polymère dans un solvant, suivie de l'écoulement de cette solution dans une filière afin de former une fibre coagulée. Cette fibre subit ensuite un processus de carbonisation sous atmosphère d'azote dans des fours de pyrolyse. Pendant cette étape, les atomes d'hydrogène, d'azote et d'oxygène sont successivement éliminés sous forme de produits volatils, ne laissant que les atomes de carbone. Cette opération permet d'obtenir une fibre à structure graphite, caractérisée par sa haute rigidité et sa résistance à la traction. Cependant, cette technique de production est coûteuse, en raison de la forte dépense énergétique et des pertes de matière : il faut en moyenne 1,8 kg de PAN pour produire 1 kg de fibre de carbone. Le diamètre moyen des filaments obtenus est compris entre 6 et 7 microns, ce qui contribue à leur grande finesse et à la possibilité de les assembler en tissus ou en nappes pour les applications composites [17].

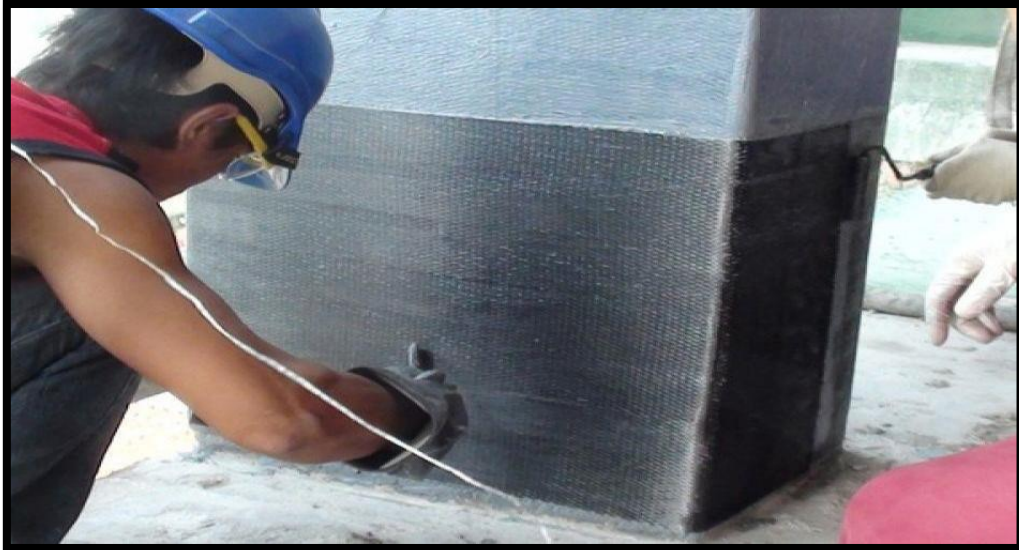


Figure I.18: Chemisage en fibre d'un poteau [11]



Figure I.19: Chemisage en fibre de carbone [8]

I.3.2 Objectifs mécaniques et fonctionnels :

Le renforcement par matériaux composites à fibres (FRP) modifie le comportement interne des éléments en béton armé afin de corriger diverses déficiences structurelles. Grâce à leurs propriétés mécaniques élevées, notamment une grande résistance à la traction et un faible poids propre, les FRP permettent d'améliorer la capacité portante, la ductilité et la durabilité des structures sans augmentation significative de la section ou de la masse.

Objectifs Mécaniques :

- Augmentation de la capacité portante : L'objectif premier est d'accroître la résistance à la flexion, au cisaillement et à la compression.

- Confinement et ductilité : En enveloppant l'élément, le FRP exerce une pression de confinement sur le béton, ce qui augmente considérablement sa ductilité et sa capacité de déformation inélastique sans perte de résistance.
- Dissipation d'énergie : Cette technique améliore la capacité de la structure à absorber et à dissiper l'énergie sismique, transformant ainsi un mode de rupture fragile en un comportement ductile.
- Amélioration de la rigidité : Le collage de tissus en fibre de carbone permet d'augmenter la rigidité et la fermeté des sections traitées [16].

Objectifs Fonctionnels :

- Préservation de l'esthétique et de l'espace : Grâce à son encombrement minimal (augmentation de seulement 4 à 6 mm de la section), le FRP permet de conserver l'architecture originale et de ne pas réduire la surface utile des pièces.
- Durabilité et protection : Les matériaux composites offrent une haute résistance à la corrosion et aux agressions chimiques, protégeant ainsi durablement les armatures existantes contre la dégradation environnementale.
- Rapidité et continuité d'exploitation : Sa mise en œuvre légère et rapide permet de limiter les interruptions d'activité dans le bâtiment et de réduire les nuisances pour les occupants par rapport à des travaux lourds de génie civil.
- Propriétés physiques spécifiques : Le matériau possède des caractéristiques avantageuses telles qu'un excellent rapport résistance/poids et une neutralité électromagnétique.
- Viabilité économique : Bien que le coût du matériau soit élevé, le FRP représente une alternative économiquement viable à la démolition-reconstruction en prolongeant la durée de vie utile des structures existantes [6].

I.3.3 Cas d'application du chemisage :

Le chemisage FRP est utilisé pour renforcer et réparer les poteaux, poutres, dalles et voiles en béton armé. Il corrige les défauts de conception, répare les dommages liés à la corrosion ou aux séismes, et augmente la capacité portante, tout en étant léger, rapide à poser et compatible avec les contraintes architecturales.

1. Renforcement des poteaux (colonnes) :

- Insuffisances de conception : Il est appliqué aux poteaux présentant des dimensions insuffisantes, une mauvaise qualité de béton ou un manque d'armatures transversales.
- Poteaux courts : Le chemisage FRP est une solution pour pallier la vulnérabilité des poteaux courts, qui subissent des efforts de cisaillement élevés.

2. Applications aux poutres et aux dalles :

- Renforcement à la flexion : Des lamelles ou tissus sont collés sur la face tendue de la poutre, pour augmenter sa capacité à supporter les moments fléchissant.
- Renforcement au cisaillement : L'application de bandes verticales (en forme de U ou enveloppement total) augmente la résistance aux efforts tranchants.
- Augmentation de charges : Ce chemisage est préconisé lors d'un changement d'usage du bâtiment, imposant des charges d'exploitation supérieures aux capacités initiales.

3. Renforcement des nœuds et des voiles :

- Nœuds poteaux-poutres : Des tissus sont appliqués pour renforcer la résistance au cisaillement des jonctions, zones critiques lors d'un séisme.



Figure I.20: Renforcement des nœuds par chemisage en FRP [17]

- Voiles de contreventement : Le FRP peut être appliqué sur toute la surface ou en bandes, pour restaurer la capacité portante d'un voile affaibli, par la création d'une nouvelle ouverture ou par des défauts de construction.

4. Réparation d'éléments endommagés :

Le FRP est utilisé pour traiter diverses pathologies sans alourdir la structure:

- Corrosion des armatures : Il permet de compenser la perte de section des aciers due à l'oxydation, en apportant une résistance externe supplémentaire.
- Dommages post-sismiques ou incendies : Il est employé pour réparer les structures ayant subi des fissurations, un éclatement du béton ou une perte de service après un événement accidentel.
- Éclatement : Après retrait des parties dégradées, le FRP stabilise l'élément et prévient le développement de nouvelles fissures de fendage.

5. Cas spécifiques et contraintes architecturales :

- Préservation de l'esthétique : En raison de sa faible épaisseur (augmentation de la section de seulement 4 à 6 mm), le FRP est privilégié lorsque l'aspect architectural original doit être maintenu.
- Intervention en milieu occupé : Sa mise en œuvre rapide et légère permet de renforcer des structures sans interrompre l'exploitation du bâtiment, contrairement au chemisage en béton, qui impose des travaux lourds (nuisances sonores, poussière).
- Milieux agressifs : Grâce à sa résistance à la corrosion et aux agressions chimiques, le chemisage FRP est adapté aux environnements sévères.

I.3.4 Les propriétés de la fibre de carbone :

La fibre de carbone se distingue par un ensemble de propriétés physiques et mécaniques remarquables. Elle présente une densité très faible, généralement comprise entre 1,7 et 1,9, tout en offrant des résistances à la traction et à la compression très élevées. Sa microstructure, constituée de feuillets de graphène organisés, lui confère une excellente conductivité électrique et thermique, ainsi qu'une inertie chimique élevée et une résistance exceptionnelle aux hautes températures. Rapportées à la masse, ses performances mécaniques surpassent largement celles des matériaux métalliques conventionnels, ce qui permet la conception de structures à la fois légères, performantes et durables. [18]. Le FRP est un matériau léger avec une densité de 1,5 à

2 g/cm³, un module d'élasticité de 150 à 300 GPa et une résistance à la traction pouvant dépasser 2000 MPa, ce qui le rend très efficace pour le renforcement des structures .

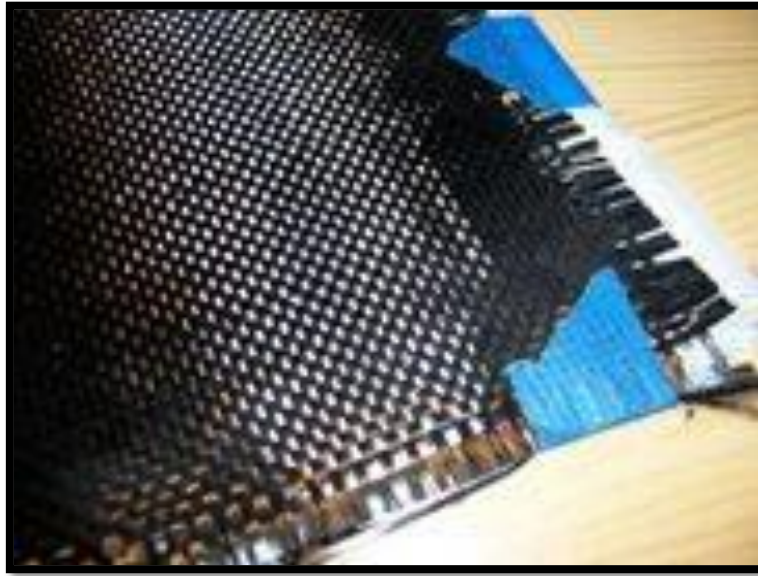


Figure I.21: Fibre de carbone tissé [19]

I.3.5 Avantages de la fibre de carbone :

Les fibres de carbone présentent de nombreux avantages qui expliquent leur large utilisation dans les composites hautes performances [18] :

- Gain de poids considérable pour une résistance équivalente ou supérieure aux pièces métalliques.
- Rigidité et stabilité dimensionnelle accrues.
- Durabilité et résistance à la corrosion supérieures.
- Isolation et dissipation thermiques efficaces.
- Une résistance à la traction et un module d'élasticité supérieurs à ceux de nombreux autres matériaux composites.
- Dilatation thermique quasi nulle, limitant les déformations dues aux variations de température.
- Bonne tenue à l'humidité.
- Usinabilité aisée, facilitant la fabrication et la mise en œuvre des formes complexes.
- Faible densité (< 2), permettant de réaliser des structures légères sans sacrifier la performance mécanique.

I.3.6 Inconvénients de la fibre de carbone :

Malgré leurs performances exceptionnelles, les fibres de carbone présentent certains inconvénients techniques et économiques [18] :

- Coût élevé des fibres et de la mise en œuvre.
- Sensibilité à l'abrasion et aux chocs.
- Problématiques de fin de vie et de recyclage.
- Ces fibres sont fragiles et cassantes.
- Leur comportement chimique peut être défavorable dans certains milieux agressifs.
- Le FRP reste moins utilisé par certains ingénieurs, car cette technique est encore peu maîtrisée et moins répandue dans la pratique locale.

I.4 Comparaison des techniques de chemisage : Béton armé, Métallique et Fibres de carbone :

Le chemisage en béton armé, le chemisage métallique et le chemisage par fibres de carbone constituent trois techniques complémentaires de renforcement structural. Le chemisage en béton armé est la méthode la plus courante et la plus économique. Le chemisage métallique, plus léger et rapide à installer, offre une excellente ductilité sismique et une forte augmentation de la résistance ; toutefois, son coût est élevé et il nécessite une protection contre la corrosion ainsi qu'une main-d'œuvre qualifiée. Enfin, le chemisage par fibres de carbone se distingue par sa très grande légèreté, sa rapidité d'exécution, son faible encombrement et ses hautes performances mécaniques et sismiques, mais son coût élevé et la sensibilité des matériaux aux chocs.

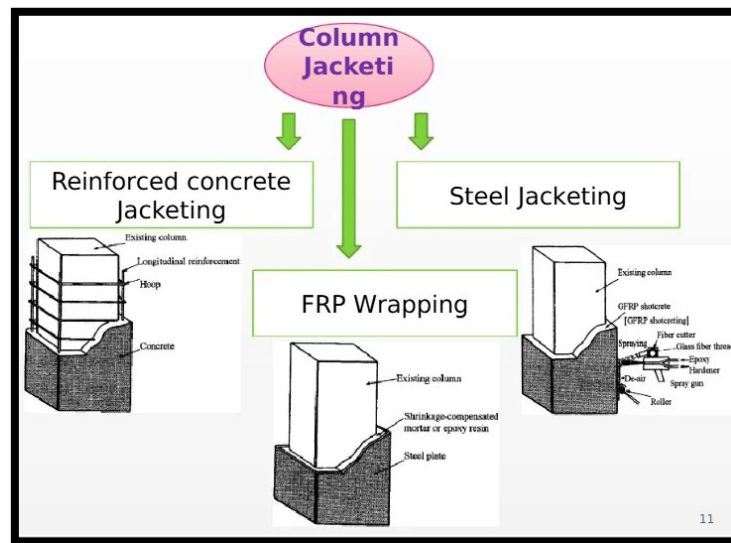


Figure I.22: chemisage en BA, Métallique, FRP

Un tableau récapitulatif permet de synthétiser et de comparer ces différentes techniques :

Critère	Chemisage en BA	Chemisage en Métallique	Chemisage FRP
Ductilité sismique	Bonne	Excellente	Excellente
Épaisseur ajoutée	15-30 cm	5-15 cm	2-5 mm
Poids additionnel	Élevé	Moyen	Très faible
Coût relatif	Moyen	Élevé	Très élevé
Rapidité du chantier	7-14 jours	1-3 jours	1-2 jours
Sensibilité à l'environnement	Faible, bonne résistance chimique	Corrosion possible sans protection	Bonne résistance chimique
Complexité de mise en œuvre	Moyenne (coffrage et cure)	Moyenne à élevée (soudure, scellement)	Élevée (préparation surface, collage résine)
Adaptation à l'espace	Perd beaucoup d'espace	Compact	Très compact, gain d'espace
Durabilité	Longue	Moyenne à longue selon protection	Longue si protection Résine correcte

Tableau I.3: Comparaison des techniques de chemisage : BA, Métallique et FRP .

Cette comparaison montre clairement que :

- Le béton armé est économique et familier mais encombrant et lourd.
- Le métallique offre une excellente ductilité et confinement mais coûteux et sensible à la corrosion.
- Les fibres de carbone offrent la meilleure performance, légèreté et gain d'espace, mais à un coût très élevé et nécessitent une mise en œuvre soignée.

I.5 Choix du type de chemisage adapté :

Le choix du type de chemisage adapté pour un élément structural (poteau, poutre ou voile) dépend d'une analyse multicritère intégrant l'état de dégradation, les objectifs de performance mécanique, les contraintes architecturales et les facteurs économiques [16], les principaux types de chemisage et leurs critères d'adéquation sont les suivants :

I.5.1 Chemisage en béton armé (Enrobage classique) :

C'est la technique la plus courante et la plus polyvalente pour la réhabilitation sismique.

- Adéquation : Elle est privilégiée en cas de dommages sérieux ou d'insuffisance structurelle majeure. Elle convient parfaitement pour augmenter simultanément la portance, la résistance à la flexion, au cisaillement et la ductilité [1].
- Contraintes : Son choix doit être validé par un calcul de structure, car il entraîne une augmentation importante de la masse morte et de la rigidité, pouvant nécessiter un redimensionnement des fondations [16].

I.5.2 Chemisage métallique :

Consiste à entourer l'élément de cornières et de plaques d'acier soudées ou collées.

- Adéquation : Idéal pour un renforcement de confinement et de cisaillement sans augmenter considérablement la section transversale. C'est souvent la technique choisie pour des renforcements d'urgence après un séisme pour éviter l'effondrement [16].
- Inconvénients : Elle nécessite une main-d'œuvre qualifiée pour les soudures Et un entretien régulier contre la corrosion [16].

I.5.3 Chemisage par matériaux composites (PRF / Carbone) :

Utilise des tissus ou lamelles de polymères renforcés de fibres (principalement de carbone) collés à la résine époxy.

- Adéquation : C'est la solution la plus adaptée lorsque la rapidité de mise en œuvre et la légèreté sont prioritaires. Elle offre un excellent confinement et améliore la ductilité sans modifier l'apparence esthétique ou la masse du bâtiment [11].
- Critère de choix : Bien que les matériaux soient plus coûteux, le coût Global peut être compétitif car cette méthode évite souvent les reprises en sous-œuvre (fondations) [6].

I.5.4 Cas spécifiques et variantes :

- Chemisage par béton projeté : Recommandé pour des chemisages minces adhérents ou des réparations de grandes surfaces nécessitant une mise en œuvre rapide.
- Chemisage en BTHP (Béton à Très Hautes Performances) : Choisi pour améliorer le comportement de poteaux subissant des ruptures fragiles par perte d'ancrage, bien qu'il augmente aussi la masse de l'élément.

- Chemisage partiel (une ou deux faces) : Utilisé pour les poteaux de façade ou lorsque l'accès à toutes les faces est impossible, bien que moins efficace que le chemisage périphérique complet.

Le choix définitif de la technique de renforcement repose sur l'analyse combinée de quatre paramètres essentiels [16]:

- Pertinence technique : Capacité du procédé à corriger les défauts identifiés (ex : rigidité vs ductilité).
- Disponibilité : Matériaux et entreprises locales qualifiées.
- Perturbation : Impact sur l'exploitation du bâtiment (poussière, bruit, espace réduit).
- Coût global : Ratio entre l'investissement et la durée de vie prolongée de l'ouvrage.

Conclusion :

Ce chapitre a permis de présenter de manière détaillée les différentes techniques de chemisage appliquées au renforcement des structures en béton armé, en mettant en évidence leurs principes de fonctionnement, leurs objectifs mécaniques et fonctionnels, ainsi que leurs domaines d'application. L'analyse comparative entre le chemisage en béton armé, le chemisage métallique et le chemisage par matériaux composites à base de fibres de carbone a montré que chacune de ces méthodes répond à des besoins spécifiques, selon les contraintes structurelles, architecturales, économiques et réglementaires du projet.

Le chemisage en béton armé demeure la solution la plus couramment employée en raison de sa fiabilité, de sa compatibilité avec les structures existantes et de son coût relativement modéré. Le chemisage métallique se distingue par sa rapidité d'exécution, sa forte capacité de confinement et son excellente performance sismique, bien que son coût et sa sensibilité à la corrosion en limitent l'usage. Quant au chemisage par fibres de carbone, il offre des performances mécaniques remarquables, une grande légèreté et un faible encombrement, ce qui en fait une solution privilégiée dans les contextes nécessitant un gain d'espace et une intervention rapide, malgré son coût élevé et sa mise en œuvre délicate.

Ainsi, le choix de la technique de renforcement la plus appropriée doit reposer sur une évaluation rigoureuse de l'état initial de la structure, des exigences de sécurité, notamment parasismiques, ainsi que des contraintes économiques et d'exploitation. Cette démarche intégrée permet d'optimiser la stratégie de renforcement et d'assurer une amélioration durable des performances structurelles. Les notions développées dans ce chapitre constituent une base théorique essentielle pour l'analyse, le dimensionnement et la mise en œuvre des solutions de renforcement présentées dans les chapitres suivants.



Chapitre II :
Chemisage en Béton armé



Introduction :

Le chemisage en béton armé constitue l'une des techniques les plus utilisées pour le renforcement des structures existantes. Cette méthode consiste à augmenter la section des éléments structuraux afin d'améliorer leur capacité portante, leur rigidité et leur ductilité.

Le renforcement des structures en béton armé est devenu une nécessité pour améliorer la capacité portante et assurer la sécurité des ouvrages existants. Parmi les différentes techniques utilisées, le chemisage en béton armé est l'une des solutions les plus efficaces pour renforcer les éléments structuraux, notamment les poteaux.

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord l'historique du chemisage en béton armé, puis son principe de fonctionnement. Ensuite, nous abordons la méthodologie et les techniques de mise en œuvre. Enfin, une analyse de la structure renforcée par chemisage en béton armé sera présentée afin d'évaluer l'influence de cette technique sur le comportement structural.

II.1 Historique de Chemisage :

Le chemisage est une technique de renforcement des éléments structurelles (poteaux, poutres...etc.), visant à augmenter la capacité portante, ductilité et la stabilité de la structure par l'enveloppe de ces dernières avec mix de ferrailage calculer déjà et béton autour des colonnes ou poutres existantes pour améliorer leur résistance aux charges verticales et latérales. Afin de mieux comprendre l'évolution et l'importance de cette technique dans le domaine du renforcement des structures, il est utile de revenir sur ses origines et ses premières applications.

II.1.1 Origines et premières applications (avant 1970) :

Avant les années 1970, les structures en béton armé étaient généralement se basait sur la résistance aux charges gravitaires, les charges sismiques ne prend pas en considération par rapport les règlements traditionnels. Donc les travaux de renforcement sont limite, concentré surtout la réparation des colonnes endommagées par des fissures, humidité ou des surcharges n'est pas calculé. Ces techniques étaient appliquées dans les pays industrialisés et développés comme les États-Unis et l'Europe.

Les premières études et expériences sur le renforcement débuté dans les années 1970. Ces études expérimentales et les recherches sur cette technique ont été initiés par PAULAY et PARK 1975, puis TASSIOS dans les années 80, ces études premières ont introduit le principe de renforcer les éléments endommagés par augmenter leur section et ajoute des plaques métalliques, elles ont ainsi préparé le développement des méthodes modernes de chemisage à partir les années 1970–1985. Cette période marque le passage des réparations ponctuelles à une approche plus systématique du renforcement des structures en béton armé, notamment par des techniques telles que le chemisage et le placage d'acier.

II.1.2 Adoption et Développement après les normes sismiques (1970–1985) :

A partir les années 1970, l'adoption des codes sismiques et normes plus stricts dans plusieurs pays a transformé l'approche de conception des structures en béton armé. Elle également révélé les faiblesses des bâtiments existants qui construit selon des règlements anciens. Les éléments porteurs verticaux et colonnes, initialement dimensionner pour résister aux charges gravitaires et insuffisamment résistants aux efforts horizontaux générés par le

séisme, ce qui a conduit au développement de technique de renforcement. La technique de chemisage fondée sur l'augmentation de la section et intégrée des armatures supplémentaires, s'est progressivement imposée comme solution efficace. Cette période a été marquée par plusieurs événements sismiques, qui ont influencé l'adoption de cette technique qui a commencé à être appliquée avec des normes parasismique plus strict, afin d'améliorer la résistance des bâtiments existants [20].

II.1.2.1 Les séismes plus influencée :

Séisme de San Fernando (Californie, 1971) : a démontré la vulnérabilité des structures en béton armé anciennes et la nécessité de la renforcer Dégâts majeurs [21]:

- Hôpitaux : Effondrement spectaculaire de l'hôpital des vétérans (San Fernando Veterans Hospital) et de l'hôpital Olive View.
- Infrastructures : Destruction de plusieurs échangeurs d'autoroutes (I-5 et I-210).
- Barrages : Le barrage inférieur de Van Norman a failli céder, menaçant de libérer des milliards de litres d'eau, ce qui a forcé l'évacuation de 80 000 personnes.



Figure II.1 : Dommages à l'Olive View Médical Center (9 février 1971) [22]



Figure II.2 : Un support en acier armé du passage supérieur des autoroutes a été endommagé lors du San Fernando en 1971 [23]

Séisme de Frioul (Italie, 1976) : a exigé d'utiliser le chemisage pour plusieurs bâtiments [24]. En effet, l'ampleur des dégâts observés après ce séisme a mis en évidence la nécessité de recourir à des techniques efficaces de réparation et de renforcement des structures.

- Dommages matériels : presque tous les villages ont été fortement endommagés
- Effets géomorphologiques : séisme provoque des glissements de terrain, des chutes de rochers et la réactivation de coulées de débris, modifiant le paysage montagneux.

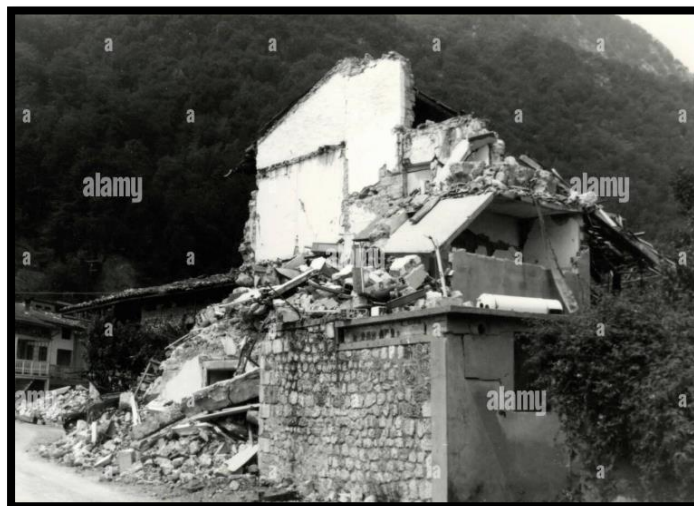


Figure II.3 : Dégâts causés à un bâtiment par le tremblement de terre du Frioul (Italie, 1976) [25].

