

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## Mémoire de master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie civil

Option : Structures

Présenté par :

**GHOMRANI HASSENE**

---

---

**Thème : Technique de sélection des méthodes de  
renforcement des bâtiments en béton armé**

---

---

Sous la direction de : **Dr. MADI Rafik**

---

**Juin 2023**

---

# REMERCIEMENTS

*Je voudrais avant tout remercier profondément **ALLAH**, le très haut, le tout puissant de m'avoir donné la vie, la santé, la volonté et le courage d'accomplir ce travail de mémoire de fin d'étude de Master en Génie Civil option Structure.*

*Mes sincères remerciements à mon encadreur **Dr. MADI RAFIK**, qui m'a dirigé tout au long de la réalisation de ce travail. Je le remercie vivement pour sa patience, ses conseils, ses encouragements, ses orientations et son aide scientifique.*

*J'adresse également ma profonde gratitude et mes remerciements à mon professeur **CHERAIT Yacine**, pour son soutien, son encouragement et ses conseils.*

*Je tiens aussi à remercier l'ensemble de corps enseignants et administratifs du département de Génie Civil et hydraulique de l'université 8 Mai 1945 de Guelma, sans eux je ne serais pas arrivé à ce stade.*

*Mes chaleureux remerciements s'adressent également aux honorables membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'assister et d'examiner mon travail.*

*Merci infiniment **Dr. LAFIFI IBRAHIM** pour son soutien physique.*

*Merci de m'avoir mis en disposition tous les nécessaires pour la réalisation de ce travail.*

*Enfin, je remercie humblement toute ma famille et mes amis pour leurs soutiens moraux et encouragements durant tout mon parcours scolaire.*

*Sans oublier ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce projet.*

# Dédicaces

*Je dédie ce travail:*

*A celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse et d'amour, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, qui m'a soutenu toute ma vie, maman « **BAHLOUL RAHIFA** » qu'Allah la protège et lui accorde une longue vie.*

*A la mémoire de mon cher père « **MESSAOUD** », que dieu ait pitié de son âme pure.ma première école, celui qui m'a toujours appris à toujours apprendre en me donnant ses conseils si judicieux. Que la terre lui soit légère et qu'Allah l'accueille dans son vaste paradis.*

*Ames frères et sœurs et à tout la famille. A mes cousines*

*A tous mes oncles et mes tantes paternels et maternels à qui je dois tant de respects et reconnaissances.*

*A tous mes amis de près et de loin qui ont partagé une partie de leur vie.*

*A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.*

# Merci

## **Résumé :**

Ce mémoire résume l'étude d'un bâtiment en béton armé de faible résistance et qui a été détruit en raison de sa faible résistance due aux facteurs naturels et au manque d'entretien. Ce qui cause des désordres qui surviennent au niveau des structures et qui sont souvent dus aux dégradations des matériaux employés ou au changement de fonctionnalité.

Après un diagnostic, et afin d'y remédier à cette problématique, il est impérativement indispensable de procéder à des méthodes soit de : réhabilitation, de réparation ; ou bien le renforcement.

Le but de ce travail est d'étudier la pathologie des bâtiments d'habitations en béton armé ainsi que quelques techniques de