Séisme de Mexico (1985) : après cette période, il a renforcé l'intérêt pour le chemisage des structures urbaines et a démontré les bénéfices d'une ductilité accrue obtenue grâce à ces

méthodes [26] .En effet, l'ampleur des dégâts causés par ce séisme a mis en évidence la vulnérabilité de nombreuses constructions existantes :

- Effondrements de nombreux bâtiments (des immeubles, hôpitaux ...etc.) environ 400 bâtiments.
- Plus de 3000 constructions ont été gravement endommagées



Figure II.4 : Séisme de 1985 à Mexico effondrement vertical d'un immeuble [27]

II.1.2.2 Techniques et principes adoptés :

Aguilar et al.1989 ont réalisé une étude portant sur 114 bâtiments sélectionnés parmi environ de 1200 structures qui ont été renforcées après séisme mexico 1985. Ils ont analysé l'Etat de ces bâtiments et identifier les désordres provoqués par séisme ainsi que les méthodes de réhabilitation appliquées pour établir une analyse statistique des techniques utilisées.

Les résultats ont montré que le mode de rupture plus fréquent concernait les éléments verticaux, afin d'améliorer le comportement structural, plusieurs techniques ont été mise en œuvre. Les plus utilisées chemisage en béton armée des poteaux et poutres ainsi que l'ajout des murs de cisaillement pour améliorer la résistance sismique des bâtiments [28].

Ces pratiques expérimentales ont commencé à se standardiser :

- 1.Augmentation de la section transversale du poteau pour améliorer la résistance.
- 2.Ajoute des barres en métal pour améliorer le confinement.
- 3.Utiliser des agents et colle pour la cohésion de béton existant et nouveau béton.

Cette méthode a servi de précurseur au standards modernes, elle a permis de codifier les pratiques de chemisage et constituant la base des code ACI et recommandations FIB des années 1980 et 1990, Renforcement des structures en béton armé par placage d'acier.

II.1.3 Développements techniques et normalisation (1985–2000) :

Au milieu des années 1980, la technique de chemisage a connu une professionnalisation et standardisation grâce aux avancées scientifiques et à l'évolution des codes de construction. Les progrès expérimentaux et théoriques, associées au développement des réglementations parasismiques, Les études ont confirmées que cette technique permet d'améliorer la capacité portante des colonnes en béton armée, les recherches expérimentaux ont basé sur l'optimisation de l'épaisseur et l'ajoute des armatures, ainsi sur l'amélioration de l'adhérence entre le béton

existant et le nouveau matériau, mais les méthodes de calcul et d'exécution nécessitaient une normalisation pour assurer la sécurité.

Parmi les chercheurs RODIGUEZ et PARK 1994 ont étudiées le comportement de poteaux renforcée par chemisage en béton armée. Les résultats ont montré une amélioration notable de la résistance, raideur et de ductilité, ainsi une bonne dissipation d'Energie sous chargement latéral cyclique [28].

II.1.3.1 Avancées expérimentales notamment porte sur :

- Augmentation de l'épaisseur et ferrailage du poteau.
- Améliorer l'adhérence entre les deux bétons.
- Réalisation des tests sur la résistance de matériau pour vérifier le comportement en flexion et cisaillement.

II.1.3.2 Normalisation et codes :

Les résultats issus des recherches ont favorisé l'intégration du chemisage dans plusieurs code internationaux :

- ACI 562 (USA) : établir des recommandations pour la réhabilitation et le renforcement des structures.
- Recommandations de la FIB (Fédération internationale du béton) :
Propose des règles concernant le confinement, la ductilité et le dimensionnement des éléments chemisées.

II.1.3.3 Évolution technique Durant cette période, les matériaux et techniques ont évolué :

Les techniques de renforcement observée dans cette période sont :

- Bétons haute performance (HPC) : pour un chemisage résistant et plus mince.
- Introduction des composites fibrés (FRP) : un des solutions pour un renforcement léger et haut résistance.
- Modélisation numérique : éléments finis (FEA) utiliser pour facilite l'analyse et la réalisation.

II.1.4 Chemisage des colonnes en béton armé (2000–aujourd'hui) et tendances futures :

Depuis les années 2000, les techniques de chemisage des colonnes en béton armée connu une véritable modernisation, soutenue par les innovations matérielles.

Plus récemment, VANDOROS et DRITSOS 2006 ont réalisé une campagne expérimentale sur plusieurs techniques de chemisage en béton armé. Les recherche récentes se sont concentre sur l'utilisation des matériaux plus performance et durable pour rependre aux exigences modernes de sécurité et durabilités des infrastructure et des éléments porteurs, donc le BTHP béton fibrée a très haut performance a fait l'objet de nombreuses étude, les travaux de MASSICOTTE ET BOUCHER -PROULX 2010 ont montré que le chemisage en BTHP permet de renforcer l'ancrage des armatures et aussi améliorer la ductilité et la capacite de dissipation d'énergie des poteaux. Et pour FRP, VANDOROS et DRITSOS 2006 ont réalisé une expérience sur des colonnes en béton pour voire l'efficacité de chemisage en béton armé et en FRP ces derniers étaient soumises à une flexion composée avec effort latéral alterne et croissant, les résultats

montre que le chemisage en PRF présente l'avantage de peu de perte de résistance après le pic ainsi un comportement plus sûr sous chargement cyclique [28].

II.1.4.1 Innovations matérielles et techniques :

Grâce à l'évolution des matériaux novateurs et des procédés de renforcement sophistiqués, les techniques de chemisage ont connu des progrès notables, offrant la possibilité d'améliorer les performances mécaniques et la longévité des structures, Avec :

- Bétons fibrés à ultra-hautes performances (UHPC / HPFRC)
- Composites fibrés (FRP – Fibre Reinforced Polymer)
- Adhésifs et résines époxy avancés

« Les concepts de chemisage dans cette période restent valable, mais ont été modernisée »

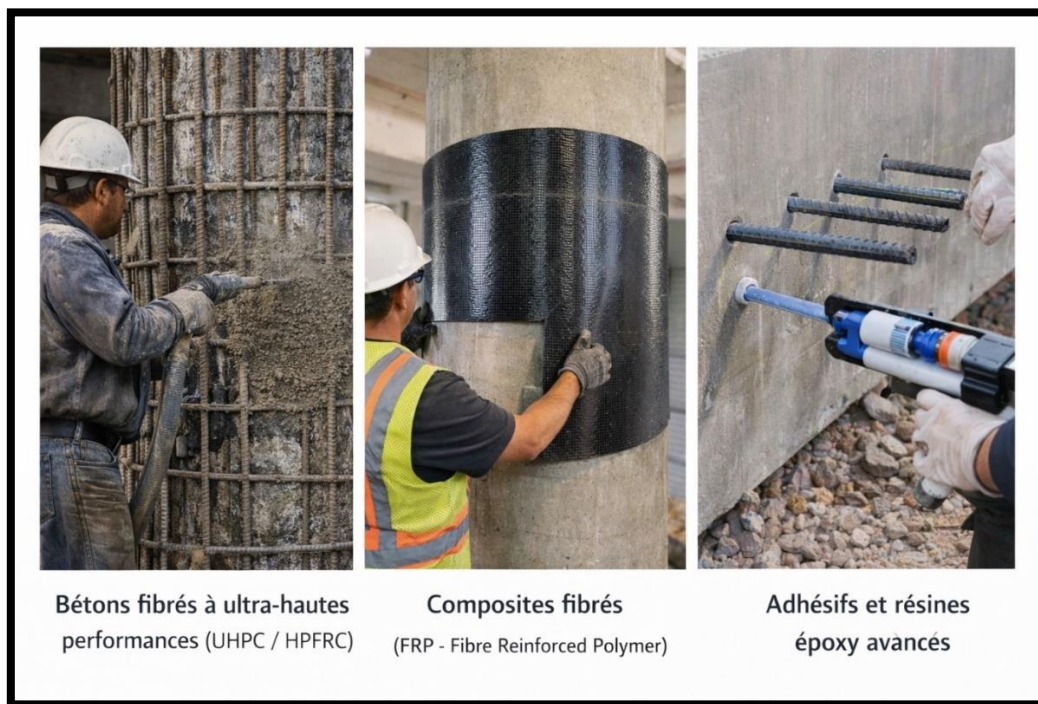


Figure II.5 : Innovations matérielles [29]

II.1.4.2 Normalisation et codification internationale :

Le progrès des techniques de réparation a mené à l'établissement de normes et de codes au niveau international :

- ACI 562 (USA)
- Recommandations de la FIB
- Eurocode 2 (EN 1992 1 1 et EN 1992 1 2)

« La différence principale entre les périodes 1985,2000 jusqu'à aujourd'hui réside dans l'évolution des matériaux et des méthodes avec des normes plus détaillées et strict »

II.1.4.3 Tendances futures :

Les recherches actuelles visent à :

- Développer des matériaux intelligents tels que le béton auto réparant, composites à mémoire de forme.
- Intégration des technologies numériques pour la conception et contrôle, via capteurs intégrés.

- Utilise des matériaux écologiques pour réduire l'impact environnemental.

II.1.5 Synthèse de l'évolution des techniques de chemisage et de leur codification :

Le tableau ci-dessous présente une synthèse de l'évolution des techniques de chemisage des structures, en mettant en évidence les méthodes, les normes, les résultats et les principes fondamentaux adoptés selon les différentes périodes historiques.

Aspect	Phase avant 1980	Phase 1980-2000	Phase depuis 2000
Méthodes	Chemisage empirique : simple augmentation de section, étriers simples	Chemisage traditionnel mais plus systématique : augmentation de section, armatures longitudinales et étriers, validation par tests expérimentaux	Chemisage optimisé : section plus mince, meilleure adhérence entre ancien et nouveau béton, utilisation de simulations numériques (FEA)
Normes et codes	Presque aucune norme spécifique, pratique essentiellement empirique	Début de codification : recommandations ACI et FIB, encore peu détaillées	Codification avancée : ACI 562, FIB, Eurocode 2 et normes internationales plus détaillées
Avantages / Résultats	Protection limitée contre les charges horizontales (sismiques), faible ductilité	Augmentation de la capacité portante et de la ductilité, méthodes encore empiriques mais validées expérimentalement	Méthodes plus efficaces et reproductibles, adaptées aux charges sismiques, interventions plus rapides et moins intrusives
Principe fondamental	Renforcer les colonnes pour supporter charges verticales et faibles charges horizontales	Même principe fondamental : augmentation de la section et ajout d'armatures	Même principe fondamental mais optimisé grâce aux matériaux modernes et aux méthodes avancées

Tableau II.1 : Synthèse de l'évolution des techniques de chemisage et de leur codification

II.2 Principe du chemisage en béton armé :

Le renforcement par augmentation de section est une technique classique de réhabilitation des structures en béton armé. Il a pour but d'améliorer la capacité portante et le comportement mécanique des éléments existants par ajout de béton et d'armatures, en assurant une bonne collaboration entre l'ancien et le nouveau matériau.

II.2.1 Principe général du renforcement par augmentation de section :

Le renforcement par augmentation de section, communément appelé chemisage (jacketing), enrobage ou gainage, est une technique traditionnelle de réhabilitation qui consiste à accroître les dimensions transversales d'un élément structurel en service (poteau, poutre ou mur...). Ce concept repose sur l'ajout d'armatures longitudinales et transversales supplémentaires à l'élément déjà existant, suivies de la mise en place d'un nouveau béton d'enrobage adéquat [1]. L'objectif fondamental de cette méthode est de restaurer les caractéristiques géométriques d'origine ou de créer une nouvelle section résistante capable de reprendre les efforts qui lui sont appliqués. Sur le plan mécanique, le principe vise à satisfaire plusieurs besoins structuraux majeurs :

- L'augmentation de la capacité portante pour supporter des charges verticales accrues, notamment lors d'un changement d'usage ou d'une surélévation.

- L'accroissement de la résistance en flexion et au cisaillement (effort tranchant) par l'apport de nouvelles sections d'acier et de béton.
- L'amélioration de la ductilité (capacité de déformation) de l'élément grâce au confinement du noyau de béton initial par les nouveaux cadres transversaux, un aspect critique pour la résistance aux séismes.

En conclusion, le concept d'augmentation de la section résistante transforme l'élément initial en une section composite performante, capable de répondre à des conditions de service ou de sécurité non prévues lors de la conception d'origine [17].

II.2.2 Collaboration entre l'ancien et le nouveau béton :

La collaboration entre le béton existant et le béton d'apport repose sur l'établissement d'une interface capable de transmettre efficacement les efforts. Cette interaction dépend de plusieurs facteurs :

1. Mécanisme d'adhérence à l'interface :

- Nature de la liaison : L'adhérence représente la résistance au cisaillement à l'interface entre les deux matériaux en l'absence d'armatures de couture. Elle est essentiellement due à une liaison chimique entre le béton existant et le béton d'apport [16].
- Comportement au glissement : La valeur maximale de cette adhérence est atteinte pour des glissements infimes compris entre 0,01 et 0,02 mm, et reste stable jusqu'à environ 0,05 mm [30].
- Compatibilité des matériaux : Pour limiter les glissements à l'interface, les sources recommandent que le nouveau béton possède une résistance caractéristique à la compression d'au moins 5 MPa supérieure à celle du béton d'origine [6].

2. Rôle du rosage et du nettoyage :

La préparation de la surface est qualifiée d'opération primordiale pour assurer la transmission des efforts.

- Le rosage (Traitement de surface) : Il est nécessaire de rendre la surface rugueuse pour augmenter la surface réelle de contact et favoriser l'accrochage mécanique. Les techniques employées incluent le repiquage, le bouchardage, le piquage au marteau pneumatique ou le sablage. Ces méthodes visent à éliminer la laitance et à faire saillir les granulats (graviers) du vieux béton [16].
- Le nettoyage : La surface doit être exempte de poussière, de graisses, d'huiles, de suie ou de parties non adhérentes. Ce nettoyage s'effectue par brossage métallique, soufflage à l'air comprimé ou lavage à haute pression [16].

3. Importance de la continuité mécanique :

Pour que l'élément renforcé fonctionne comme un bloc monolithique, une continuité parfaite doit être établie.

- Liaison par connecteurs : Lorsque l'adhérence chimique est jugée insuffisante, on utilise des armatures de couture, des tiges d'ancrage ou des chevilles scellées chimiquement ou mécaniquement dans le béton existant [11].
- Agents de liaison : L'épilage d'une couche de résine époxy ou d'une peinture primaire sur la surface du béton primitif avant le coulage est fréquemment préconisé pour améliorer la cohésion de l'interface [1].

- Continuité des armatures : Dans le cas d'un chemisage continu sur plusieurs étages, les armatures longitudinales doivent passer à travers les dalles (par forage) pour assurer la continuité des barres à tous les niveaux et garantir une transmission fluide des efforts, au niveau des fondations également, afin de prévenir l'arrachement des armatures [7].

II.2.3 Rôle des armatures ajoutées :

Les armatures ajoutées sont une composante essentielle du renforcement des structures en béton armé, et elles jouent un rôle déterminant dans la portance, la ductilité et la sécurité des éléments renforcés.

1. Rôle des armatures longitudinales :

Les armatures longitudinales additionnelles ont pour fonctions principales :

- Augmentation de la portance et de la résistance à la flexion : Elles permettent à l'élément de supporter des charges verticales plus importantes et d'équilibrer les moments fléchissant accrus.
- Assurer la continuité structurelle : Pour être efficaces, ces barres doivent être prolongées jusqu'à l'étage suivant à travers des percements dans la dalle ou ancrées profondément dans les fondations [2].
- Amélioration de la ductilité : En combinaison avec le frettage transversal, elles favorisent une dégradation progressive de l'élément sous sollicitation sismique au lieu d'une rupture fragile [11].

2. Rôle des armatures transversales (étriers et cadres) :

Le ferrailage transversal ajouté remplit des rôles critiques de confinement et de sécurité :

- Confinement du béton : Elles exercent une pression latérale passive sur le noyau de béton, ce qui améliore nettement sa résistance à la compression et son comportement ductile [6].
- Résistance au cisaillement : Elles augmentent la capacité de l'élément à résister aux efforts tranchants.
- Prévention du flambement : Elles maintiennent les barres longitudinales (anciennes et nouvelles) pour éviter leur instabilité sous forte compression [11].

3. Longueurs d'ancrage et de recouvrement :

La transmission efficace des efforts entre le renfort et la structure d'origine dépend de la qualité des ancrages :

- Règles de dimensionnement : Les sources mentionnent généralement une longueur de recouvrement comprise entre 40 et 50 fois le diamètre de la barre (40ϕ ou 50ϕ), selon la zone sismique et les règlements appliqués (RPA ou BAEL).
- Continuité mécanique : Les armatures doivent être ancrées par scellement (chimique ou mécanique) ou par soudure après vérification de la soudabilité de l'acier [9].
- Liaison avec l'existant : Des armatures de couture ou des connecteurs (tiges d'ancrage, chevilles) sont scellés dans le béton conservé pour garantir la liaison entre l'ancien et le nouveau béton [30].

II.2.4 Amélioration de la capacité portante (compression, flexion, cisaillement) :

Le renforcement par augmentation de la section résistante, appelé communément chemisage ou gainage, consiste à accroître les dimensions d'un élément structurel existant (poteau, poutre ou voile) en lui ajoutant des armatures longitudinales et transversales complémentaires, puis en réalisant un nouvel enrobage en béton. Il s'agit généralement d'un micro-béton auto-compactable, choisi pour assurer un remplissage homogène des interstices sans recours à la vibration [17].

L'objectif principal de cette technique est d'obtenir une section composite présentant des performances mécaniques améliorées. L'augmentation de la section permet d'accroître la capacité portante, la résistance à la flexion et au cisaillement, ainsi que la ductilité, grâce à l'effet de confinement exercé sur le noyau de béton initial.

1. Amélioration de la résistance en compression (Confinement) :

L'augmentation de la capacité en compression repose majoritairement sur le phénomène de confinement.

- Mécanisme : Sous une charge axiale, le béton tend à se dilater latéralement (effet Poisson) ; le renfort s'oppose à cette expansion, créant un état de compression triaxiale qui augmente la résistance ultime du noyau de béton.
- Techniques : Le chemisage en béton armé (par l'ajout de cadres serrés), les cages métalliques et les enveloppes en matériaux composites sont les solutions privilégiées pour freiner l'éclatement du béton et augmenter la charge critique [6].

2. Amélioration de la résistance à la flexion :

Le renforcement en flexion vise à compenser un manque d'armatures longitudinales ou une augmentation des charges d'exploitation.

- Chemisage en béton armé : L'ajout de barres d'acier longitudinales, ancrées dans les fondations et prolongées à travers les dalles, permet de reprendre des moments fléchissant plus importants.
- Précontrainte additionnelle : L'ajout de câbles extérieurs permet de restaurer la capacité portante initiale ou de donner un nouvel état de service en compensant les tractions excessives [7].

3. Amélioration de la résistance au cisaillement (Effort tranchant) :

Le renforcement au cisaillement est crucial pour éviter les ruptures fragiles, particulièrement en zone sismique.

- Armatures transversales : Dans le chemisage en béton, l'ajout de cadres et d'étriers rapprochés augmente directement la capacité à l'effort tranchant.
- Murs de contreventement : L'insertion de voiles en béton armé entre les poteaux d'un portique augmente considérablement la résistance globale à l'effort tranchant de la structure [16].

II.2.5 Contribution au comportement parasismique selon le RPA 2024 :

Le chemisage en béton armé constitue un outil de renforcement efficace pour améliorer le comportement parasismique des éléments porteurs existants, conformément aux prescriptions du RPA 2024.

Selon le RPA 2024, les poteaux situés en zones sismiques doivent satisfaire à des critères stricts de ductilité, confinement et redistribution des efforts afin de prévenir les ruptures fragiles et d'assurer la dissipation d'énergie pendant un séisme. L'augmentation de la section transversale par chemisage, combinée à l'ajout d'armatures longitudinales et d'étriers rapprochés, permet :

- Amélioration du confinement : les étriers rapprochés limitent l'éclatement du noyau en béton existant, augmentant la résistance en compression et retardant l'apparition des fissures critiques.
- Augmentation de la capacité portante et de la rigidité : la section renforcée reprend les efforts axiaux et flexionnels excédant la capacité initiale de l'élément.
- Amélioration de la ductilité et dissipation d'énergie : la combinaison du confinement et des armatures longitudinales assure un comportement ductile, essentiel pour les structures soumises à des sollicitations sismiques cycliques.
- Réduction du cisaillement et redistribution des efforts : la nouvelle armature transversale augmente la résistance au cisaillement et assure une meilleure répartition des efforts le long de la hauteur du poteau.

Ainsi, le chemisage dimensionné et exécuté selon le RPA 2024 assure non seulement la mise en conformité parasismique des structures existantes, mais optimise également la sécurité structurale globale, la durabilité et la résilience face aux actions sismiques.

II.3 Méthodologie du chemisage en béton armé (Partie étude et organisation avant exécution) :

La méthodologie du chemisage repose sur un diagnostic complet de l'élément existant, l'évaluation de sa capacité résiduelle, le dimensionnement des renforts et une organisation rigoureuse du chantier pour garantir la continuité mécanique, la sécurité et la durabilité de l'ouvrage.

II.3.1 Diagnostic et évaluation de l'élément existant :

Le diagnostic est le passage obligé de toute réhabilitation ; il permet de se prononcer sur l'état de "santé" de l'élément et de définir l'ampleur des pathologies [31].

- Visite préliminaire et état des lieux : Cette étape vise à comprendre le fonctionnement de la structure, identifier les désordres visibles (fissures, éclats, traces de rouille) et vérifier l'accessibilité pour les travaux futurs [9].
- Collecte de la documentation technique : Il est crucial de réunir les plans de coffrage et de ferrailage d'origine, les notes de calcul initiales, les rapports géotechniques et l'historique des modifications ou entretiens subis par l'ouvrage [9].
- Identification des causes de dégradation : Avant de renforcer, il faut comprendre l'origine des désordres (vieillessement naturel, erreurs de conception, surcharges non prévues ou agressions environnementales comme la carbonatation) [31].

II.3.2 Organisation et Études d'Exécution :

Cette phase fait le pont entre le diagnostic et le chantier :

- Choix de la stratégie de renforcement : Selon les résultats du diagnostic (insuffisance de section, corrosion des aciers ou manque de ductilité), on valide la pertinence du chemisage par rapport à d'autres techniques comme le placage d'acier ou les composites [16].

- Note de calcul de renforcement : Dimensionnement de la nouvelle section composite, calcul du nombre d'armatures additionnelles et vérification de l'effort normal réduit pour garantir un comportement ductile.
- Établissement du dossier d'exécution : Réalisation de plans détaillés montrant la position des nouveaux aciers, les ancrages dans les dalles/fondations et les détails de préparation de l'interface (rosage, agents de liaison).
- Étude de faisabilité économique : Comparaison entre le coût du renforcement, les contraintes d'exploitation du bâtiment et la durée des travaux.

II.3.3 Analyse des causes de dégradation :

L'analyse des causes de dégradation est l'étape la plus critique et la plus complexe du processus de réhabilitation, car il n'est pas possible de choisir une méthode de réparation durable sans identifier précisément l'origine du désordre. Dans le cadre d'un projet de chemisage en béton armé, cette analyse permet de comprendre pourquoi la section d'origine est devenue insuffisante ou dégradée [31]. Les causes de dégradation en plusieurs catégories majeures :

1. Causes liées à la conception (Phase d'étude) :

Les erreurs commises avant même la construction affaiblissent la structure dès son origine :

- Étude géotechnique insuffisante : Une mauvaise appréciation du sol (terrain inondable, non homogène ou agressif) entraîne des tassements différentiels majeurs [7].
- Erreurs de calcul et de modélisation : L'utilisation de modèles inadaptés, la sous-estimation des charges ou l'oubli des phénomènes différés comme le retrait et le fluage affaiblissent la section résistante [7].
- Dispositions constructives incorrectes : Un mauvais positionnement des armatures sur les plans ou l'absence de contreventement adéquat réduit la capacité de l'élément à résister aux efforts horizontaux [7].

2. Causes liées à l'exécution (Phase de chantier) :

Même une structure bien conçue peut être dégradée par une mise en œuvre défectueuse :

- Mauvaise qualité des matériaux : L'utilisation d'un béton mal dosé, d'un sable contenant trop d'éléments fins ou d'armatures corrodées dès le stockage nuit à la résistance finale [7].
- Défauts de mise en œuvre : Un enrobage insuffisant des aciers, une vibration excessive (provoquant la ségrégation) ou un décoffrage prématuré avant que le béton n'ait acquis sa résistance sont des causes fréquentes de fissuration [32].
- Absence de cure : Par temps chaud, l'absence de protection du béton frais provoque une dessiccation rapide et l'apparition de faïençage en surface [31].

3. Causes liées à l'environnement et à l'exploitation :

Ces facteurs agissent sur le long terme après la mise en service de l'ouvrage :

- Changement de fonctionnalité : L'augmentation des surcharges d'exploitation (transformation d'un bâtiment résidentiel en usine ou ajout d'étages) rend la section initiale insuffisante [9].
- Négligence et manque d'entretien : Le relâchement de la surveillance et l'absence de réfection de l'étanchéité sont les causes principales de la dégradation prématurée du béton armé [7].

- Agressions physico-chimiques : La carbonatation (réduction du pH du béton) et la pénétration des chlorures détruisent le film protecteur des aciers, déclenchant une corrosion qui augmente le volume de l'armature et fait éclater le béton [9].

4. Causes accidentelles et naturelles :

- Séismes : Les sollicitations cycliques sévères provoquent des fissures en "X" dans les poteaux et peuvent mener à une rupture fragile si la ductilité est insuffisante [9].
- Incendies et chocs : Les chocs thermiques élevés ou les impacts de véhicules dégradent brutalement la cohésion du béton et la section efficace des armatures [9].

En conclusion, le diagnostic doit déterminer si la dégradation provient d'une atteinte à la masse entière du béton ou simplement d'une altération de sa peau, car cela conditionnera l'ampleur du chemisage à réaliser [17].

II.3.3 Dimensionnement et vérifications de calcul :

Le dimensionnement et les vérifications de calcul pour un renforcement par chemisage en béton armé visent à garantir que l'élément composite (ancien et nouveau béton) répond aux exigences de sécurité, de rigidité et de ductilité fixées par les règlements (BAEL, RPA, Eurocode 8).

1. Hypothèses de calcul fondamentales :

Le calcul repose sur plusieurs principes pour assurer la validité des modèles mécaniques :

- Comportement monolithique : On suppose une adhérence parfaite entre l'ancien et le nouveau béton [7].
- Négligence du béton tendu : La résistance à la traction du béton est ignorée dans les calculs de résistance ultime [9].
- Prise en compte de l'effort normal : On suppose généralement que l'effort normal total agit sur la section chemisée globalement [2].

2. Caractéristiques des matériaux :

- Résistance du béton : Le nouveau béton doit présenter une résistance caractéristique (f_{c28}) supérieure d'au moins 5 MPa à celle du béton d'origine pour compenser les conditions de mise en œuvre [6].
- Résistance équivalente : Pour simplifier les calculs d'un élément composé de deux bétons différents, une résistance équivalente ($f_{c,eq}$) est calculée en pondérant les résistances par les surfaces respectives des sections [6].

3. Vérifications globales de la structure :

Le chemisage modifie la réponse dynamique du bâtiment, imposant des vérifications à l'échelle de l'ouvrage :

- Déplacements inter-étages : Le déplacement relatif (Δ) entre deux niveaux consécutifs [11].
- Période fondamentale : La période analytique de la structure renforcée doit être comparée aux valeurs empiriques du RPA pour valider le modèle dynamique [7].

II.3.4 Vérification réglementaire (RPA, DTR) :

La vérification réglementaire du chemisage en béton armé, selon les référentiels algériens (RPA 99/2003, RPA 2024 et DTR), repose sur une série de critères de performance

mécanique, de sécurité globale et de dispositions constructives visant à assurer la stabilité de l'ouvrage en zone sismique.

1. Vérification de la Résultante des Forces Sismiques (Règle des 80 %) :

Selon le RPA 2024 et le RPA 99, la structure renforcée doit satisfaire une exigence de représentativité du calcul dynamique par rapport au calcul statique.

- La règle : La résultante des forces sismiques à la base obtenue par combinaison des valeurs modales (V dynamique) ne doit pas être inférieure à 80 % de celle déterminée par la méthode statique équivalente (V statique) [33].

2. Contrôle des Déplacements Latéraux Inter-étages :

Pour limiter les dommages structuraux et protéger les éléments non structuraux, le RPA impose une limite stricte sur la déformation [7].

3. Vérifications du Ferrailage (Dispositions Constructives) :

Le chemisage doit respecter des taux d'armature minimaux et maximaux pour assurer le confinement.

- Armatures Longitudinales : Le pourcentage minimal est généralement selon les spécificités du RPA 2024 pour les poteaux [11].
- Armatures Transversales : L'espacement des étriers doit être réduit dans les zones nodales (environ 10 cm) pour maximiser le confinement du noyau. Le diamètre des armatures transversales est fixé par la règle $\varphi_t = \frac{\varphi_l^{max}}{3}$ selon le BAEL ou selon les ratios spécifiques du RPA.

4. Méthodes d'Analyse Avancées (Push over) :

Le corpus souligne que pour une évaluation fiable après renforcement, le RPA autorise désormais l'analyse statique non linéaire (Push-over) [6].

- Critère de performance : Il faut vérifier que le point de performance de la structure chemisée se situe dans une plage garantissant la "sécurité des personnes" (Life Safety - LS) ou la "prévention de ruine" (Collapse Prevention - CP) selon les spectres de demande sismique [7] et [34].

II.3.5 Planification et organisation des travaux :

La planification et l'organisation des travaux de chemisage en béton armé reposent sur une approche rigoureuse structurée en plusieurs phases administratives, techniques et opérationnelles.

1. Programmation et Études Préalables :

L'établissement d'un cadre de programmation est la première étape, permettant de définir les objectifs de transformation et de fixer les exigences du projet. Une vérification de la faisabilité, incluant parfois une pré-consultation des entreprises, est nécessaire pour ajuster le projet aux difficultés réelles de réalisation. L'organisation doit débuter par la collecte exhaustive de la documentation technique existante, telle que les plans de coffrage, de ferrailage, les rapports géotechniques et les expertises antérieures [9]. Le choix de l'entreprise est crucial ; elle doit être qualifiée et spécialisée dans les travaux de réhabilitation et de démolition contrôlée [31].

2. Organisation du Chantier et Assurance Qualité :

Avant tout démarrage, l'entrepreneur doit soumettre un Plan d'Assurance Qualité (PAQ) ou un Schéma Opérationnel (SOPAQ) incluant les procédures d'exécution, l'organigramme des responsables et le calendrier prévisionnel mettant en évidence les tâches critiques [35].

- Installations et Signalisation : Le projet doit intégrer les installations de chantier et une signalisation complète soumise à approbation [35].
- Sécurité et Hygiène : Un plan d'hygiène et de sécurité doit être établi, incluant les vaccinations obligatoires du personnel, le balisage des zones de travail par des clôtures de chantier et le port d'équipements de protection individuelle [35].
- Maintien en service : Si l'ouvrage doit rester en service (cas des galeries hydrauliques), la mise en place de batardeaux et de systèmes de pompage doit être planifiée pour maintenir les écoulements et protéger la zone de travail [35].

3. Phasage Opérationnel de l'Exécution :

La méthodologie d'exécution suit un enchaînement chronologique strict pour garantir l'efficacité du renfort [9] :

- Préparation Préliminaire : Elle commence par un lever topographique pour évaluer la géométrie exacte et une inspection visuelle détaillée des anomalies [35].
- Étalement : La mise en place d'un cintre ou d'étais est indispensable pour soulager l'élément existant et assurer la reprise des charges permanentes pendant les travaux [16].
- Préparation du Support : Cette phase inclut le décapage du béton d'enrobage, le repiquage des surfaces pour augmenter la rugosité et un nettoyage haute pression pour éliminer les poussières et contaminants [16].
- Traitement des Armatures : On procède au dégagement des aciers, au contrôle de leur diamètre résiduel et au remplacement des barres trop corrodées par soudure ou scellement [9].
- Mise en place du Renfort : Elle comprend le scellement d'armatures de couture, la fixation des armatures additionnelles (longitudinales et transversales) et l'application éventuelle d'une résine époxy pour assurer l'adhérence à l'interface [16].
- Bétonnage : Le coulage s'effectue souvent avec un micro-béton auto-compactable pour garantir le remplissage intégral des interstices sans vibration, ou par projection de béton par passes successives [9].
- Finition et Cure : Le processus se termine par le nivellement des surfaces, une période de cure pour limiter les retraits et, si nécessaire, des injections périphériques de collage [1].

4. Contrôles et Réception :

L'organisation prévoit des points d'arrêt obligatoires pour validation avant de passer à l'étape suivante, notamment après l'implantation, avant le bétonnage et après la pose des armatures. Une inspection finale, parfois vidéo pour les canalisations, permet de vérifier la qualité et l'étanchéité du chemisage avant la réception définitive de l'ouvrage [35].

II.4 Technique de mise en œuvre du chemisage (Partie pratique chantier) :

La mise en œuvre pratique du chemisage en béton armé sur un chantier de réhabilitation suit un protocole technique rigoureux pour garantir la pérennité et le fonctionnement monolithique de l'élément renforcé.

II.4.1 Préparation du support (piquage, nettoyage, traitement) :

La préparation du support constitue l'une des étapes les plus déterminantes dans le processus de chemisage, car elle conditionne la qualité de l'adhérence entre l'ancien et le nouveau béton. La première phase consiste à décaper l'élément pour enlever les anciens enduits et le béton d'enrobage dégradé par des moyens mécaniques comme le burinage ou le repiquage. Le piquage (ou bouchardage) doit être réalisé de manière à obtenir une surface rugueuse, ce qui est essentiel pour favoriser l'accrochage mécanique entre l'ancien et le nouveau béton. Il est impératif d'éviter toute action trop agressive susceptible de provoquer des microfissures supplémentaires dans les zones adjacentes. La surface obtenue doit être rugueuse afin de favoriser l'accrochage mécanique du nouveau matériau. Ensuite, un nettoyage minutieux est réalisé afin d'éliminer toute trace de poussière. Ce nettoyage peut être effectué soit à sec par brossage métallique et soufflage à l'air comprimé déshuilé, soit par lavage à l'eau sous pression [35]. Lorsque le béton présente une porosité élevée ou un faible taux de liant, l'application d'une barbotine à base de liant hydraulique peut être envisagée afin d'améliorer l'adhérence. Dans certains cas particuliers, des résines synthétiques sont utilisées pour assurer une liaison optimale. Enfin, le traitement des armatures existantes exige le dégagement des aciers corrodés, leur brossage pour éliminer la rouille, et l'application immédiate d'un produit passivant anticorrosion (type oxyde de zinc ou époxy) [9].



Figure II.6 : Enlèvement du béton de couverture et rugosité de la surface (Saim Raza. Muhammad K. I. Khan .Scott J. Menegon . Hing-Ho Tsang . and John L. Wilson, 2019)



Figure II.7 : Réfection des bétons et protection des armatures (Hicham BELHANNACHI, 2009)

II.4.2 Mise en place des connecteurs et ancrages (Forage et scellement des nouvelles armatures) :

Pour assurer la transmission des efforts de cisaillement à l'interface, des connecteurs de couture ou des chevilles d'ancrage doivent être scellés dans le béton existant. Le processus commence par le percement de trous aux diamètres et profondeurs spécifiés par la note de calcul, suivi de l'injection d'un mortier ou d'une résine d'ancrage avant l'insertion des barres de liaison. Le forage des trous destinés au scellement des nouvelles armatures doit être réalisé avec précision et rigueur. Après le forage, les trous doivent être nettoyés soigneusement par jet d'air comprimé pour éliminer toute poussière résiduelle susceptible de compromettre l'adhérence du produit de scellement. Le diamètre du trou dépend du diamètre de la barre à insérer ainsi que du type de produit utilisé, qu'il s'agisse d'un coulis à base de liant hydraulique ou d'une résine synthétique. L'espacement entre les trous doit être calculé de manière à éviter tout risque d'éclatement du béton existant. La mise en place du produit de scellement varie selon l'orientation de la surface : par gravité pour les surfaces horizontales ou par injection à l'aide d'un pistolet pour les surfaces verticales et les sous-faces. Les armatures sont ensuite insérées par pression et maintenues en position jusqu'à la prise complète du produit. Ces ancrages permettent de lier les armatures additionnelles au noyau ancien et sont cruciaux pour assurer la

continuité structurelle à travers les planchers et jusqu'aux fondations [11].

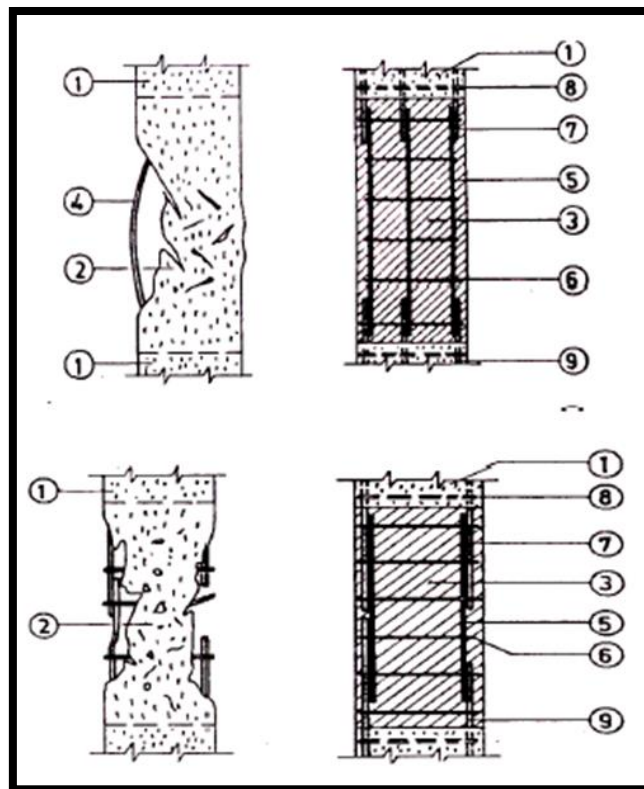


Figure II.8 : Renforcement avec ajout d'armatures (SEKHRI KHADIDJA, 2024)

II.4.3 Pose des armatures longitudinales et transversales :

Le traitement des armatures existantes est une étape fondamentale pour assurer la durabilité du renforcement. Les aciers doivent être soigneusement décapés afin d'éliminer toute trace de corrosion. Cette opération se réalise généralement en deux phases : un dégrossissage relativement agressif pour enlever la rouille importante, suivi d'une finition permettant d'obtenir une surface propre. Lorsque les armatures présentent une détérioration avancée ou une perte significative de section, elles doivent être remplacées ou complétées.

Le nouveau ferrailage, composé de barres longitudinales et de cadres transversaux, est installé conformément aux plans d'exécution et aux règles parasismiques (RPA). Les armatures longitudinales doivent souvent être prolongées à travers des percées dans les dalles pour assurer la continuité entre les étages. Les armatures transversales (cadres, étriers, épingles) entourent les barres longitudinales pour assurer le confinement du béton, augmenter la résistance au cisaillement et prévenir le flambement des aciers. L'espacement de ces étriers est généralement réduit dans les zones nodales pour maximiser la ductilité de l'élément [11].



1-Béton sain existant ; 2-béton existant endommagé ; 3-Nouveau béton ;
4-Armature flambée ; 5-Nouvelle armature ; 6-Nouveaux cadres ;
7-Soudure ; 8-Cadres existants ; 9-Armature existante

Figure II.10 : Pose des armatures longitudinales et transversales



(a) Installation postérieure des armatures

(b) Soudage des armatures transversales

Figure II.11 : Réparation par chemisage en béton armé

II.4.4 Coffrage du chemisage :

Pour les poteaux, un coffrage avec des ouvertures de coulage est souvent utilisé pour faciliter la mise en œuvre dans des espaces restreints. Il doit être parfaitement étanche pour éviter les fuites de laitance et, s'il est en bois, traité pour ne pas absorber l'eau du mélange [36].



Figure II.12 : Coffrage du chemisage [16]

II.4.5 Coulage du béton et vibration :

Après la mise en place des armatures et l'installation éventuelle des coffrages, le béton de chemisage est coulé ou projeté autour de l'élément existant. Juste avant le bétonnage, il est fréquent d'appliquer un agent de liaison (résine époxy ou barbotine de ciment modifiée) sur la surface préparée pour optimiser l'adhérence chimique [1]. Le béton peut être mis en place manuellement dans des coffrages traditionnels ou appliqué par projection mécanique, selon la configuration de l'élément à renforcer. Une vibration adéquate est indispensable pour éliminer les bulles d'air et assurer une compacité optimale. L'utilisation d'un micro-béton auto-compactable (BAP) est privilégiée car sa grande fluidité lui permet de remplir intégralement les interstices et les zones densément ferraillées sans recours à la vibration mécanique [16]. La mise en œuvre doit respecter les conditions thermiques recommandées afin de garantir une prise homogène. Si un béton conventionnel est utilisé, il doit être coulé par passes successives (maximum 50 cm) et vibré soigneusement jusqu'à disparition des bulles d'air pour éviter les nids de graviers et la ségrégation [7]. Après le coulage, des opérations de cure sont nécessaires pour limiter les effets du retrait et prévenir la fissuration précoce. Cette cure peut consister en un arrosage régulier, l'application de membranes de cure ou l'utilisation de produits spécifiques

de protection.



Figure II.13 : Coulage du béton [16]

II.4.6 Cure et contrôle qualité :

Après le décoffrage, une cure humide est impérative (arrosage, toiles de jute humides ou produit de cure pulvérisé) pendant une durée de 3 à 14 jours selon les conditions climatiques afin de limiter le retrait et prévenir la fissuration thermique [1]. Le contrôle qualité repose sur la vérification de la conformité du ferrailage, la prise d'éprouvettes pour tester la résistance à la compression à 28 jours, et des inspections visuelles ou acoustiques (ultrasons) pour s'assurer de l'absence de vides internes et de la bonne adhérence de la chemise au support [31].

II.4.7 Détails constructifs et aspects technologiques :

Sur le plan constructif, l'épaisseur minimale du chemisage est généralement comprise entre 75 mm et 100 mm afin d'assurer un enrobage suffisant des nouvelles armatures. Les armatures longitudinales peuvent être prolongées jusqu'à l'étage supérieur pour garantir la continuité structurelle, notamment dans le cas des poteaux. Les armatures transversales, sous forme de cadres fermés ou d'aciers en U, assurent le confinement du béton et la résistance au flambement des barres longitudinales. Lorsque le chemisage sur les quatre faces n'est pas possible, des solutions alternatives peuvent être adoptées, telles que l'ajout d'épingles de liaison ou de cadres spéciaux. L'ancrage dans les fondations peut être réalisé par augmentation de la section des semelles ou par scellement de barres supplémentaires afin d'assurer une transmission correcte des efforts [11].

II.5 Analyse de structure renforcer par chemisage :

L'analyse des structures renforcées par chemisage permet d'évaluer l'efficacité de cette technique sur le comportement structural. Elle repose principalement sur la modélisation de la structure, l'évaluation de ses performances et l'étude de l'influence du renforcement.

II.5.1 Modélisation de la structure renforcée :

La modélisation d'une structure renforcée, notamment par chemisage (gainage), consiste à élaborer un modèle mathématique fini qui reflète avec précision les paramètres du système d'origine, à savoir sa masse, sa rigidité et son amortissement. Cette procédure est essentielle pour évaluer la vulnérabilité sismique d'un bâtiment existant et valider l'efficacité du renforcement proposé [7].

II.5.1.1 Choix de l'outil et de la méthode d'analyse :

Les ingénieurs utilisent généralement des logiciels d'éléments finis tels que SAP2000, ETABS ou Autodesk Robot. L'analyse se divise en deux approches principales :

- Analyses linéaires : (Statique équivalente ou modale spectrale) utilisées pour le calcul des efforts internes initiaux.
- Analyses non-linéaires : La méthode Push over (statique non linéaire) est l'outil le plus performant pour estimer le comportement réel au-delà du domaine élastique, en suivant l'histoire de formation des rotules plastiques jusqu'à la ruine.

II.5.1.2 Représentation des éléments structuraux :

Dans le modèle numérique, les éléments sont représentés selon leur géométrie :

- Poteaux et poutres : Ils sont modélisés par des éléments de type Frame (linéiques unidimensionnels) possédant six degrés de liberté par nœud.
- Voiles : Ils sont représentés par des éléments de type Shell (coques) à quatre nœuds.
- Planchers : Ils sont souvent simulés par des diaphragmes rigides pour répartir les forces d'inertie [2] Et [7].

II.5.1.3 Hypothèses spécifiques au renforcement (Chemisage) :

Pour modéliser l'interaction entre l'ancien élément et son renfort, l'Eurocode 8 préconise les hypothèses suivantes :

- Comportement monolithique : On suppose une adhérence parfaite et un comportement mixte complet entre l'ancien béton et le nouveau béton ajouté.
- Globalisation de la section : L'effort normal total est supposé agir sur l'élément chemisé global, sans distinguer que la charge initiale était portée par le poteau seul.
- Uniformisation des propriétés : Les propriétés du béton de chemisage (souvent plus résistant) sont supposées s'appliquer à toute la section de l'élément pour simplifier les calculs de capacité.
- Modélisation multifibre : Pour une analyse fine, la section est discrétisée en fibres (béton confiné, béton non confiné et fibres d'acier), permettant de décrire précisément la réponse inélastique et la fissuration progressive [7].

II.5.1.4 Chargement du modèle :

Le processus de modélisation non linéaire se déroule par étapes itératives :

1. Charges gravitaires : Application des charges permanentes et d'une partie des charges d'exploitation dans le domaine non linéaire.
2. Poussée latérale : Application de forces latérales incrémentales (d'allure triangulaire, modale ou uniforme) jusqu'à atteindre un déplacement cible ou l'instabilité de la structure [7].

II.5.2 Évaluation de la capacité portante après renforcement :

L'évaluation de la capacité portante après renforcement est une procédure technique visant à quantifier l'augmentation du niveau de service, de la résistance et de la ductilité d'un élément ou d'une structure complète. Cette étape est indispensable pour valider que les travaux de réhabilitation permettent à l'ouvrage de supporter les nouvelles sollicitations (sismiques ou gravitaires).

II.5.2.1 Méthodes d'analyse de la capacité :

L'outil le plus performant pour obtenir une estimation réaliste du comportement d'une structure après renforcement est l'analyse Push over (analyse statique non linéaire).

- Courbe de capacité : Elle représente la relation entre l'effort tranchant à la base et le déplacement au sommet. Après renforcement, on observe généralement une branche ascendante plus longue, indiquant un gain de résistance et une meilleure dissipation d'énergie.
- Point de performance : L'évaluation consiste à croiser la courbe de capacité de la structure renforcée avec le spectre de demande sismique pour vérifier si le point d'équilibre garantit la sécurité des occupants [6].

II.5.2.2 Évaluation des éléments chemisés en béton (BA) :

Pour le chemisage, le calcul de la nouvelle capacité portante repose sur des hypothèses réglementaires précises (Eurocode 8) :

- Comportement monolithique : On suppose une adhérence parfaite et une collaboration totale entre l'ancien béton et le nouveau béton ajouté.
- Globalisation de la section : L'effort normal total est considéré comme agissant sur la section chemisée globale.
- Propriétés du matériau : Pour simplifier, les caractéristiques du béton de chemisage sont souvent appliquées à toute la section pour le calcul de capacité.
- Facteur correcteur : Un coefficient $=0.8$ est introduit pour la résistance et la rigidité afin de compenser les conditions de mise en œuvre sur chantier par rapport au laboratoire [2].

II.5.4 Comparaison entre la structure avant et après renforcement :

La comparaison entre une structure avant et après renforcement (principalement par chemisage ou ajout de voiles) met en évidence une transformation radicale de son comportement mécanique et de sa fiabilité face aux séismes.

1. Capacité portante (Résistance) : Le renforcement vise directement à corriger l'insuffisance de résistance des éléments porteurs originaux.

- Avant renforcement : Les bâtiments existants présentent souvent une résistance insuffisante des poteaux aux charges appliquées. Les analyses montrent que la demande en effort tranchant à la base dépasse fréquemment la capacité réelle de la structure.
- Après renforcement : On observe une augmentation considérable de la capacité de charge ultime.
 - Chemisage béton : La capacité en résistance augmente avec l'épaisseur de la gaine. Par exemple, un chemisage de 7 cm peut plus que doubler la résistance d'un poteau initial (passant de 319 tf à 618 tf dans certains modèles).

- FRP (Matériaux composites) : Le confinement par PRF augmente la résistance à la compression du béton et la capacité de charge sans ajouter de masse significative.
 - Voiles : L'ajout de voiles de contreventement augmente massivement la résistance aux efforts latéraux.
2. Déformations et Rigidité : Le renforcement modifie la souplesse de l'ouvrage et sa capacité à se déformer sans rompre.
3. Sécurité structurale : L'objectif final est d'élever le niveau de performance pour garantir la sécurité des occupants.
- Vérification réglementaire : Avant renforcement, les structures échouent souvent aux tests de sécurité (déplacements excessifs, effort normal réduit non vérifié). Après renforcement, les conditions du règlement parasismique (RPA) sont satisfaites, notamment l'effort tranchant à la base et les limites de déplacement.
 - Point de performance : L'analyse Push over montre qu'après renforcement, le "point de performance" (intersection entre la capacité de la structure et la demande sismique) se déplace vers des zones de dommages moindres, garantissant la stabilité de l'ouvrage face à un séisme majeur.

Conclusion :

Dans ce chapitre, le chemisage en béton armé a été étudié comme une technique de réhabilitation et de renforcement des structures existantes. L'étude de son évolution historique, de ses principes de fonctionnement ainsi que de sa méthodologie de mise en œuvre a permis de mieux comprendre son rôle dans l'amélioration des performances structurales des ouvrages en béton armé.

Les différentes étapes de réalisation du chemisage, depuis le diagnostic de la structure jusqu'à l'exécution des travaux, ont mis en évidence l'importance d'une bonne préparation et d'un dimensionnement adéquat afin d'assurer l'efficacité du renforcement.

L'analyse des structures renforcées a également montré l'influence positive du chemisage sur l'augmentation de la capacité portante, de la rigidité et de la résistance sismique des éléments structuraux, ce qui confirme l'efficacité de cette technique dans le domaine de la réhabilitation des structures en béton armé.

Les connaissances théoriques et méthodologiques présentées dans ce chapitre constituent une base essentielle pour la partie pratique qui sera développée dans le chapitre suivant, consacrée à la méthodologie de vérification et à l'application du renforcement des structures en béton armé par chemisage.



Chapitre III : Méthodologie de
vérification et application au
renforcement des structures en béton
armé par chemisage



Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'étude de la vérification et du renforcement des structures en béton armé par la technique du chemisage, ainsi qu'à l'évaluation de leur comportement sismique. Dans un premier temps, une méthodologie générale est présentée afin de définir la démarche adoptée pour l'analyse, la modélisation et la vérification des éléments structuraux selon les exigences réglementaires en vigueur.

Dans un second temps, cette méthodologie est appliquée à un cas réel de réhabilitation d'un bâtiment en béton armé, initialement à usage d'habitation et transformé en bâtiment à usage commercial. L'étude comprend la collecte des données du projet, la modélisation numérique sous SAP2000, ainsi que l'analyse des sollicitations internes (efforts normaux, tranchants et moments fléchissant), des déplacements et du comportement dynamique de la structure.

Les vérifications effectuées mettent en évidence certaines insuffisances au niveau des poteaux, poutres et chaînages, nécessitant la mise en place de solutions de renforcement. Ainsi, une stratégie de chemisage en béton armé est proposée et appliquée aux éléments critiques afin d'améliorer la résistance, la rigidité et la ductilité de l'ouvrage.

Enfin, une analyse globale par la méthode Pushover est réalisée afin d'évaluer le comportement non linéaire de la structure avant et après renforcement et de vérifier l'efficacité des solutions adoptées en termes de performance sismique.

Partie 1 : Méthodologie pour la vérification des structures BA renforcés par chemisage

III.1.1 Introduction :

Dans le contexte de l'évaluation et du renforcement des structures en béton armé, la mise en place d'une démarche méthodologique structurée et rigoureuse s'avère essentielle. Une telle approche permet d'analyser le comportement réel de la structure tout en contrôlant sa conformité aux prescriptions réglementaires en vigueur.

Lorsque des insuffisances sont identifiées, des solutions de renforcement adaptées, notamment le chemisage, peuvent être envisagées afin d'optimiser les performances mécaniques des éléments concernés.

Par conséquent, cette partie est consacrée à la présentation de la méthodologie retenue pour la vérification ainsi que le renforcement de la structure étudiée.

III.1.2 Organigramme de la Méthodologie pour la vérification des structures BA renforcés par chemisage :

La figure (III.1) illustre la démarche méthodologique retenue pour l'analyse et la vérification de la structure. Dans ce qui suit, cette démarche sera appliquée de manière systématique au cas d'étude afin d'évaluer et, le cas échéant, renforcer les éléments structuraux. Cette démarche débute par la collecte des données du projet, incluant les caractéristiques géométriques, les propriétés des matériaux, ainsi que les charges appliquées et les paramètres sismiques. Elle se poursuit par la phase de modélisation et d'analyse structurale, réalisée à l'aide des méthodes des éléments finis, conformément aux règlements en vigueur. Les résultats obtenus permettent ensuite d'effectuer la vérification des éléments structuraux, notamment les poteaux et les poutres, en comparant les sollicitations aux résistances. En cas de non-satisfaction des critères de sécurité, des solutions de renforcement, telles que le chemisage des poteaux ou l'augmentation des sections des poutres, sont envisagées. Enfin, une nouvelle analyse est réalisée afin de valider l'efficacité des solutions proposées, suivant ainsi un processus itératif jusqu'à satisfaction des conditions de vérification.

Cette démarche servira de base pour l'application présentée dans ce chapitre, où chaque étape sera développée et appliquée au cas d'étude.

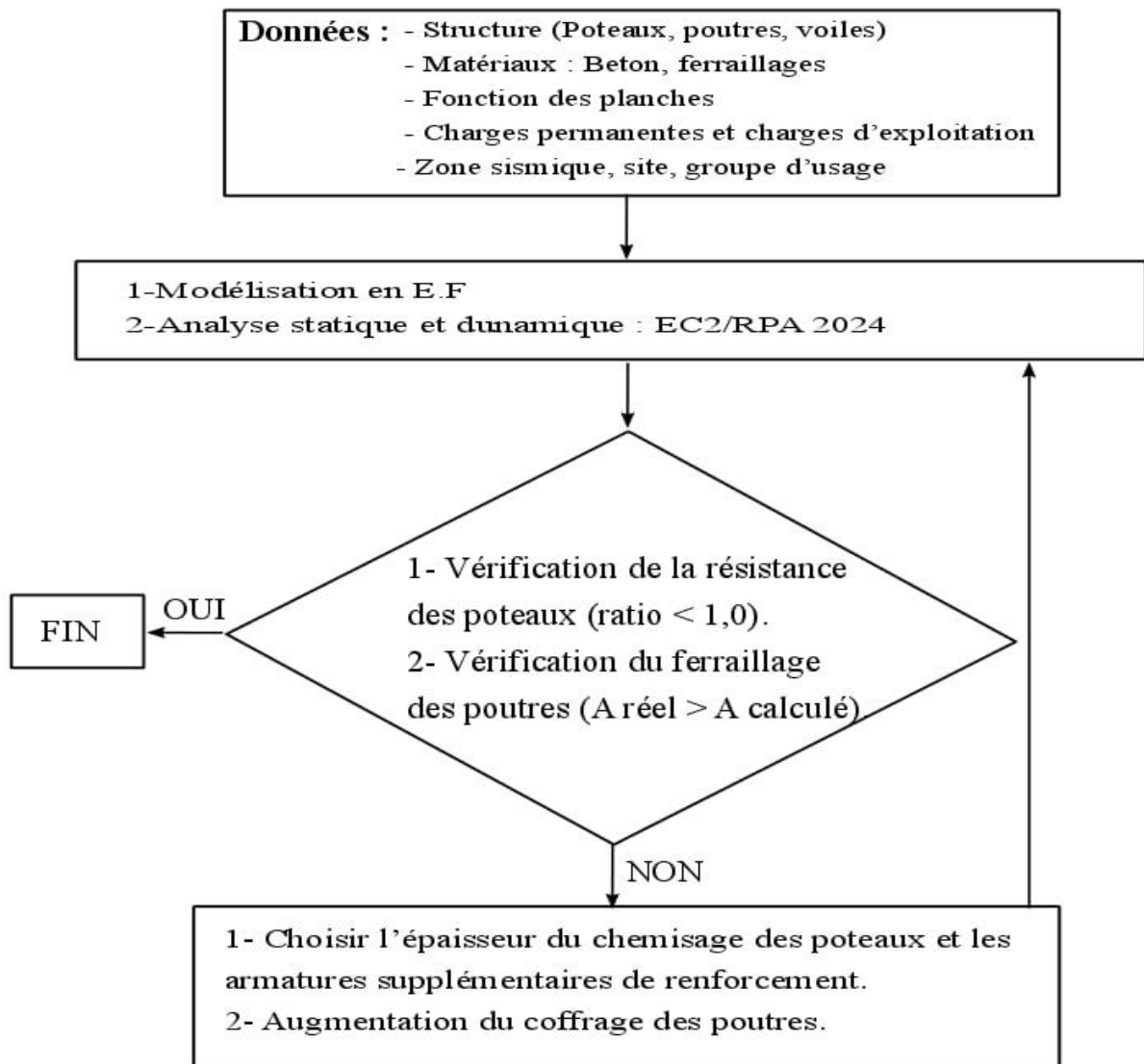


Figure III.1 : Organigramme de la Méthodologie pour la vérification des structures BA renforcés par chemisage

Partie 2 : Application Réhabilitation bâtiment BA par chemisage

III.2.1 Données du projet :

III.2.1.1 Description générale de l'ouvrage :

Construit en 1998. Cette structure, initialement d'habitation, sera un bâtiment à fonction commerciale. Il est situé dans la wilaya d'Alger., composée de : étage courant + terrasse accessible + terrasse inaccessible. L'ouvrage présente une configuration régulière en plan, avec une répartition homogène des éléments porteurs (poteaux et poutres), assurant ainsi une bonne stabilité globale de la structure. D'après les plans structuraux fournis, l'ouvrage présente une longueur de 17,70 m et une largeur de 13,70 m, avec une hauteur totale d'environ 10,05 m. En élévation, la hauteur de l'étage courant est de 4,05 m, celle de la terrasse accessible est de 3,40 m, tandis que la terrasse inaccessible présente une hauteur de 2,45 m.

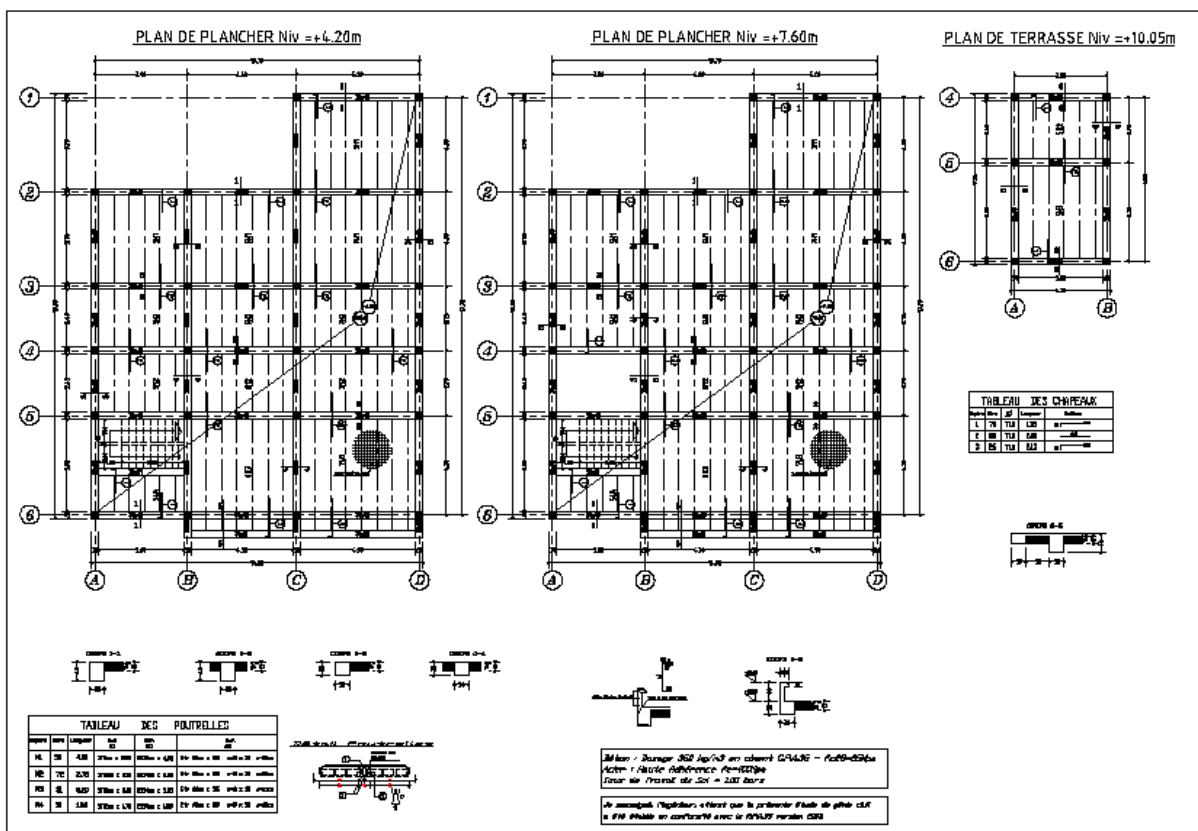


Figure III.2 : Plan de plancher Niv = +4.20m, +7.60m, +10.05m

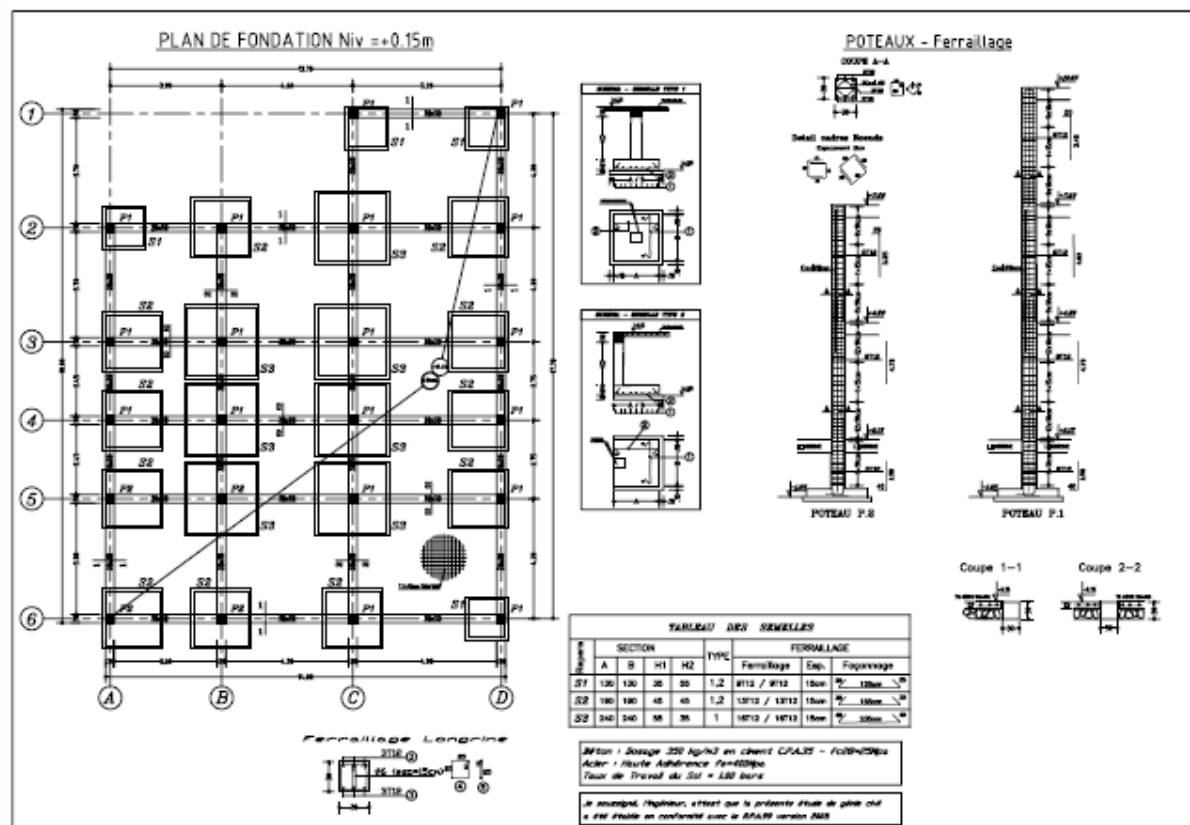


Figure III.3 : Plan de fondation et ferrailage de poteaux

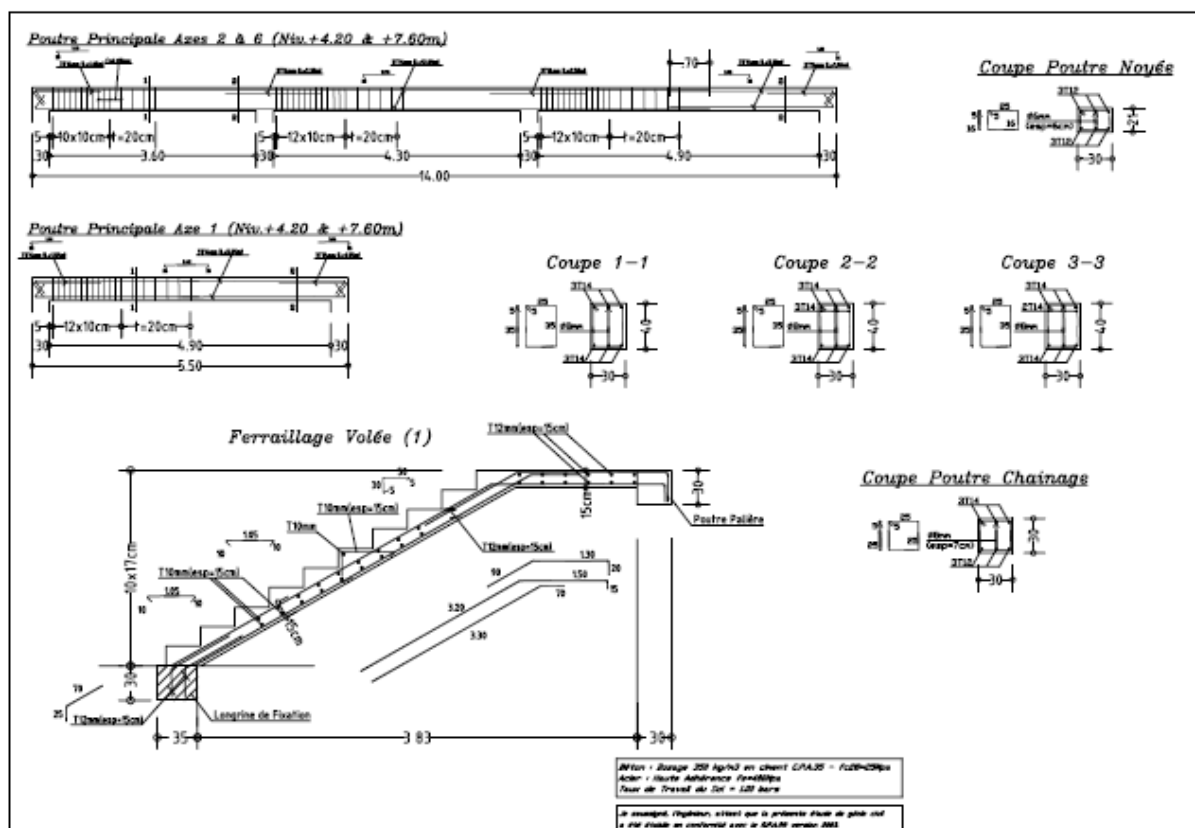


Figure III.4 : Plan de ferrailage des poutres

III.2.1.2 Contexte géotechnique et sismique :

Le bâtiment est implanté dans une zone de sismicité VI (zone à risque élevé) selon le règlement parasismique algérien RPA 2024.

Le site d'implantation est caractérisé par un sol meuble, ce qui nécessite une attention particulière dans la conception structurale.

III.2.1.3 Description de la structure :

- **Fondations** : Selon le plan de fondation, l'ouvrage repose sur des semelles isolées, reliées par des longrines en béton armé, assurant une bonne répartition des charges vers le sol.

- **Éléments verticaux** : La structure verticale est constituée de poteaux en béton armé de section $(30 \times 30) \text{ cm}^2$, assurant la transmission des charges vers les fondations.

- **Éléments horizontaux** : Les poteaux sont reliés par des poutres principales de section $(40 \times 30) \text{ cm}^2$ et secondaires de section de $(30 \times 30) \text{ cm}^2$, avec la présence de poutres noyées de section $(30 \times 21) \text{ cm}^2$, contribuant à la rigidité de l'ensemble.

- **Planchers** : Les planchers sont de type poutrelles-hourdis avec dalle de compression $(16+5)$, assurant la reprise des charges et le diaphragme horizontal.

- **Terrasse** : La terrasse constitue le dernier niveau et comprend des couches de protection et d'étanchéité adaptées.

- **Maçonnerie** : La maçonnerie utilisée pour cet ouvrage est en briques creuses d'épaisseurs 10 cm et 15 cm, selon leur fonction (cloisons ou murs de remplissage).

III.2.1.4 Caractéristiques des matériaux :

Béton :

- Dosages en ciment 350 kg/m^3
- $F_{c28} = 25 \text{ Mpa}$

Acier :

- Haute Adhérence $F_e = 400 \text{ Mpa}$

III.2.1.5 Descente des charges (surcharge : permanentes et exploitation) :

À l'origine, l'ouvrage était destiné à un usage d'habitation. Par la suite, sa fonction a été modifiée afin de le transformer en bâtiment à vocation commerciale. Cette reconversion s'est accompagnée d'une réévaluation des charges d'exploitation, qui sont passées d'une valeur initiale de $1,5 \text{ kN/m}^2$ à 3 kN/m^2 . Cette nouvelle valeur de surcharge sera prise en compte dans les calculs de vérification et de dimensionnement de la structure.

Des tableaux récapitulatifs des différentes charges appliquées ont été établis et présentés ci-dessous, afin de faciliter l'analyse et la vérification des éléments structuraux.

1-Plancher courant et terrasse accessible :

Élément	Épaisseur	Calcul	Charge (kg/m ²)
Carrelage	3 cm	0.03×2200	66
Mortier de pose	2 cm	0.02×2000	40
Sable de pose	3 cm	0.03×1800	54
Plancher corps creux (16+5)	-	-	305
Mortier de plâtre	1.5 cm	0.015×1200	18
Cloisons légères	10 cm	-	75
Total G	-	-	558 kg/m²
Surcharge exploitation (Commerce (Pour plancher courant))	-	-	300 kg/m²
Surcharge exploitation (pour terrasse accessible)	-	-	150 kg/m²

Tableau III.4 : Descente des charges Plancher courant et terrasse accessible

2-Plancher terrasse inaccessible :

Élément	Épaisseur	Calcul	Charge (kg/m ²)
Gravillon protection	5 cm	0.05×1500	75
Étanchéité multicouche	2 cm	0.02×1200	24
Forme de pente	10 cm	0.10×2200	220
Isolation thermique	2 cm	-	10
Plancher corps creux (16+5)	-	-	305
Enduit de plâtre	1.5 cm	0.015×1200	18
Total G	-	-	642 kg/m²
Surcharge exploitation	-	-	100 kg/m²

Tableau III.5 : Descente des charges Plancher terrasse inaccessible

3-Maçonnerie :

Élément	Épaisseur	Calcul	Charge (kg/m ²)
Brique creuse	15 cm	0.15×1400	210
Brique creuse	10 cm	0.10×1400	140
Enduit mortier ciment	2 cm	0.02×2000	40
Enduit plâtre	2 cm	0.02×1200	24
Total G	-	-	414 kg/m²

Tableau III.6 : surcharge de la Maçonnerie

Poids propre du mur : $P = 70\% \times 414 \times 1.0 \times (3.20 - 0.40) = 810 \text{ kg/m}$

Reconnaissance du Sol d'Assise :

Élément	Valeur
Type de sol	Meuble
Taux de travail du sol	1.00 bar
Profondeur d'ancrage	-1.20 m
Type de fondation	Semelles isolées

Tableau III.4 : Reconnaissance du Sol d'Assise

III.2.2 Modélisation et analyse de la structure :

La modélisation et l'analyse structurale constituent des étapes essentielles dans l'étude des structures en béton armé. Elles permettent de représenter le comportement réel de l'ouvrage et de déterminer les sollicitations internes ainsi que les déplacements sous l'effet des différentes charges appliquées. Cette démarche repose sur l'utilisation d'outils numériques basés sur la méthode des éléments finis, garantissant une évaluation précise des performances structurales.

III.2.2.1 Modélisation de la structure :

La modélisation consiste à représenter le comportement réel de la structure à l'aide d'un modèle numérique basé sur la méthode des éléments finis. Elle a été réalisée à l'aide du logiciel SAP2000, permettant de déterminer avec précision les efforts internes et les déplacements, tout en tenant compte des propriétés des matériaux, des charges appliquées et des conditions aux limites. La modélisation de la structure a été réalisée sur le logiciel SAP2000 selon les étapes suivantes :

1. Création de la géométrie : La structure a été modélisée en 3D en respectant les dimensions réelles de l'ouvrage, les nœuds ont été définis en fonction de la configuration des poteaux, poutres et dalles, avec 143 barres et 90 nœuds.
2. Définition des matériaux : Deux matériaux principaux ont été introduits : Béton armé avec ses caractéristiques mécaniques (résistance à la compression, module d'élasticité). Acier de renforcement avec ses propriétés élastiques.
3. Définition des sections : Les sections des éléments structuraux ont été attribuées comme suit : Poteaux, Poutres, chainage et les diaphragmes des planchers.
4. Conditions aux limites : Les appuis de la structure ont été modélisés comme des encastremements afin de reproduire le comportement réel de l'ouvrage au niveau des fondations.
5. Application des charges Les charges ont été introduites conformément aux normes :
 - Poids propre automatique du logiciel
 - Charges permanentes supplémentaires
 - Charges d'exploitation
6. Lancement de l'analyse : Une analyse linéaire statique et modale a été effectuée afin de déterminer : Les déplacements globaux Les efforts internes Les modes propres de vibration

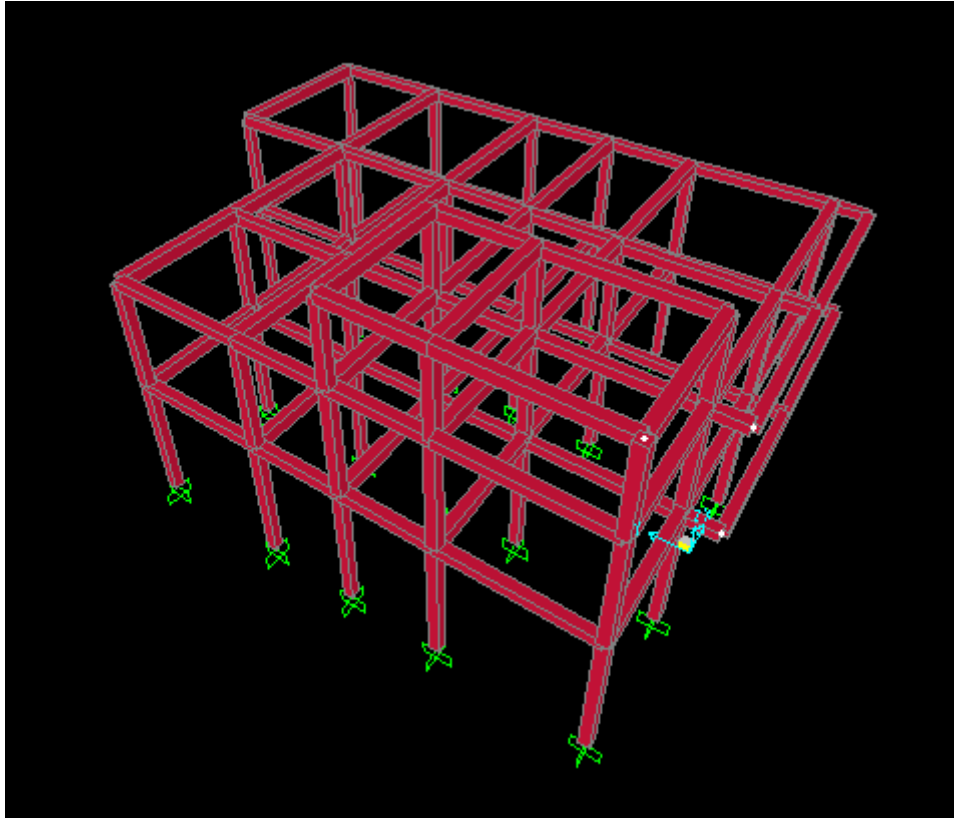


Figure III.5 : vue en 3D

III.2.2.2 Analyse de la structure :

Dans le cadre de l'étude et de la vérification des structures en béton armé, l'analyse du comportement structural constitue une étape essentielle permettant d'évaluer la sécurité et la performance de l'ouvrage. Cette analyse repose principalement sur deux approches complémentaires : l'analyse statique et l'analyse dynamique.

1. Les modes propres :

L'analyse modale réalisée sous SAP2000 permet de déterminer les modes propres de vibration d'une structure, qui représentent ses différentes formes de déformation sous une action dynamique (translations selon X et Y, et torsion). Chaque mode est caractérisé par une période propre, traduisant la souplesse ou la rigidité de la structure. La participation massique quantifie la contribution de chaque mode dans la réponse dynamique globale selon les directions principales. La figure ci-dessous (III.6) montre : Résultats de l'analyse modale : périodes propres et masses participantes cumulées.

Modal Participating Mass Ratios

File View Format-Filter-Sort Select Options

Units: As Noted Modal Participating Mass Ratios

	OutputCase Text	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless	SumUX Unitless	SumUY Unitless
	MODAL	Mode	1	0.670009	0.04194	0.7989	0.00001293	0.04194	0.7989
	MODAL	Mode	2	0.638363	0.65769	0.11409	0.000002729	0.69964	0.91299
▶	MODAL	Mode	3	0.579147	0.25619	0.03268	0.000002721	0.95583	0.94567
	MODAL	Mode	4	0.209802	0.00067	0.04762	0.000053	0.9565	0.99329
	MODAL	Mode	5	0.204656	0.03177	0.00353	0.000003311	0.98826	0.99682
	MODAL	Mode	6	0.188215	0.01125	0.00186	0.00001651	0.99951	0.99868
	MODAL	Mode	7	0.13248	0.00014	0.00085	0.00000837	0.99965	0.99954
	MODAL	Mode	8	0.123124	0.00017	0.00002641	0.00001263	0.99982	0.99956
	MODAL	Mode	9	0.120187	0.00018	0.00015	0.00003618	1	0.99971
	MODAL	Mode	10	0.078315	0.00000002543	0.00021	0.02159	1	0.99992
	MODAL	Mode	11	0.063484	0.0000001411	0.00003332	0.00002642	1	0.99995
	MODAL	Mode	12	0.060887	0.00000003292	0.00000301	0.01769	1	0.99996

Record: 15 of 24

Add Tables... Done

Figure III.6: Résultats de l'analyse modale : périodes propres et masses participantes cumulées.

Les résultats obtenus montrent que les masses participantes cumulées atteignent 95,58 % selon X et 94,56 % selon Y, dépassant le seuil minimal de 90 %. Cela indique que les modes retenus (principalement des modes de translation) représentent correctement le comportement dynamique global de la structure, et que l'analyse modale est suffisamment convergée. Le mode 1 est dominant suivant la direction Y avec une période de 0.670 s, tandis que le mode 2 correspond principalement à la direction X avec une période de 0.638 s. La somme des masses participantes dépasse 90 % dès les trois premiers modes dans les deux directions, ce qui indique une bonne représentation dynamique de la structure.

2. Moment fléchissant (M) :

La figure (III.7 & III.8) ci-dessous présente la distribution des moments fléchissant (M) dans les éléments de la structure, résultant des combinaisons de charges les plus défavorables. Ces moments permettent d'identifier les zones critiques en flexion nécessitant une vérification ou un renforcement.

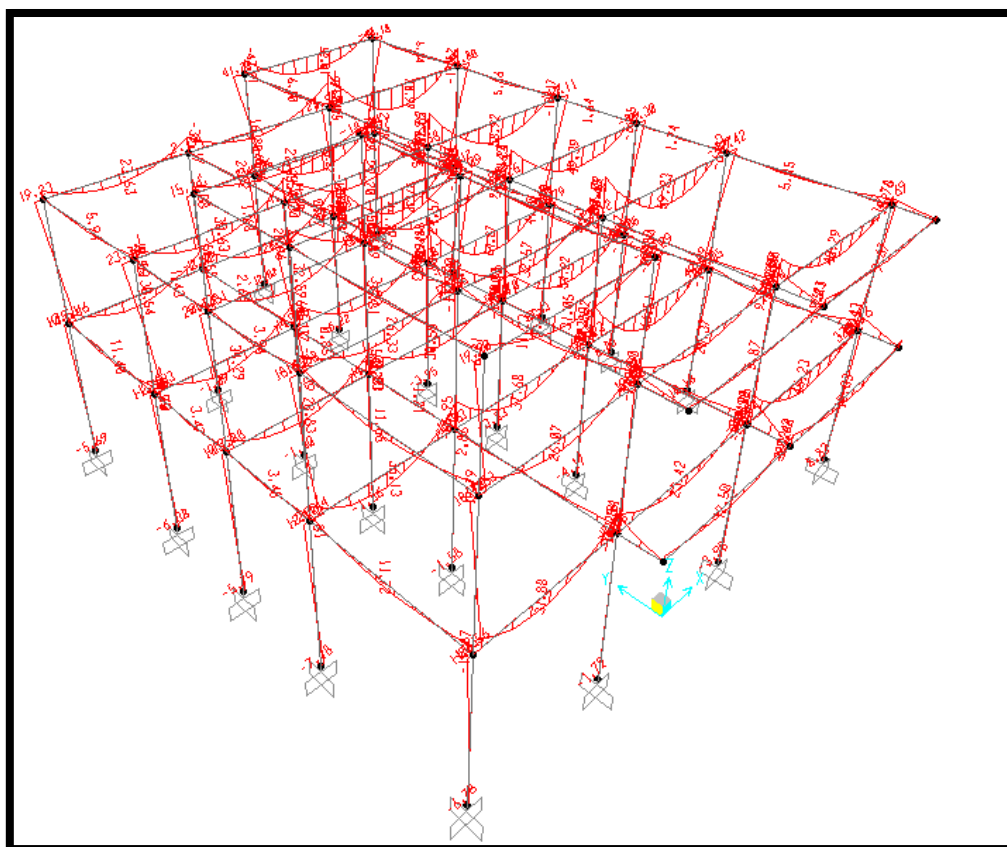


Figure III.7 : Moment fléchissant (M) A ELU

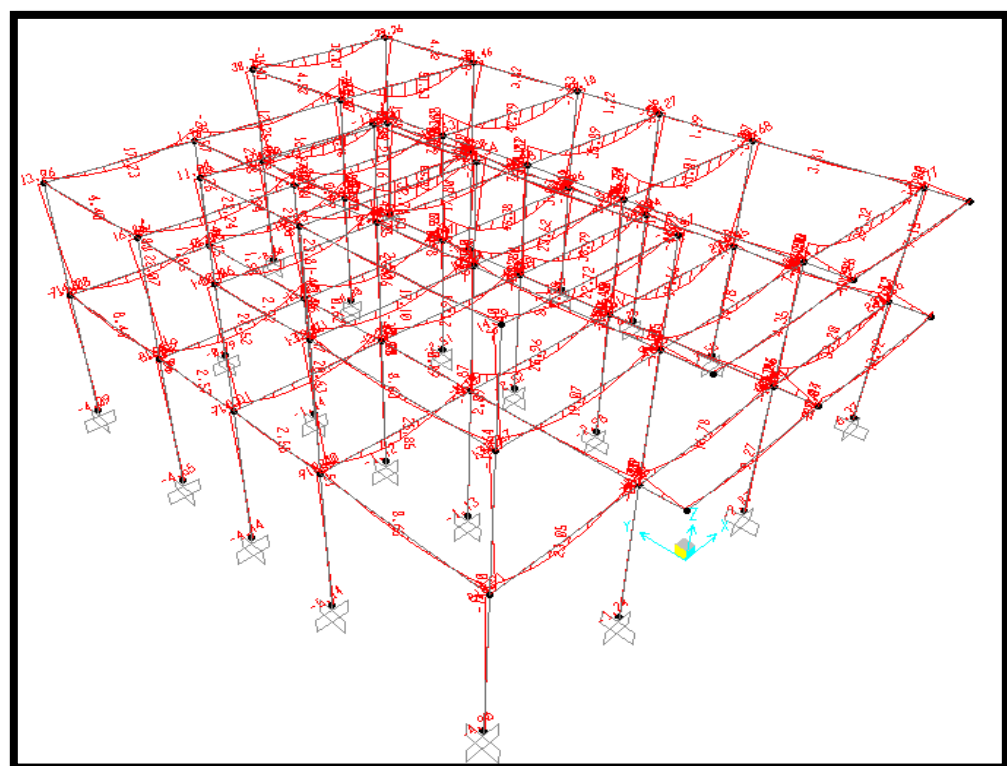


Figure III.8 : Moment fléchissant (M) A ELS

3. Effort normal (N) :

La figure (III.9 & III.10) ci-dessous illustre la répartition des efforts normaux (N) dans les éléments structuraux. Ces efforts traduisent les sollicitations de traction ou de compression et sont essentiels pour la vérification de la capacité portante des éléments.

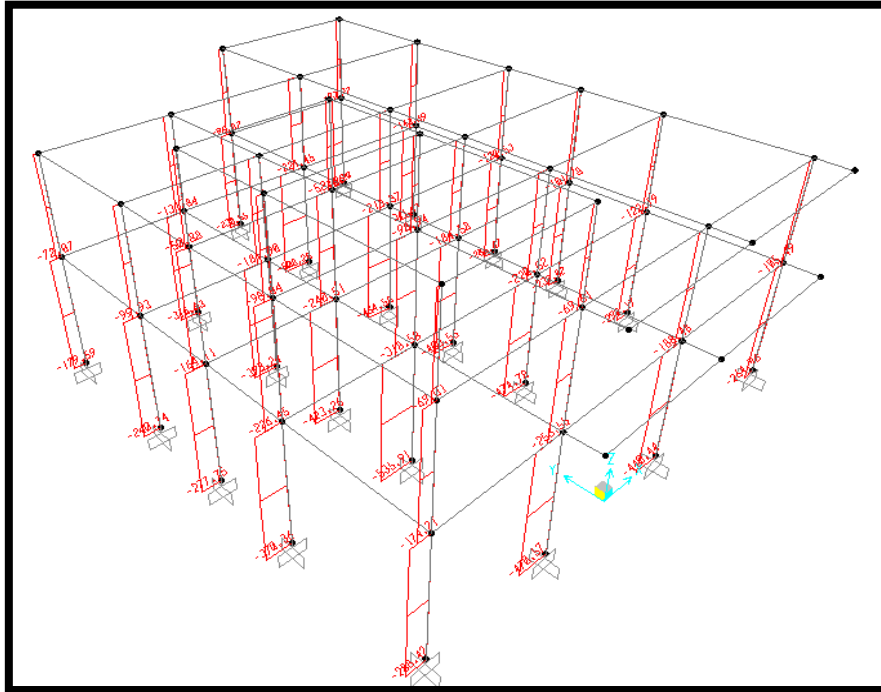


Figure III.9 : Effort normal (N) A ELU

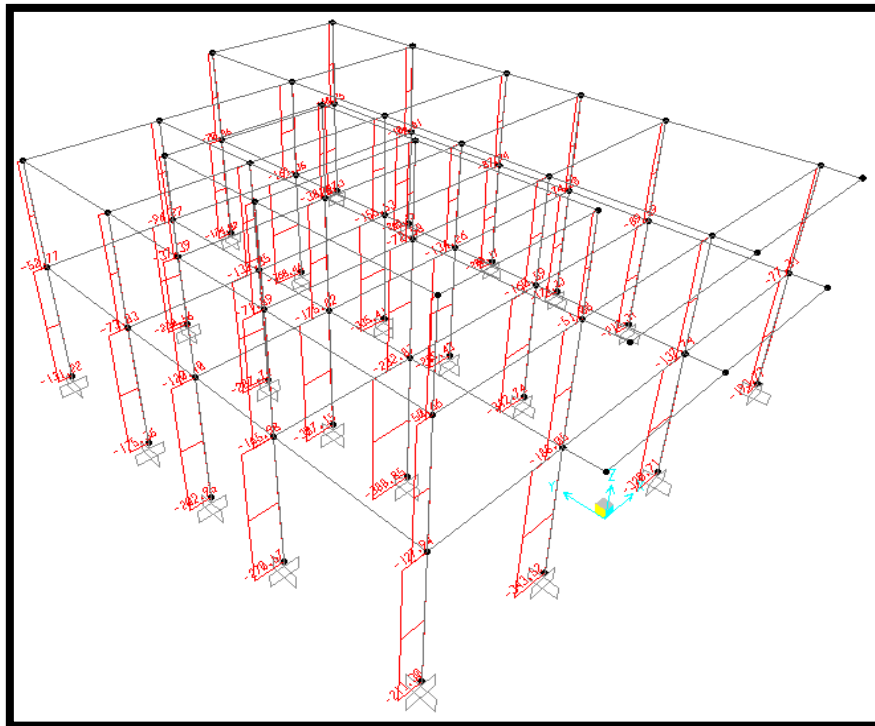


Figure III.10 : Effort normal (N) A ELS

4. Effort tranchant (V) :

La figure ci-dessous montre la distribution des efforts tranchants (V) au sein de la structure. Ces efforts sont déterminants pour l'évaluation du cisaillement et la vérification de la résistance des sections, notamment au niveau des zones critiques.

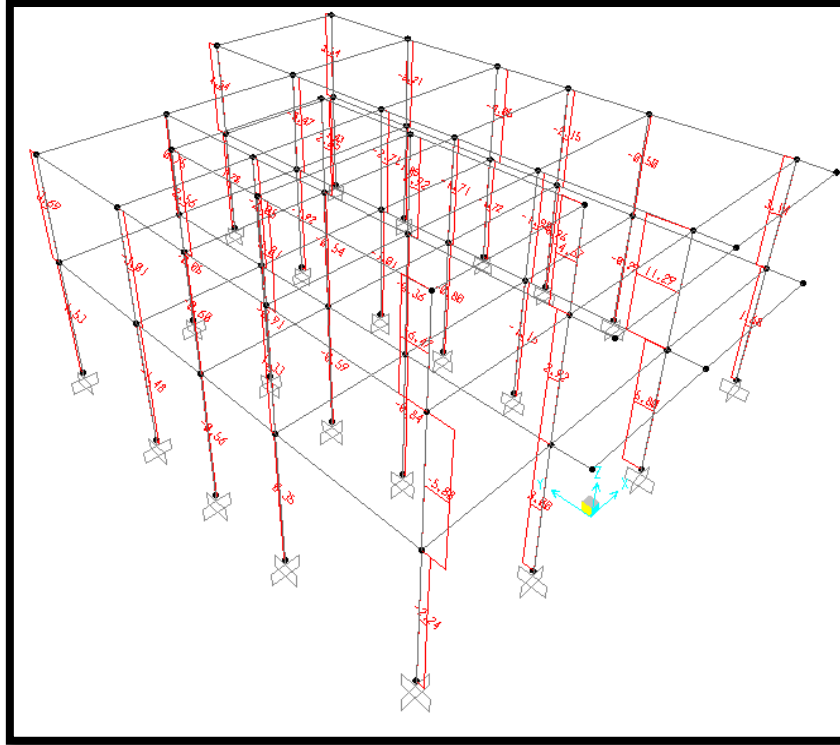


Figure III.11 : Effort tranchant (V) A ELU

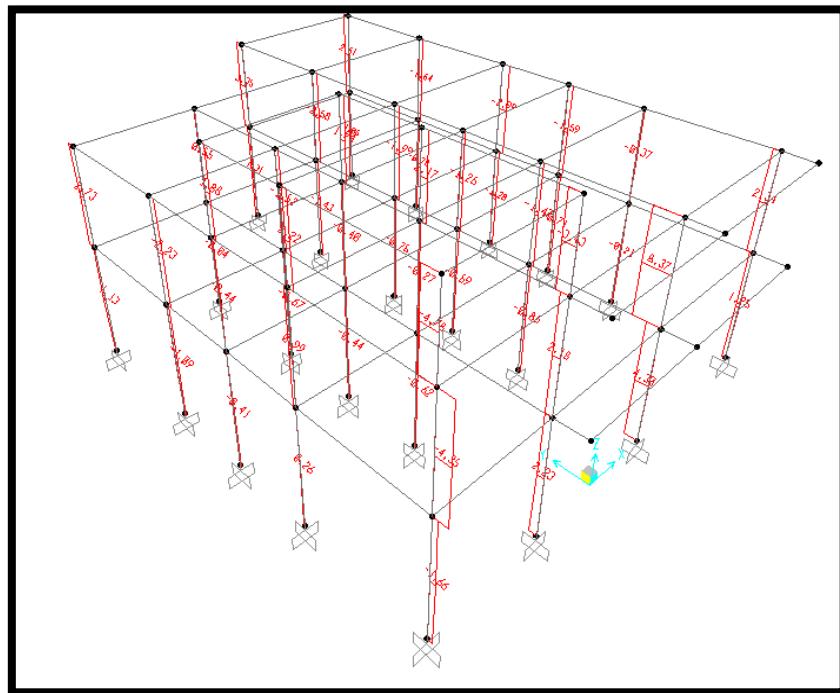


Figure III.12 : Effort tranchant (V) A ELS

5. Les déplacements inter-étages :

Les déplacements inter-étages ont été vérifiés conformément aux exigences du RPA 2024 (§5.10). Le déplacement relatif obtenu par l'analyse est comparé au déplacement limite admissible donné par :

$$V_A \cdot \Delta_K \leq \bar{\Delta}_K$$

Pour les bâtiments en béton armé, la limite imposée par le RPA 2024 est :

$$\bar{\Delta}_K = 0.0075 h_K$$

Cette valeur reste largement inférieure à la limite admissible imposée par le RPA 2024, donc :

ELA1 :

$$\begin{aligned} \bar{\Delta}_K &= 0.0075 h_K \\ 0,0075 \times 4,05 &= 0,030 \text{ m} = 30,375 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Premier étage : $V_A \cdot \Delta_K = 0.0238 \text{ mm}$
- Deuxième étage : $V_A \cdot \Delta_K = 0,0627 \text{ mm}$
- Troisième étage : $V_A \cdot \Delta_K = 0,086 \text{ mm}$

ELA2 :

$$\begin{aligned} \bar{\Delta}_K &= 0.0075 h_K \\ 0,0075 \times 4,05 &= 0,030 \text{ m} = 30,357 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Premier étage : $V_A \cdot \Delta_K = 0.086 \text{ mm}$
- Deuxième étage : $V_A \cdot \Delta_K = 0,063 \text{ mm}$
- Troisième étage : $V_A \cdot \Delta_K = 0,09 \text{ mm}$

La condition de stabilité et de limitation des déplacements inter-étages est vérifiée.

III.2.2.3 Vérification de la résistance des éléments de la structure :

La vérification de la résistance des éléments de la structure constitue une étape fondamentale de l'analyse structurale en génie civil, visant à évaluer le comportement des éléments sous l'effet des différentes sollicitations et à vérifier leur conformité aux exigences de sécurité, afin de conclure sur la nécessité éventuelle d'un renforcement par chemisage. On présente ci-dessous les différentes étapes de cette vérification :

1. Les poteaux :

Lorsque les poteaux ne satisfont pas aux vérifications de résistance, un renforcement par chemisage s'avère nécessaire. Dans notre cas (Figure III.11), le ratio de résistance est supérieur à 1,0, ce qui rend le chemisage indispensable.

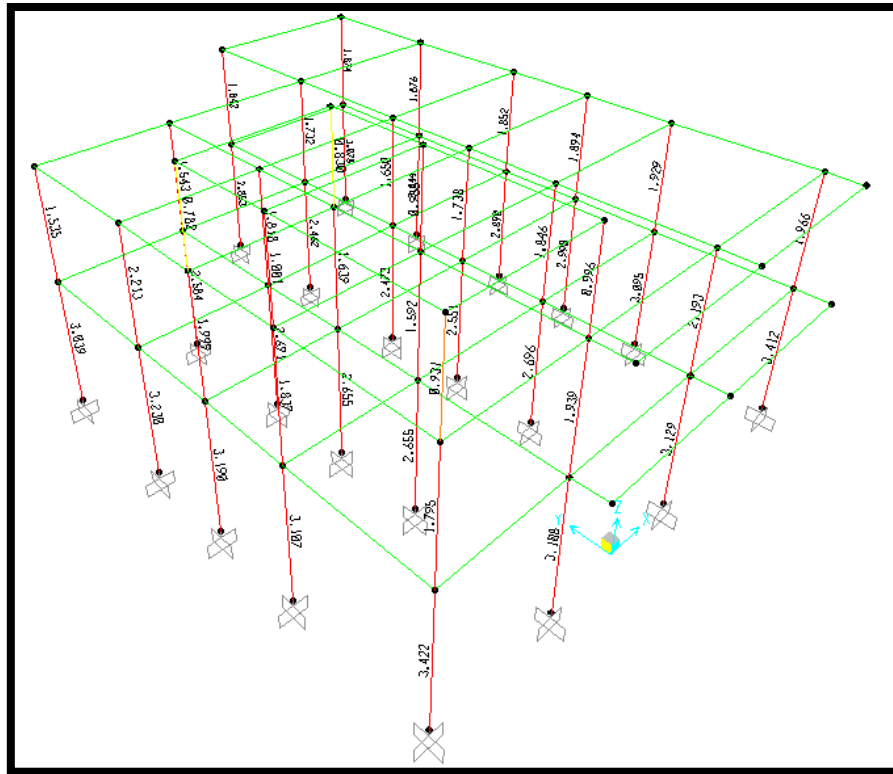


Figure III.13 : Vérification du ratio de résistance des poteaux

2. Les poutres principales et les chaînages :

Lorsque les poutres principales et les chaînages ne satisfont pas aux vérifications de résistance ou que le ferrailage requis dépasse le ferrailage existant, le renforcement par chemisage s'impose. Les figures (III.12 - III.13 - III.14) ci-dessous montrent une insuffisance du ferrailage requis :

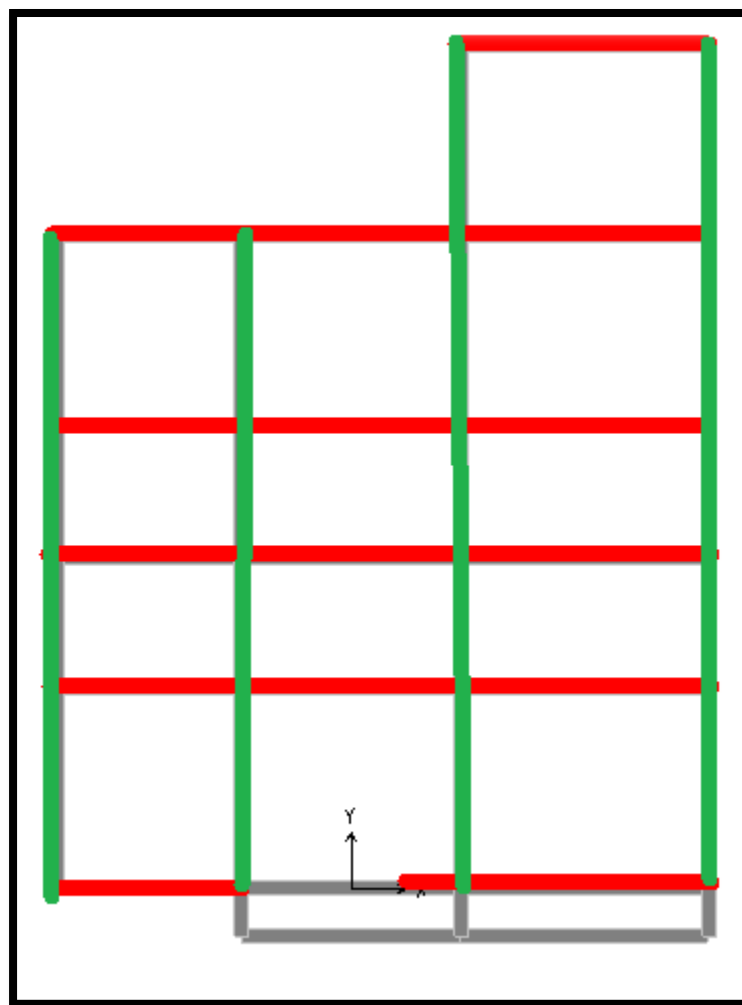


Figure III.14 : Vérification du ferrailage des poutres principales et des chaînages ($Z=4.05$ m)

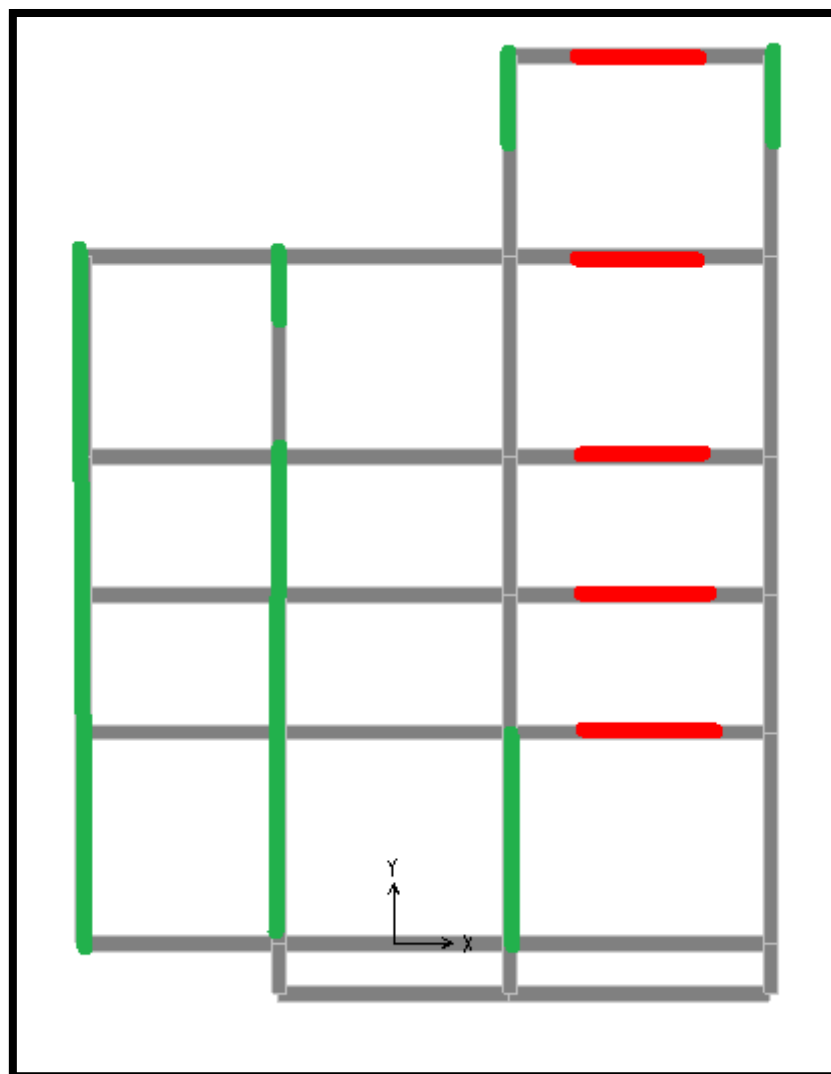


Figure III.15 : Vérification du ferrailage des poutres principales et des chaînages ($Z=7.45$ m)

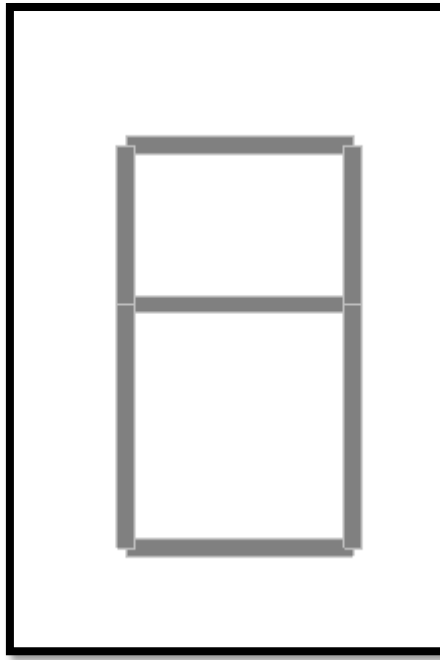


Figure III.16 : Vérification du ferrailage des poutres principales et des chaînages (Z=9.9 m)

III.2.3 Proposition de renforcement par chemisage en béton armé :

Suite aux résultats de vérification de la structure existante, il s'est avéré nécessaire d'adopter de nouvelles sections de coffrage et de ferrailage afin de répondre aux exigences de résistance et de sécurité.

III.2.3.1 Chemisage des poteaux :

Le renforcement des poteaux est réalisé par augmentation de leur section transversale à l'aide d'un chemisage en béton armé. Cette technique permet d'améliorer la résistance en compression, en flexion ainsi que la ductilité de l'élément.

Hypothèses :

Section initiale : $30 \times 30 \text{ cm}^2$ (8T12)

Section renforcée : $44 \times 44 \text{ cm}^2$, Épaisseur du chemisage (dans chaque cote) : 7cm

Avec Ferrailage :

- **Armatures longitudinales :** ajout de 12 barres HA Ø16 (12T16)
- **Étriers (cadres) :** T8 mm espacés de 10 cm A 15 cm

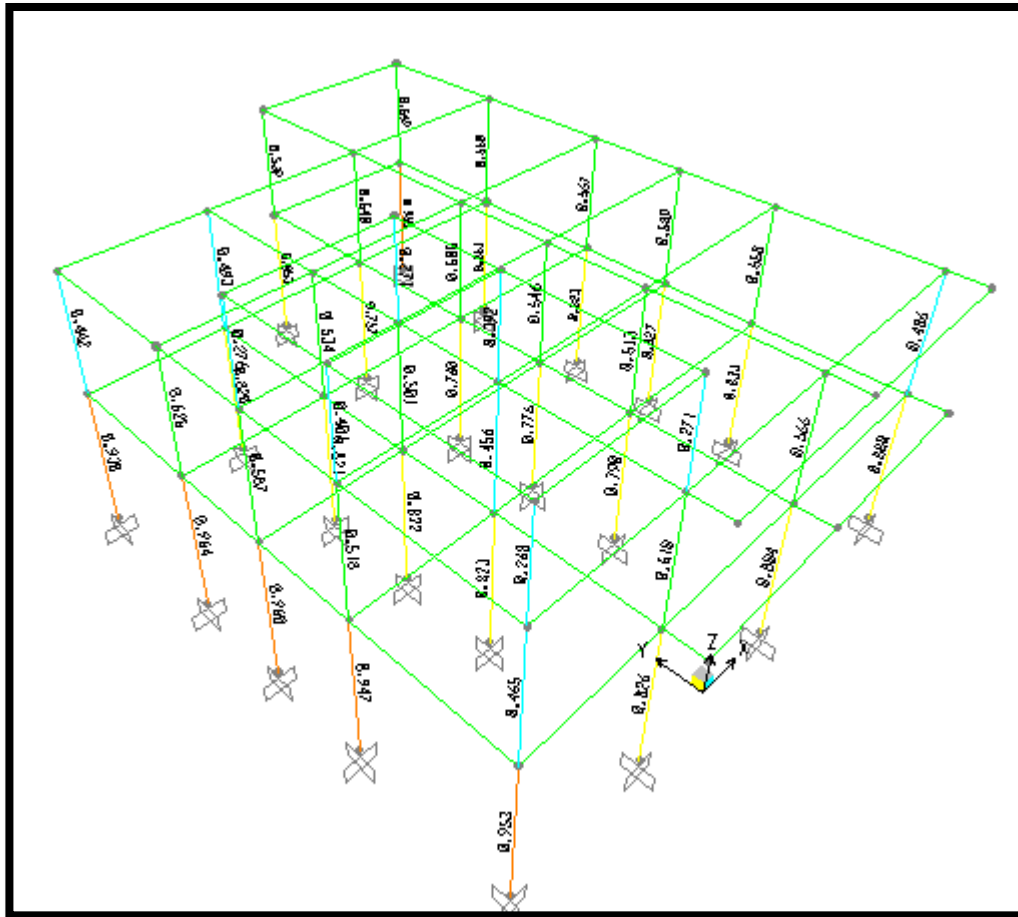


Figure III.17 : Vérification de la résistance des poteaux (ratio<1,0) après chemisage

Dans cette étude, les résultats obtenus montrent que les ratios de vérification des poteaux restent inférieurs à 1,0, ce qui confirme que les sections adoptées ainsi que le ferrailage proposé assurent une résistance suffisante vis-à-vis des sollicitations de calcul.

III.2.3.2 Chemisage des poutres :

Les poutres présentant des insuffisances en flexion ou en cisaillement sont renforcées par chemisage en béton armé. Cette opération consiste à augmenter la section résistante et à ajouter des armatures complémentaires afin d'améliorer leur capacité portante.: renfort en bas (flexion) étriers (cisaillement)

Hypothèses :

Section initiale : $40 \times 30 \text{ cm}^2$ (au niveau des appuis : 9T14, en mi-travée : 6T14)

Section renforcée : $50 \times 44 \text{ cm}^2$

Avec Ferrailage :

- **Armatures longitudinales** : ajout de 4 barres HA Ø20 (4T20)
- **Étriers (cadres)** : T8 mm espacés de 10 cm A 15cm.

III.2.3.3 Chemisage des chainages :

Les chaînages insuffisants en flexion ou en cisaillement sont renforcés par chemisage en béton armé, avec ajout d'armatures longitudinales en partie tendue et d'étriers pour reprendre le cisaillement.

Hypothèses :

Section initiale : $30 \times 30 \text{ cm}^2$ (3T14,3T12)

Section renforcée : $40 \times 40 \text{ cm}^2$

Avec Ferrailage :

- **Armatures longitudinales** : ajout de 4 barres HA Ø14 (4T14)
- **Étriers (cadres)** : T8 mm espacés de 10 cm A 15cm.

III.2.4 Vérification de la résistance des éléments renforcés par chemisage de la structure :

Après le renforcement par chemisage, une nouvelle analyse de la structure est réalisée afin de vérifier l'efficacité de la solution proposée. Une nouvelle modélisation de la structure renforcée a été réalisée à l'aide du logiciel (SAP2000), en tenant compte des nouvelles sections et des caractéristiques mécaniques. Les sections renforcées vérifient les conditions de résistance aux états limites ultimes et de service ainsi qu'aux actions sismiques.

1. Les modes propres :

La figure (III.18) illustre les résultats de l'analyse modale, en présentant les périodes propres ainsi que les masses participantes cumulées.

	OutputCase Text	StepType Text	StepNum Unitless	Period Sec	UX Unitless	UY Unitless	UZ Unitless	SumUX Unitless	SumUY Unitless
▶	MODAL	Mode	1	0.361797	0.07754	0.70287	0.0000003696	0.07754	0.70287
	MODAL	Mode	2	0.348686	0.76291	0.1404	0.00000001938	0.84045	0.84327
	MODAL	Mode	3	0.317321	0.09816	0.09153	0.00000002212	0.93861	0.9348
	MODAL	Mode	4	0.111219	0.0000739	0.05575	0.0000005509	0.93868	0.99055
	MODAL	Mode	5	0.109063	0.05368	0.00035	0.0000003581	0.99236	0.99089
	MODAL	Mode	6	0.10012	0.00561	0.00665	0.00000003933	0.99798	0.99754
	MODAL	Mode	7	0.074619	0.00038	0.00171	0.00000005717	0.99836	0.99926
	MODAL	Mode	8	0.07162	0.00123	0.00014	0.000000311	0.99959	0.9994
	MODAL	Mode	9	0.06681	0.00041	0.0006	0.0000005568	1	1
	MODAL	Mode	10	0.036908	0.0000002703	0.0000003234	0.15985	1	1
	MODAL	Mode	11	0.033175	0.00000002611	0.00000005106	0.0415	1	1
	MODAL	Mode	12	0.032936	0.00000001302	0.00000001153	0.10229	1	1

Figure III.18: Résultats de l'analyse modale : périodes propres et masses participantes cumulées.

Les résultats obtenus montrent que les masses participantes cumulées atteignent environ 99,99 % selon la direction X et 100 % selon la direction Y, dépassant largement le seuil minimal de 90 % exigé par le RPA. Cela indique que les modes retenus représentent correctement le comportement dynamique global de la structure et que l'analyse modale est suffisamment convergée. Le premier mode est principalement translatore suivant la direction Y, avec une période de 0,363 s, tandis que le deuxième mode correspond essentiellement à une translation suivant la direction X, avec une période de 0,334 s. Par ailleurs, la somme des masses participantes dépasse 90 % dès les trois premiers modes dans les deux directions principales, ce qui confirme une bonne représentation dynamique de la structure.

2. Moment fléchissant (M) :

La figure (III.20 & III. 21) ci-dessous présente la distribution des moments fléchissant (M) dans les éléments de la structure.

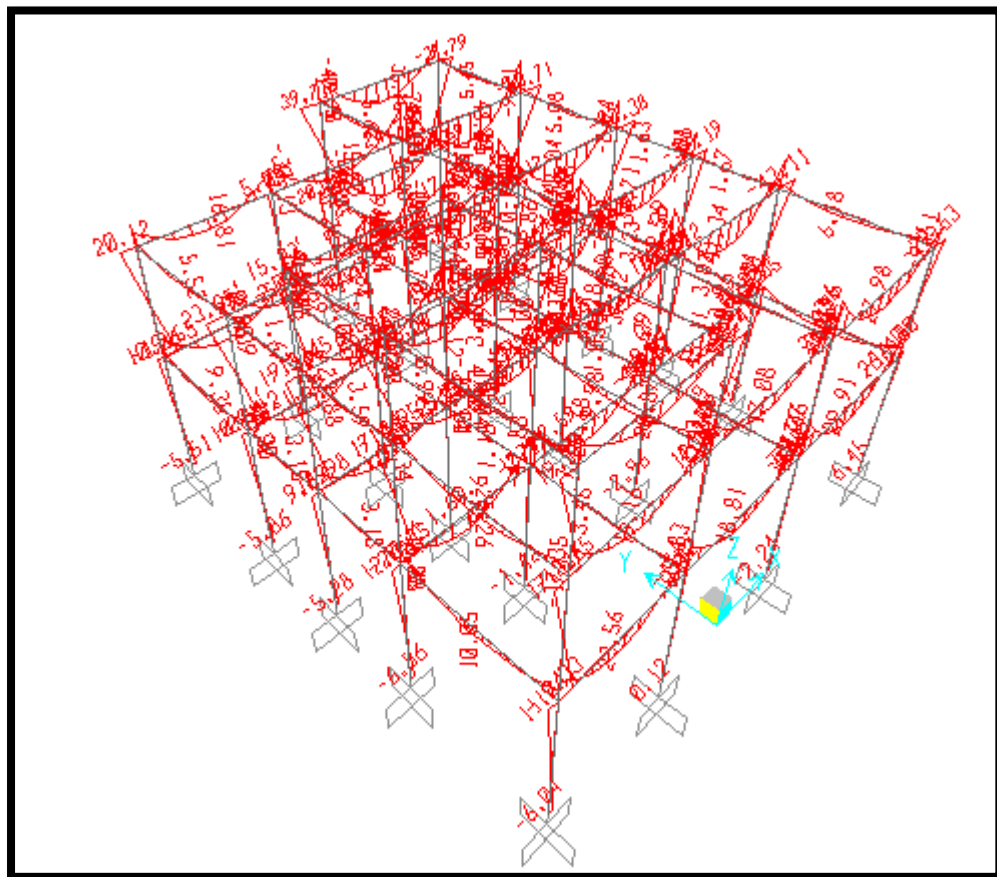


Figure III.19 : Moment fléchissant (M) A ELS

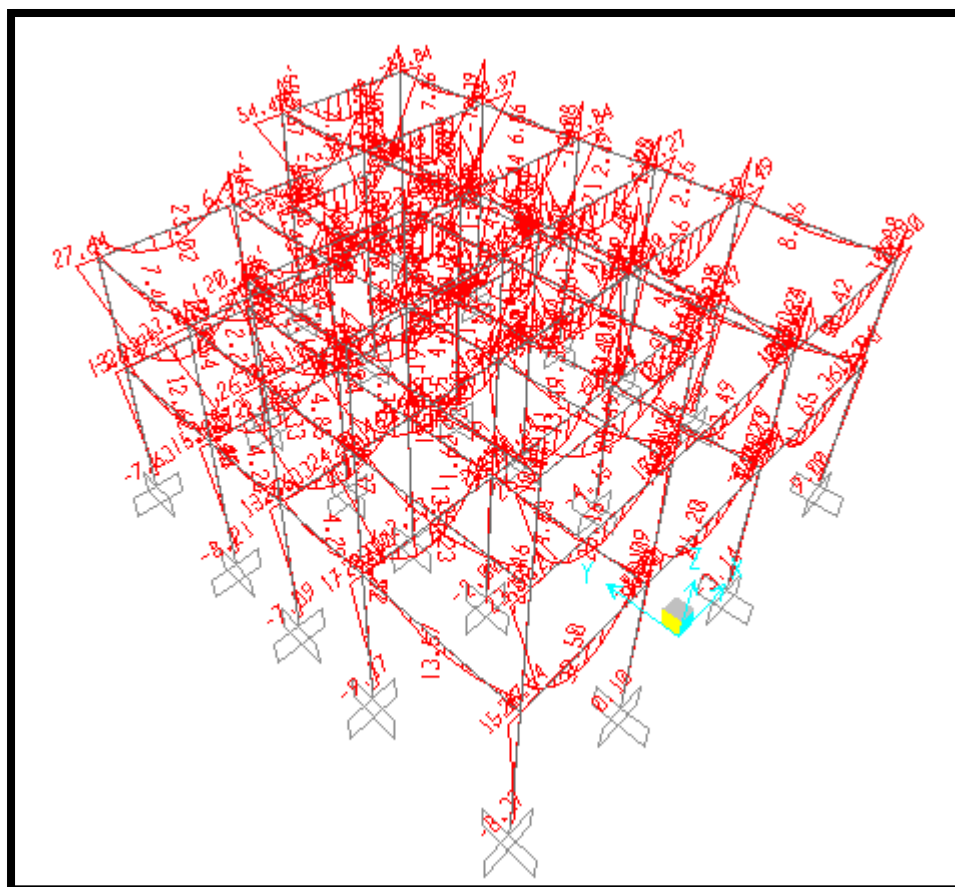


Figure III.20 : Moment fléchissant (M) A ELU

3. Effort normal (N) :

La figure (III.21 & III.22) ci-dessous illustre la répartition des efforts normaux (N) dans les éléments structuraux.

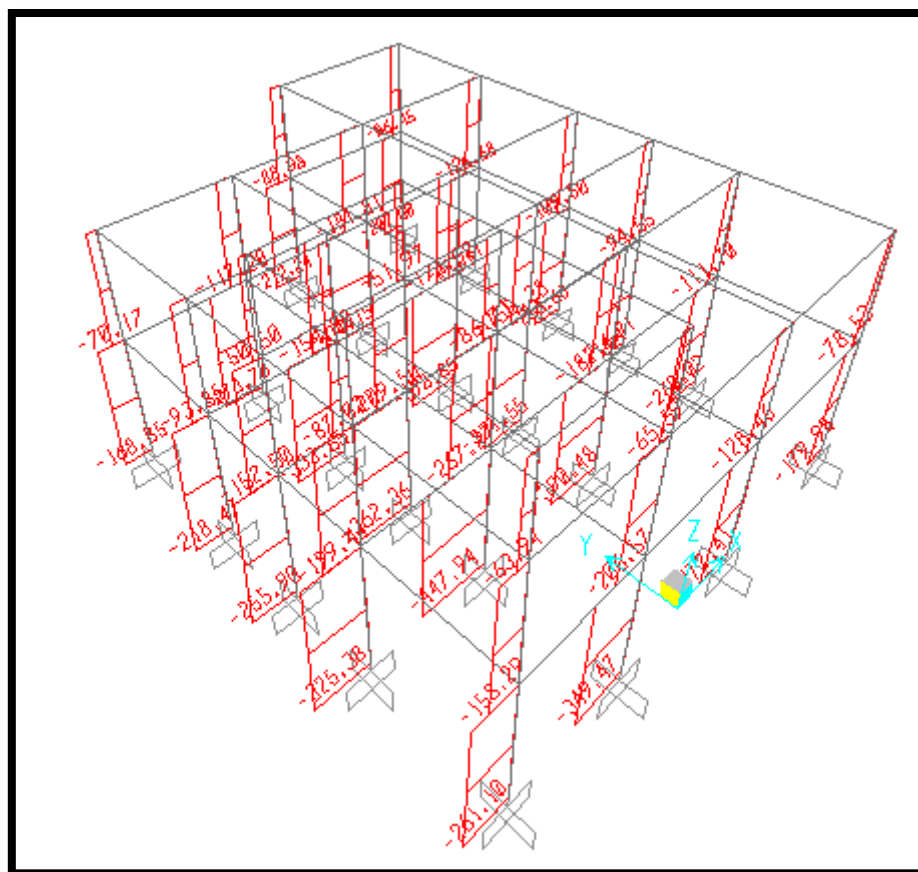


Figure III.21 : Effort normal (N) A ELS

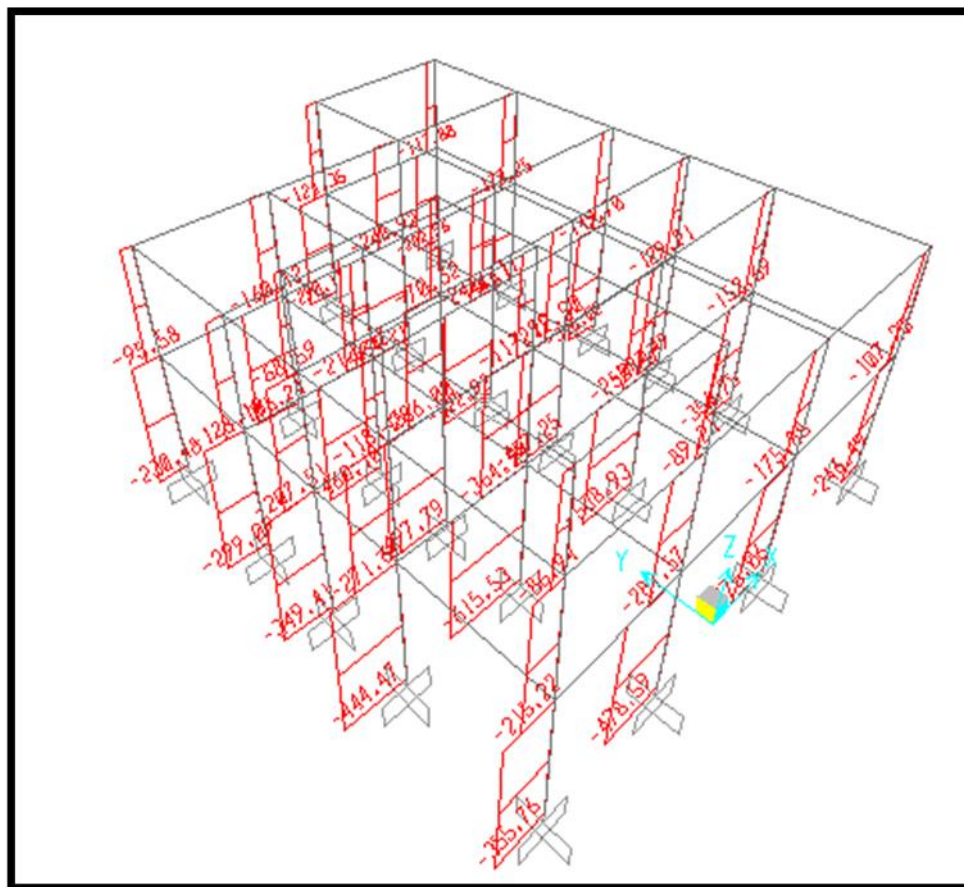


Figure III.22 : Effort normal (N) A ELU

4. Effort tranchant (V) :

La figure (III.23 & III.24) ci-dessous montre la distribution des efforts tranchants (V) au sein de la structure.

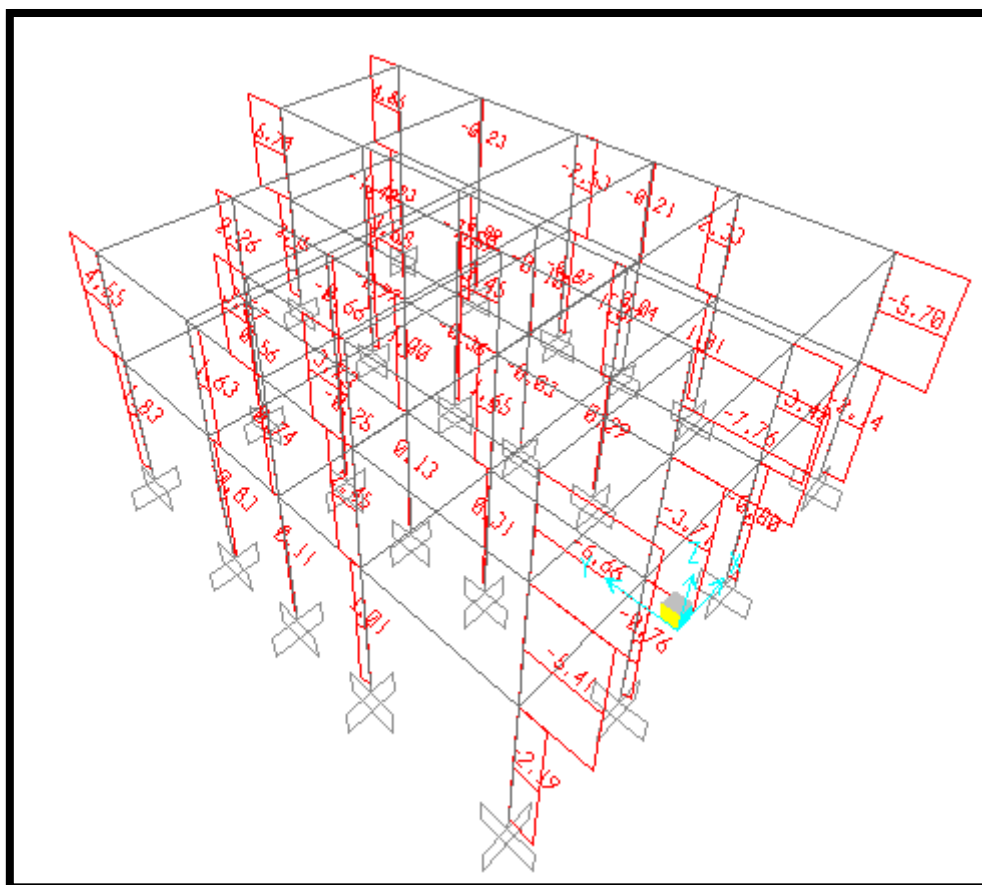


Figure III.23 : Effort tranchant (V) A ELS

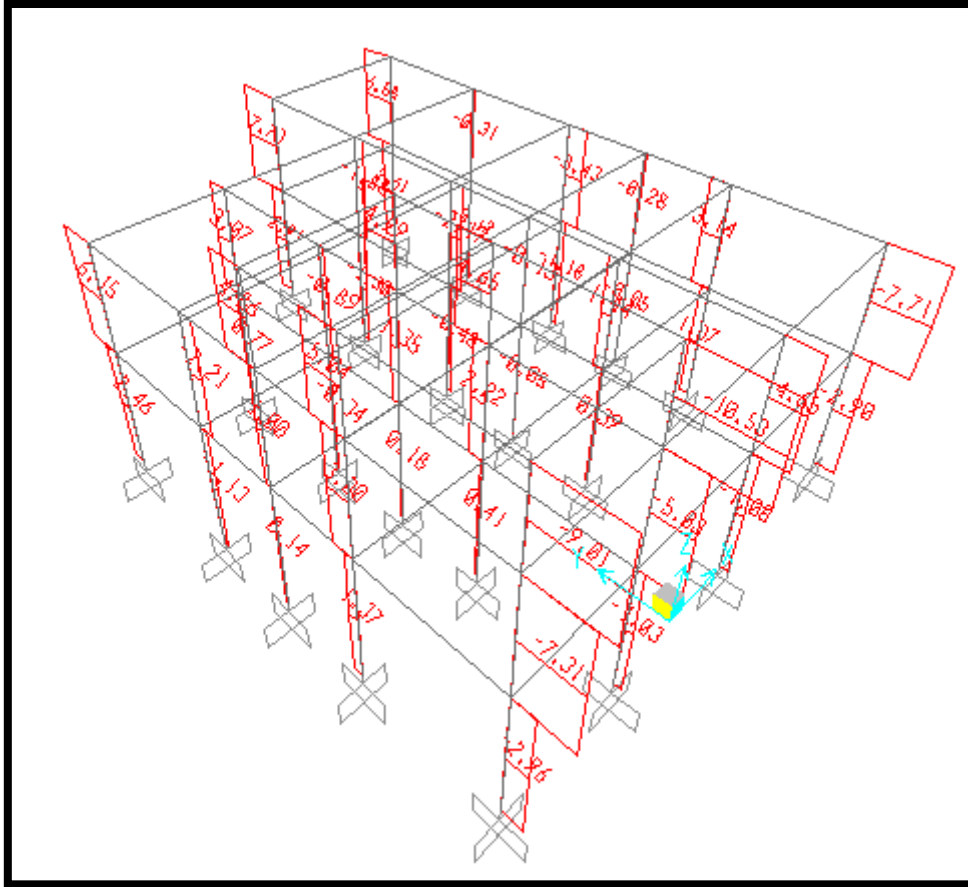


Figure III.24 : Effort tranchant (V) A ELU

6. Les déplacements inter-étages :

Les déplacements inter-étages ont été vérifiés conformément aux exigences du RPA 2024 (§5.10). Le déplacement relatif obtenu par l'analyse est comparé au déplacement limite admissible donné par :

$$V_A \cdot \Delta_K \leq \bar{\Delta}_K$$

Pour les bâtiments en béton armé, la limite imposée par le RPA 2024 est :

$$\bar{\Delta}_K = 0.0075 h_K$$

Cette valeur reste largement inférieure à la limite admissible imposée par le RPA 2024, donc :

ELA 1 :

$$0,0075 \times 4,05 = 0,030 \text{ m} = 30,375 \text{ mm}$$

- Premier étage : $V_A \cdot \Delta_K = 0,088 \text{ mm}$
- Deuxième étage : $V_A \cdot \Delta_K = 2,912 \text{ mm}$
- Troisième étage : $V_A \cdot \Delta_K = 3,074 \text{ mm}$

ELA 2 :

$$0,0075 \times 4,05 = 0,030 \text{ m} = 30,375 \text{ mm}$$

- Premier étage : $V_A \cdot \Delta_K = 0,08 \text{ mm}$
- Deuxième étage : $V_A \cdot \Delta_K = 2,91 \text{ mm}$

- Troisième étage : $V_A \cdot \Delta_K = 3,07 \text{ mm}$

La condition de stabilité et de limitation des déplacements inter-étages est vérifiée.

Vérification des déplacements relatifs des étages :

La limite réglementaire du déplacement relatif inter-étage selon le RPA est donnée par :

$$\bar{\Delta}_K = 0.0075 h_K$$

Avec : $h_K = 4,05 \text{ m}$ Donc : $V_A \cdot \Delta_K \leq \bar{\Delta}_K$

$$\bar{\Delta}_K = 0,0075 \times 4,05 = 0,0303 \text{ m} = 30,375 \text{ mm}$$

Les déplacements obtenus pour les deux structures sont résumés ci-dessous.

Structure : Avec chemisage

Cas ELA1 :

- Premier étage : $V_A \cdot \Delta_K = 0,0238 \text{ mm}$

- Deuxième étage : $V_A \cdot \Delta_K = 0,0627 \text{ mm}$

- Troisième étage : $V_A \cdot \Delta_K = 0,086 \text{ mm}$

Cas ELA2 :

- Premier étage : $V_A \cdot \Delta_K = 0,086 \text{ mm}$

- Deuxième étage : $V_A \cdot \Delta_K = 0,063 \text{ mm}$

- Troisième étage : $V_A \cdot \Delta_K = 0,09 \text{ mm}$

Les déplacements restent très inférieurs à la limite admissible de 30,3 mm, ce qui montre que la structure renforcée par chemisage présente une bonne rigidité latérale et un comportement satisfaisant vis-à-vis des exigences du RPA.

Structure : Sans chemisage

Cas ELA1 & ELA2 :

- Premier étage : $V_A \cdot \Delta_K = 0,088 \text{ mm}$

- Deuxième étage : $V_A \cdot \Delta_K = 2,912 \text{ mm}$

- Troisième étage : $V_A \cdot \Delta_K = 3,074 \text{ mm}$

Malgré l'augmentation des déplacements par rapport à la structure renforcée, les valeurs obtenues demeurent inférieures à la limite réglementaire de 30,3 mm. Cependant, la structure sans chemisage présente des déplacements plus importants, traduisant une rigidité plus faible et une vulnérabilité plus élevée aux actions sismiques.

III.2.5 Mise en œuvre des opérations de chemisage en béton armé :

La mise en œuvre du chemisage en béton armé comprend plusieurs étapes essentielles : préparation de la surface (piquage et nettoyage), mise en place des armatures, coffrage, coulage du béton et cure. Une bonne adhérence entre l'ancien et le nouveau béton est indispensable pour garantir l'efficacité du renforcement.

1. Préparation de la surface piquage du béton existant nettoyage création de rugosité.
2. Liaison ancien / nouveau béton application d'un produit d'adhérence ou barres d'ancrage.
3. Mise en place des armatures installation des nouvelles barres respect des enrobages.
4. Coffrage mise en place du coffrage autour de l'élément.
5. Coulage du béton de bonne qualité vibration correcte.
6. Cure maintien de l'humidité pour éviter fissuration.

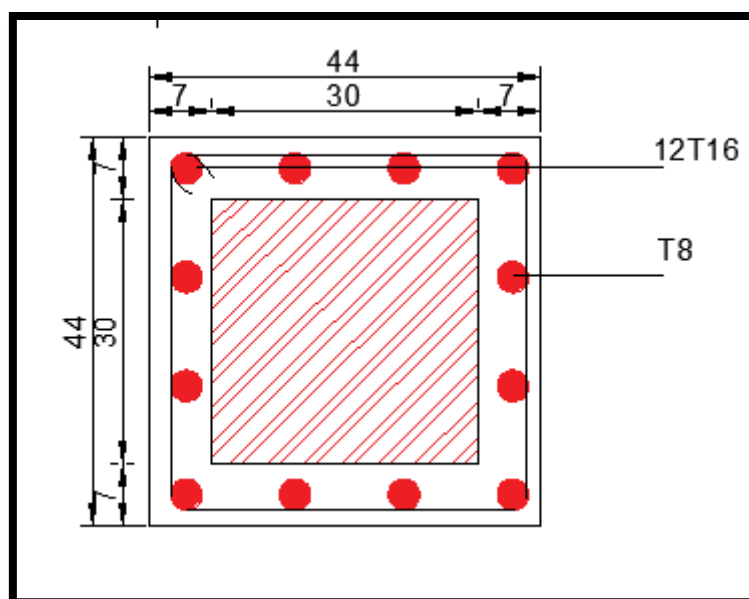


Figure III.25 : chemisage des poteaux

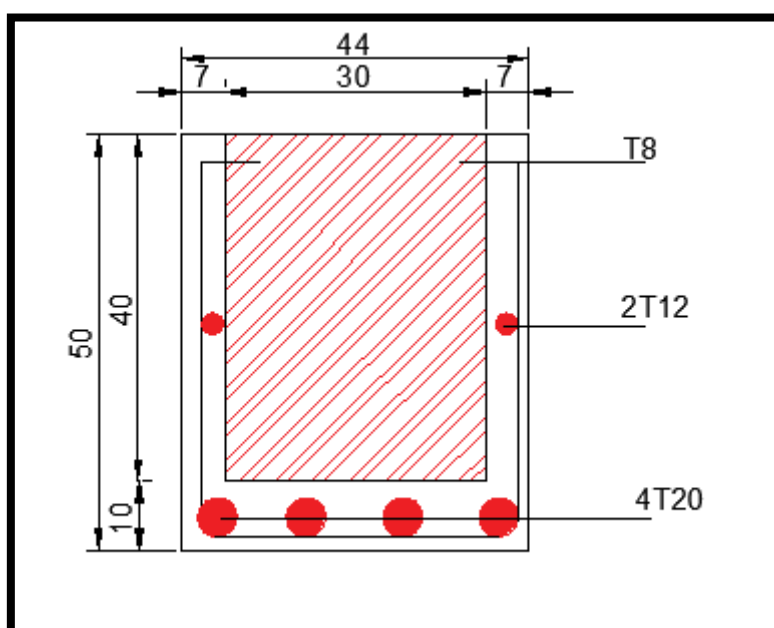


Figure III.26 : chemisage des poutres

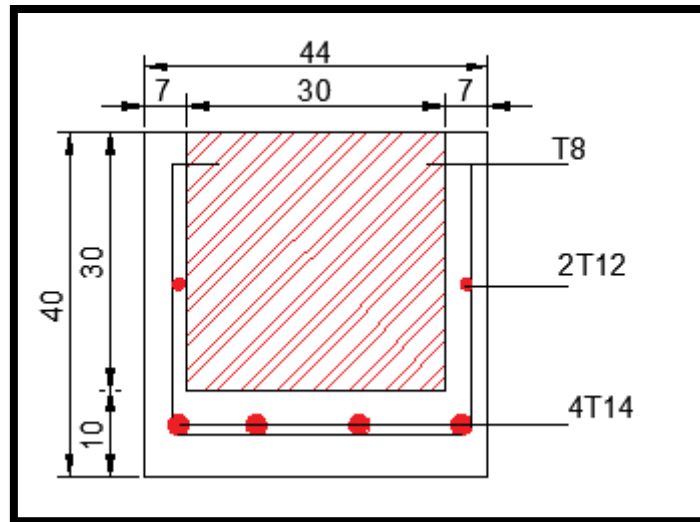


Figure III.27 : chemisage des chainages

Partie 3 : Vérification de la résistance sismique globale de la structure par la méthode Pushover.

III.3.1 Présentation de la méthode Pushover :

L'analyse Pushover, ou analyse statique non linéaire, est une méthode utilisée pour évaluer le comportement réel des structures sous l'action sismique au-delà du domaine élastique. Elle consiste à appliquer progressivement des forces horizontales croissantes jusqu'à l'apparition des dommages ou de l'instabilité de la structure.

Cette méthode permet de déterminer la capacité portante globale de l'ouvrage, d'identifier les zones de plastification et d'évaluer les performances structurales en termes de déplacement et de ductilité. Le principal résultat obtenu est la courbe de capacité reliant l'effort tranchant à la base au déplacement au sommet.

L'analyse repose sur l'hypothèse que le comportement de la structure est dominé par le mode fondamental de vibration. La non-linéarité est introduite à travers des rotules plastiques placées aux extrémités des poutres et des poteaux.

Réalisée généralement à l'aide de logiciels comme SAP2000 ou ETABS, cette méthode offre une estimation réaliste du comportement sismique des structures existantes. Toutefois, elle reste principalement adaptée aux bâtiments de faible hauteur, car elle néglige l'influence des modes supérieurs de vibration.

III.3.2 Méthodologie de l'analyse Pushover par le logiciel Sap2000 :

La méthode Pushover est généralement réalisée à l'aide du logiciel SAP2000 afin d'évaluer le comportement non linéaire des structures sous chargement sismique. L'analyse consiste à appliquer d'abord les charges gravitaires, puis des forces latérales croissantes jusqu'à l'atteinte d'un déplacement cible. Les résultats obtenus permettent de tracer la courbe de capacité, de suivre la formation des rotules plastiques selon les niveaux de performance FEMA 356 (IO, LS, CP) et de déterminer le point de performance de la structure.

Cette méthode offre une estimation réaliste du comportement structural tout en restant plus simple que les analyses dynamiques temporelles. Ci-dessous, on présente la méthodologie de l'analyse Pushover par le logiciel Sap2000 :

Sélections poutres et chainages → Assign → Frame → Hinges

→ Select a FEMA356 Table : Table 6-7

(concrete Beams – flexure) Item i ,

Degree of Freedom : M3

→ Relative distance : 0 puis 1

Sélection Poteaux → Assign → Frame → Hinges

→ Select a FEMA356 Table : Table 6-8

(concrete columns – flexure) Item i ,

Degree of Freedom : P-M2-M3

→ Relative distance : 0 puis 1

Select all → Assign → Frame → Hinge Overwrites ($\frac{h_{section}}{L_{frame}} \approx 0.01$) → 0.01

Load Case → Modal

Load Case → "G + 0.3 Q" Non-Linear

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: Notes:

Load Case Type:

Initial Conditions:

- ☒ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
- ☐ Continue from State at End of Nonlinear Case

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Analysis Type:

- ☐ Linear
- ☒ Nonlinear
- ☐ Nonlinear Staged Construction

Modal Load Case:

All Modal Loads Applied Use Modes from Case:

Geometric Nonlinearity Parameters:

- ☒ None
- ☐ P-Delta
- ☐ P-Delta plus Large Displacements

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	G	1.
Load Pattern	G	1.
Load Pattern	Q	0.3

Other Parameters:

Load Application:

Results Saved:

Nonlinear Parameters:

Figure III.28: Load Case "G + 0.3 Q"

Load Case → "Pushover"; Load Type : Acc ; Load Name ; Ux
 Non-linear ; Scale Factor : -1
 Stiffness at end linear type case : G + Q
 Load Application → Monitored displacement : 0,50
 Load to monitored displacement
 Monitored : le nœud le plus haut

Results saved → Multiple State

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: Notes:

Load Case Type:

Initial Conditions:
☐ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
☒ Continue from State at End of Nonlinear Case
 Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Analysis Type:
☐ Linear
☒ Nonlinear
☐ Nonlinear Staged Construction

Modal Load Case:
 All Modal Loads Applied Use Modes from Case

Geometric Nonlinearity Parameters:
☒ None
☐ P-Delta
☐ P-Delta plus Large Displacements

Loads Applied

Load Type	Load Name	Scale Factor
Accel	UY	-1.
Accel	UY	-1.

Other Parameters:
 Load Application:
 Results Saved:
 Nonlinear Parameters:

Figure III.29: Load case "Pushover"

RUN → Deformed Shape → Steps (i)

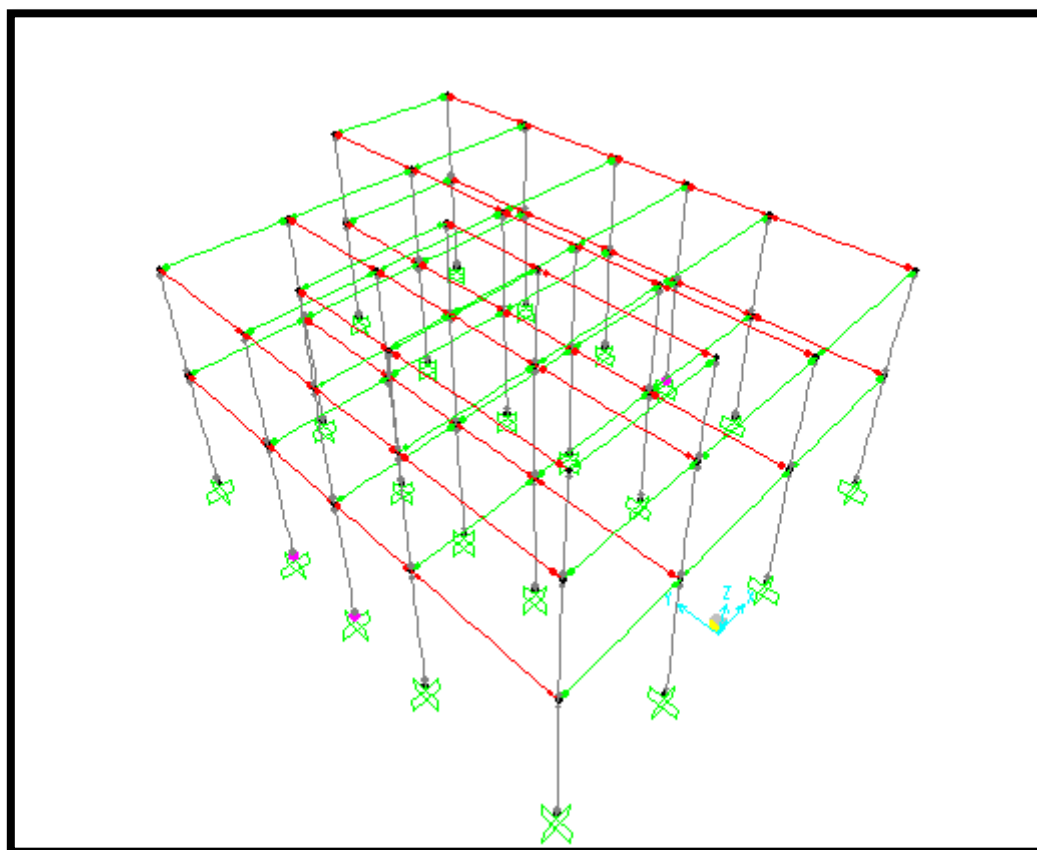


Figure III.30 : Déformée de la structure après l'exécution (Run) de l'analyse

Display → Show Static Pushover Curve

Plot Type : ATC-40 Capacity Spectrum

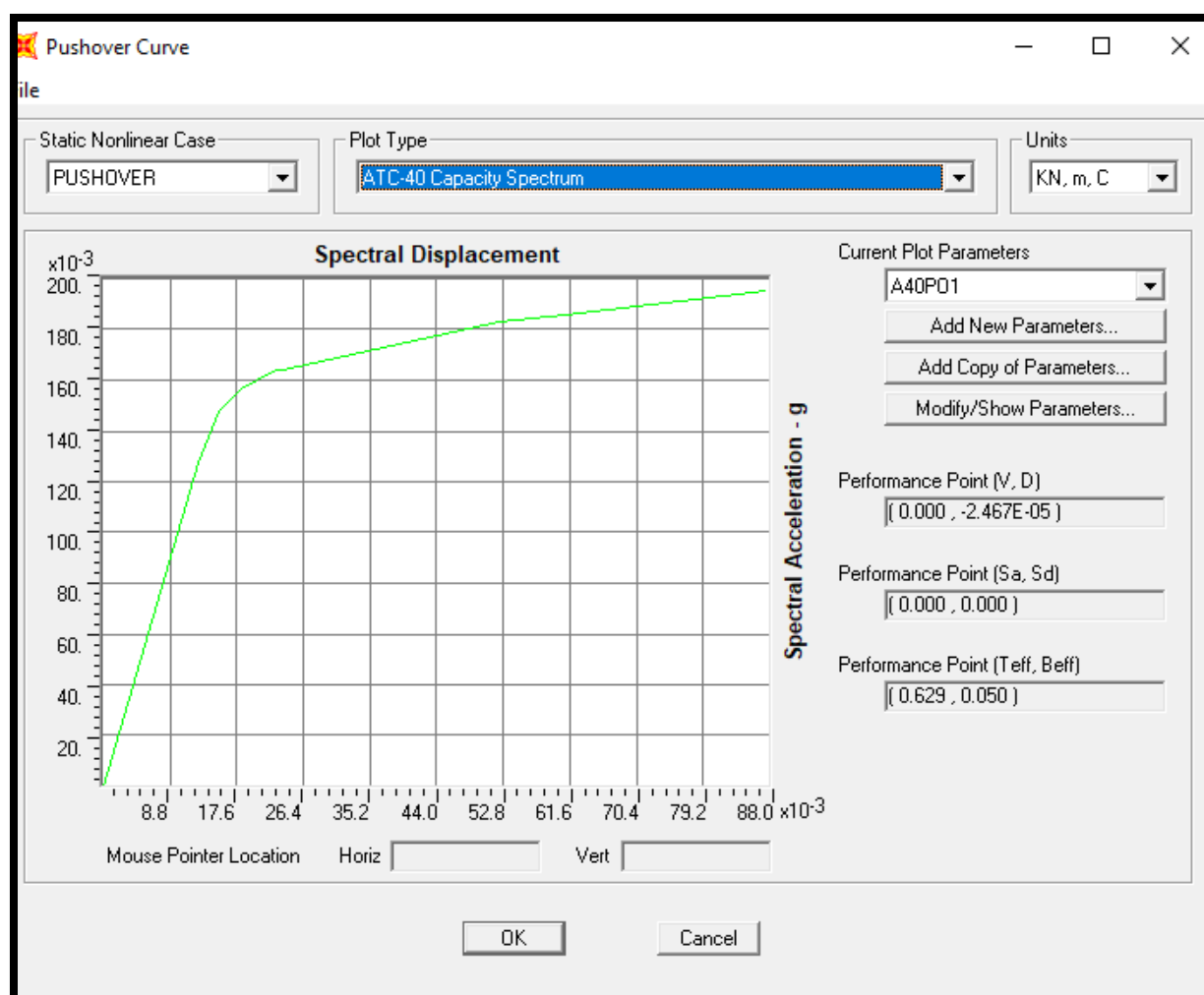


Figure III.31: Courbe de capacité S_A - S_D de la structure avant renforcement par chemisage

Modify Show Parameters

Demand Spectrum Definition → Function → $SF = 9,81$

Show Family of Demand Spectra : damping ratio : 0,05 / 0,10

⇒ Performance Point (V,D)

Effet P- Δ : Accélère le mécanisme de rupture d'une structure.

Parameters For ATC-40 Capacity Spectrum

Pushover Parameters Name
Name A40PD1
Units KN, m, C

Plot Axes
☒ Sa - Sd ☐ Sa - T ☐ Sd - T
 Axis Labels and Range
 Set Axis Data...

Demand Spectrum Definition
☒ Function RPAelastic SF 9.81
☐ User Coeffs Ca Cv

Damping Parameters Definition
 Inherent + Additional Damping 0.05
 Structural Behavior Type
☐ A ☒ B ☐ C ☐ User
 Modify/Show...

Items Visible On Plot
☒ Show Capacity Curve Color ■
☒ Show Family of Demand Spectra Color ■
 Damping Ratios 0.05 0.05 0.05 0.05
☐ Show Single Demand Spectrum (ADRS) Color ■
 (Variable Damping)
☐ Show Constant Period Lines at ■
 Reset Default Colors

Update Plot
 OK Cancel

Figure III.32 : Paramètres du calcul Pushover

III.3.3 Application de la méthode de Pushover pour le bâtiment avant et après chemisage :

Dans cette étude, la méthode de Pushover est appliquée au bâtiment avant et après renforcement par chemisage en béton armé. L'objectif principal est de comparer le comportement global de la structure dans les deux cas, en analysant l'évolution de la rigidité, de la résistance et de la ductilité. Ci-dessous sont présentés les résultats de l'analyse Push over avant et après chemisage, afin d'évaluer l'influence du renforcement sur les performances sismiques de la structure.

III.3.3.1 Avant chemisage :

La courbe obtenue représente la courbe de capacité sur la direction UX de la structure. Elle traduit l'évolution de la réaction à la base (Base Reaction) en fonction du déplacement latéral sous l'effet de l'augmentation progressive du chargement sismique.

Dans la première phase, la structure se comporte dans le domaine élastique, où la relation entre l'effort sismique et le déplacement reste presque linéaire. À partir d'une charge d'environ 640 kN, les premières rotules plastiques commencent à apparaître dans certains éléments structuraux.

Ensuite, aux étapes suivantes de chargement, une augmentation plus rapide des déplacements est observée, atteignant environ 19 mm. Cette accélération des déplacements est due à une diminution progressive de la rigidité de la structure, provoquée par la plastification de certaines sections. En effet, les éléments ayant atteint leur capacité élastique ne peuvent plus assurer la même résistance initiale, ce qui entraîne une dégradation de la rigidité globale.

Ainsi, la courbe de capacité permet d'évaluer le comportement non linéaire de la structure et d'identifier les différentes phases de formation des rotules plastiques jusqu'à l'état limite de résistance.

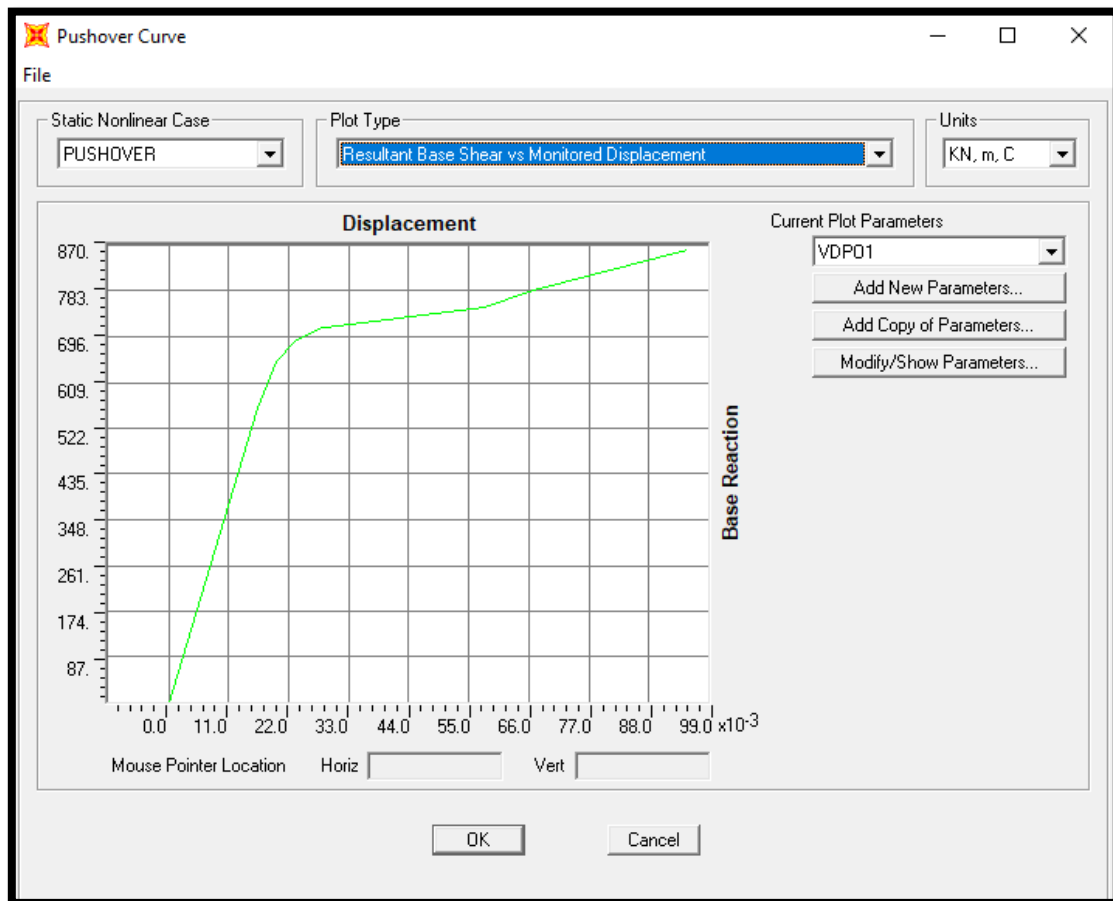


Figure III.33 : La courbe de Capacité V-D de la structure avant renforcement par chemisage.

Le spectre de capacité représente l'accélération spectrale (S_A) en fonction du déplacement spectral (S_D). L'intersection entre la courbe de capacité et la courbe de demande sismique correspond au point de performance (V,D), qui donne l'effort sismique appliqué ainsi que le déplacement maximal du bâtiment.

Lorsque ce point se situe dans le domaine élastique, la structure reste stable sans formation importante de rotules plastiques. En revanche, lorsqu'il se déplace vers le domaine plastique, plusieurs éléments se plastifient, ce qui entraîne une diminution de la rigidité et une augmentation des déplacements.

Si la courbe de capacité n'intersecte plus le spectre de demande, ce qui est notre cas d'après la figure III.32, cela signifie que la structure est sous-dimensionnée par rapport au séisme réglementaire du RPA 2024. Dans ce cas, un renforcement structural devient nécessaire afin d'améliorer la résistance et la ductilité du bâtiment.

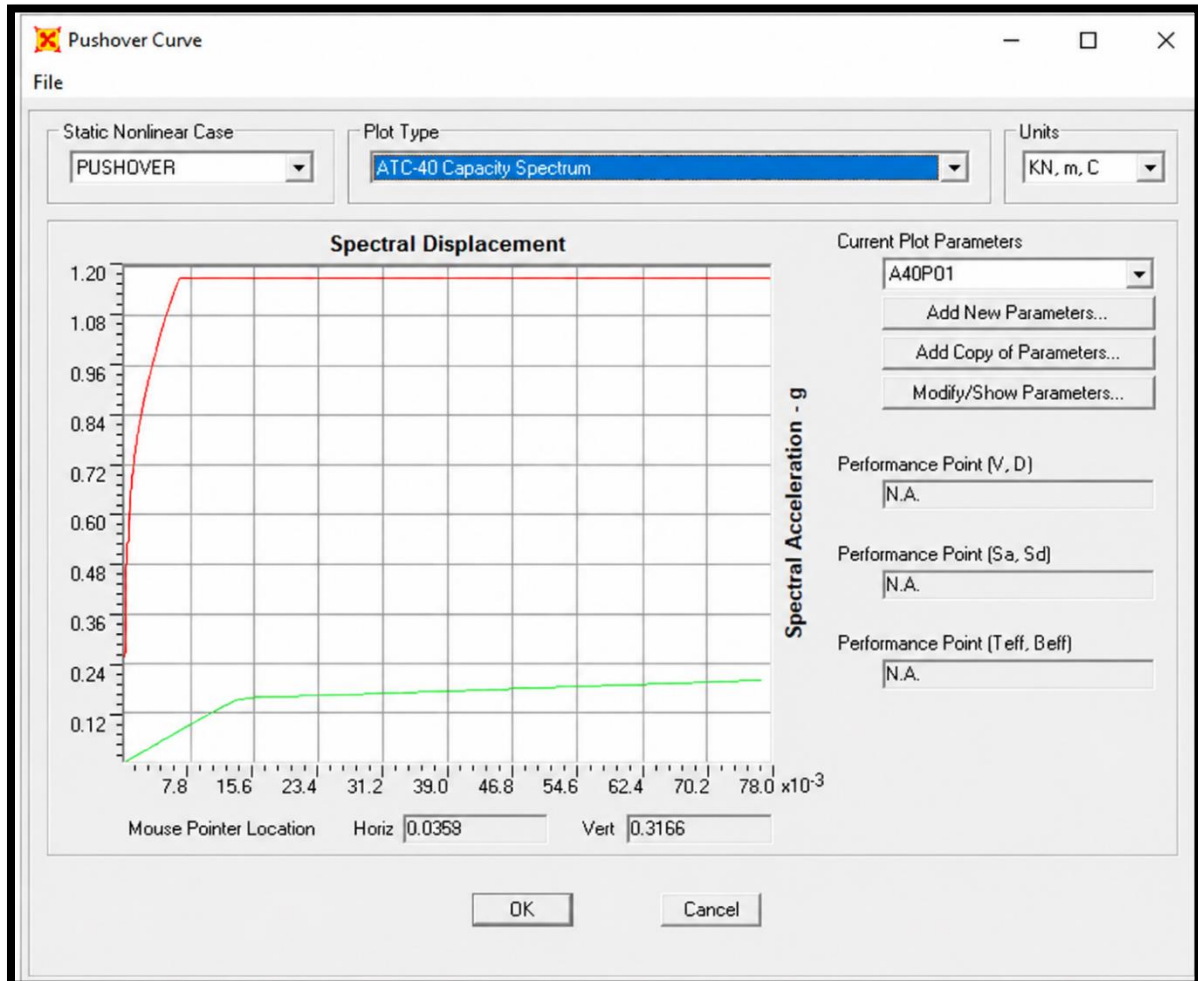


Figure III.34 : Les courbes de Capacité (en vert) et de demande (en rouge) de la structure avant renforcement par chemisage.

III.3.3.1 Après chemisage :

La courbe de capacité, résultat du calcul Pushover classique, montre l'évolution du déplacement en fonction de l'effort tranchant à la base. Au début, la structure travaille dans le domaine élastique avec une rigidité élevée et une relation presque linéaire entre la charge et le déplacement.

Lorsque les premières rotules plastiques apparaissent, la rigidité diminue progressivement. Les déplacements augmentent alors plus rapidement que les charges appliquées, ce qui traduit l'entrée de la structure dans le domaine plastique.

Si le chargement continue à augmenter, la plastification se propage dans plusieurs éléments structuraux, provoquant une forte dégradation de la rigidité et rapprochant la structure de l'état d'effondrement.

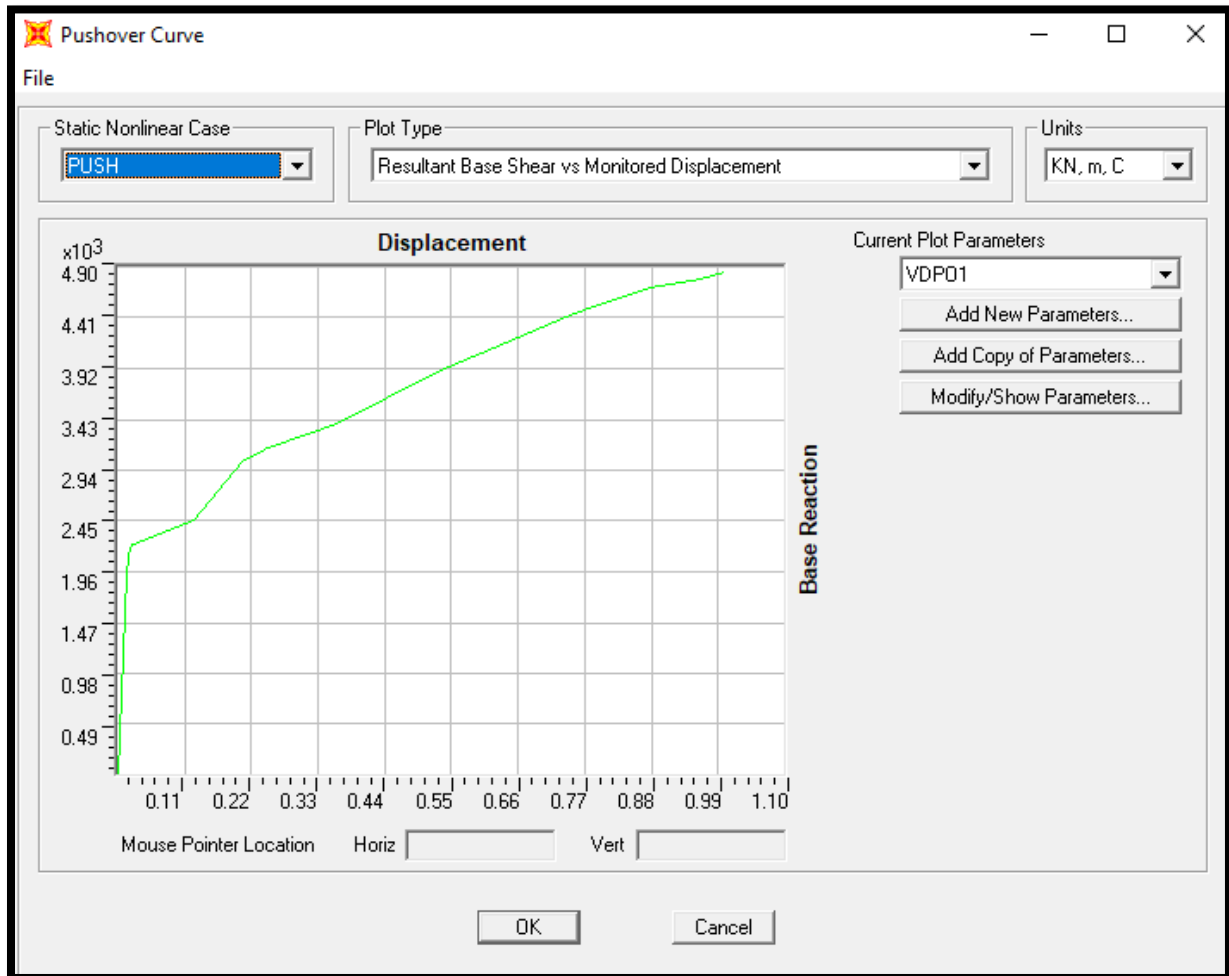


Figure III.35 : La courbe de Capacité de la structure après renforcement par chemisage.

Après le renforcement par chemisage, l'analyse Push over montre une amélioration claire du comportement sismique du bâtiment. La structure devient plus rigide, ce qui entraîne une augmentation de la force sismique atteignant environ 2413 kN.

Le déplacement en tête de la structure est d'environ 0,109 m, tout en restant compatible avec le spectre sismique considéré. Le comportement global reste principalement élastique au début, puis quelques rotules plastiques apparaissent de manière localisée sans provoquer d'effondrement. Ainsi, le chemisage améliore la résistance, la rigidité et la sécurité sismique du bâtiment, tout en limitant les déformations et en assurant la stabilité globale de la structure.

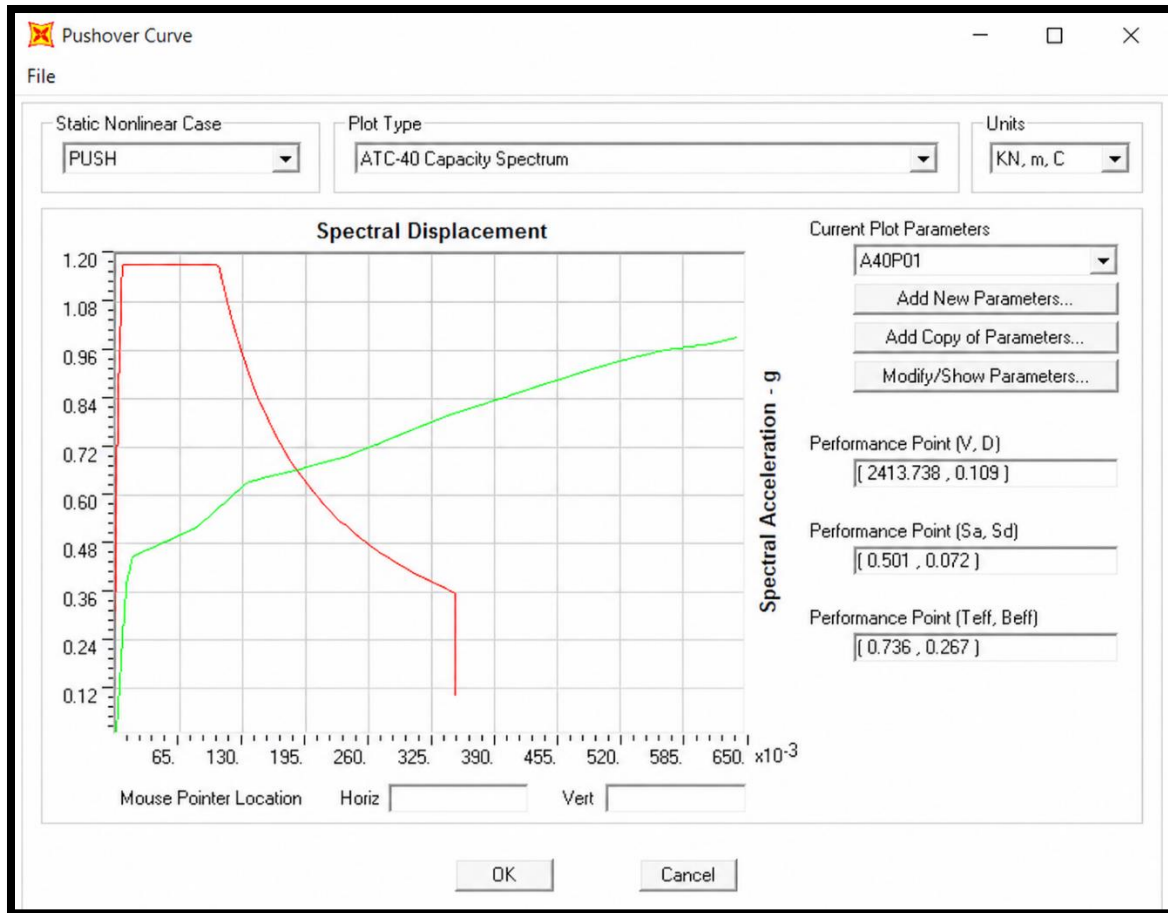


Figure III.36 : Les courbes de Capacité (en vert) et de demande (en rouge) de la structure après renforcement par chemisage.

III.3.4 Synthèse :

Cette étude a permis de mettre en évidence l'efficacité du renforcement par chemisage en béton armé pour améliorer le comportement sismique de la structure. Les résultats obtenus montrent qu'avant renforcement, la structure présentait plusieurs insuffisances en résistance et en rigidité face aux sollicitations sismiques.

Après l'application du chemisage aux éléments structuraux critiques, une amélioration importante du comportement global de la structure a été observée. La structure renforcée satisfait les exigences de résistance et de stabilité sous l'action du séisme correspondant au spectre de calcul adopté.

L'analyse a également montré une réduction significative des déformations et une meilleure répartition des efforts sismiques dans les éléments porteurs. Même en présence d'un séisme important, la structure conserve sa stabilité globale. Toutefois, quelques formations de rotules plastiques peuvent apparaître localement dans certains poteaux, ce qui reste acceptable dans le cadre du comportement ductile recherché en génie parasismique.

En conclusion, le chemisage constitue une solution efficace pour renforcer les structures existantes et améliorer leur performance sismique, tout en assurant un niveau de sécurité satisfaisant pour l'ouvrage.

Conclusion :

Ce chapitre a permis de développer une démarche complète d'évaluation, de vérification et de renforcement d'une structure en béton armé par chemisage, en intégrant à la fois les aspects analytiques, numériques et sismiques.

L'application de la méthodologie au cas d'étude a montré que la structure initiale présentait des insuffisances au niveau de la résistance et de la rigidité, notamment sous l'effet des charges sismiques imposées par le règlement RPA 2024. Les résultats de la modélisation et des vérifications ont mis en évidence la nécessité d'un renforcement des poteaux, poutres et chaînages.

Le recours au chemisage en béton armé a permis d'améliorer significativement le comportement global de la structure. Les nouvelles sections adoptées, associées au ferrailage additionnel, ont conduit à une augmentation de la capacité portante, une réduction des sollicitations critiques et une meilleure distribution des efforts internes.

L'analyse Pushover a confirmé l'efficacité du renforcement, en montrant une amélioration de la rigidité, de la résistance et du comportement ductile de la structure. Le bâtiment renforcé satisfait ainsi les critères de performance sismique, tout en assurant sa stabilité globale sous l'action du séisme de calcul.

En conclusion, le chemisage s'impose comme une solution efficace et fiable pour la réhabilitation des structures existantes en béton armé, permettant d'assurer leur sécurité et leur durabilité face aux exigences sismiques actuelles.

CONCLUSION GENERALE

Le renforcement des structures en béton armé est devenu une nécessité incontournable afin de garantir la sécurité, la stabilité et la durabilité des ouvrages existants face aux différentes pathologies et aux exigences réglementaires actuelles, notamment dans les zones à forte activité sismique. Parmi les différentes méthodes de réhabilitation, le chemisage se distingue comme une solution performante permettant d'améliorer le comportement mécanique et structural des éléments en béton armé.

Au cours de ce travail, les différentes techniques de chemisage ont été étudiées en mettant en évidence leurs principes, leurs domaines d'application ainsi que leurs avantages et leurs limites. Une attention particulière a été portée au chemisage en béton armé à travers l'analyse de son évolution historique, de ses techniques de mise en œuvre et de son rôle dans l'amélioration de la résistance, de la rigidité et de la ductilité des structures renforcées.

La partie pratique a porté sur l'étude d'un bâtiment en béton armé ayant subi un changement d'usage, passant d'un bâtiment d'habitation à un local commercial, entraînant ainsi une modification des charges appliquées à la structure. La modélisation réalisée à l'aide du logiciel SAP2000 a permis d'évaluer le comportement de la structure avant et après renforcement.

Par ailleurs, la vérification de la résistance sismique globale à travers l'analyse Pushover a permis de mettre en évidence l'efficacité du chemisage dans l'amélioration des performances structurales, notamment en termes de capacité portante, de rigidité et de stabilité face aux sollicitations sismiques.

En définitive, le chemisage en béton armé constitue une solution de réhabilitation fiable et efficace pour le renforcement des structures existantes, contribuant à prolonger leur durée de service et à améliorer leur sécurité structurale.

Références :

- [1] M. Ahmed Yassine Ferahi M. Abdelaziz Chabou, «Techniques de réparation et de renforcement des ouvrages en béton,» 2023.
- [2] NF EN 1998-3 - Eurocode 8 : Évaluation et renforcement des bâtiments, 2005.
- [3] ACCA Software, Techniques et avantages de renforcement par chemisage des poteaux. Biblus. <https://biblus.accasoftware.com/fr/techniques-et-avantages-de-renforcement-par-chemisage-des-poteaux/>, 2024.
- [4] HUIT CONCEPTE, s.d.
- [5] SODIAGS, La corrosion dans le béton armé : mécanismes, causes et solutions. Disponible sur : <https://sodiags.fr/la-corrosion-dans-le-beton-arme-mecanismes-causes-et-solutions/>, s.d.
- [6] karimaDrouna, Evaluation des performances parasismiques des portiques en BA renforcés par chemisage en béton armé et par bandage en CFRP, 2010.
- [7] Niri nour El Houda Louahdi BrahimNazin, Etude de renforcement d'un bâtiment en Béton armé en RDC+05 étage à usgae d'habitation endommagé suite au séisme de Boumerdés de 2003, 2022.
- [8] Pinterest, s.d.
- [9] YUCEFI BOUBAKER ALI NASRET, Renforcement des structures en béton armé dégradés par augmentation des charges et facteurs environnementaux, 2021.
- [10] B. BENOUGHIDENE Sara MOUES Racha, Analyse sismique et renforcement d'un bâtiment existant en vue d'une extension, 2022.
- [11] KourBoutheina .Mazouz Rania, Etude d'extension et de renforcement d'une structure en béton armé, 2020.
- [12] RPA, Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, 2024.
- [13] DTR-BE 2.1, Règles de conception et de calcul des structures en béton armé. Alger, Algérie..
- [14] Journal Officiel de la République Algérienne, Arrêté Ministériel n°309/91 portant approbation du DTR relatif aux recommandations techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages..
- [15] K. L. NGUYEN, Contribution à la compréhension du comportement des structures renforcées par FRP sous séismes, 2015.
- [16] G. GHOMRANI HASSENE, Technique de sélection des méthodes de renforcement des bâtiments en béton armé, 2023.
- [17] SEKHRI KHADIDJA, Pathologies et réhabilitation des structures, 2024.
- [18] Entreenmatiere.fr.
- [19] S. Aziz, Etude comparative du comportement mécanique de différents composites stratifiés, 2012.
- [20] E. E S Ju'lio. F Branco and V D Silva, Structural rehabilitation of columns with reinforced concrete jacketing, 2003.
- [21] Wikipédia, Séisme de San Fernando de 1971 Disponible : https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9isme_de_San_Fernando_de_1971, s.d.
- [22] United States Geological Survey, Assessment of Geotechnical Issues in Acute Care Facilites in California, 2004.

- [23] Lloyd, the deadly Sylmar earthquake jolted Southern California. NBC Los Angeles. <https://www.nbclosangeles.com/news/earthquakes/sylmar-1971-san-fernando-earthquake-california/2522446/>, 9 février 2021.
- [24] Venzone Turismo, Séisme de 1976 à Venzone. Disponible sur :, s.d.
- [25] Alamy, Earthquake in Friuli, Italy – building damage [Photograph]. Alamy. <https://www.alamyimages.fr/photo-image-tremblement-de-terre-dans-le-frioul-italie-1976-degats-causes-a-un-batiment-97034293.html>, 1976.
- [26] Wikipédia, Séisme de 1985 à Mexico, s.d.
- [27] F. François Mancebo, Sisyphe a Mexico: risques et politique urbaines, 2006.
- [28] Raphaëlle SADONE, Comportement de poteaux en béton armé renforcés par matériaux composites, soumis à des sollicitations de type sismique, et analyse d'éléments de dimensionnement., 2012.
- [29] OpenAI, ChatGPT, 2026.
- [30] Hicham BELHANNACHI, REHABILITATION ET RENFORCEMENT DES POTEaux EN BETON ARME, 2009.
- [31] HABBACHE Rihab, Réhabilitation des structures en béton armé, 2021.
- [32] Mebarka BEN ALI, REHABILITATION DU CENTRE DU PROTECTION DES MINEURS HENNAYA TLEMCEN, s.d.
- [33] BENDAHDANE Mohammed-Ayoub ABDELHAFIDE Bouthaina, Etude Comparative Pour Le Calcul Au Séisme d'un Bâtiment Métallique a Etage En Utilisant Les Différentes Méthodes du RPA2024 + Push-over, 2025.
- [34] MAHBOUB Lotfi MOULESSEHOUL Sid Ahmed, ETUDE DES SYSTEMES DE CONTREVENTEMENTS DES STRUCTURES EB BETON ARME PAR MATERIAUX COMPOSITES, 2013.
- [35] Auteur inconnu.CCTP – Chemisage, CCTP – Chemisage, s.d.
- [36] KHALDI Nacera, REHABILITATION DES STRUCTURES EN BETON ARME, 2017.
- [37] O. j. 2. T. d. r. e. d. r. d. o. e. b. a. . Ahmed Yassine Ferahi M. Abdelaziz Chabou.
- [38] J. Jean Michel MOREL, La réparation des buses métalliques, s.d.
- [39] Freelem, s.d.
- [40] Z. (. Benamar, Chapitre IV : Réparation et renforcement des structures. Scribd. Consulté sur fr.scribd.com/document/831183484/Chapitre-IV-Reparation-Et-Renforcement-Des-Structures., s.d.
- [41] GHERDAOUI MOUFIDA, RENFORCEMENT DES OUVRAGES EN BETON ARME SOUMIS AUX ACTIONS GRAVITAIRES AVEC MATERIAUX COMPOSITES, 2018.
- [42] Guides Stres, Réparation et rénovation des structures, VERSION 3.
- [43] Nassima SOUADJI, ANALYSE STATIQUE NON-LINEAIRE DES PORTIQUES AUTOSTABLES ET MIXTES EN BETON ARME, 2016.
- [44] U.S. Geological Survey (USGS), San Fernando earthquake. Disponible sur : <https://www.usgs.gov>, 1971.
- [45] Messaouda BOUMAAZA, Réparation des structures type poutres par l'utilisation des matériaux composites, 2017.
- [46] NEHLI RIMA. GHAFAR MOUNIRA, Renforcement des structures en béton armé par chemisage des poteaux, 2014.

- [47] S. Saim Raza. Muhammad K. I. Khan .Scott J. Menegon . Hing-Ho Tsang . and John L. Wilson, Strengthening and Repair of Reinforced Concrete Columns by Jacketing: State-of-the-Art Review, 2019.
- [48] SAIDIA Mohammed Aymen.SALAH SALAH Mounsif, Influence de la corrosion dans les ouvrages en béton armé, 2020.
- [49] ABOU CHAKRA Farid, Renforcement des poteaux en béton armé au moyen de Polymère Renforcé par Fibre de Carbone - Comparaison des codes., 2016.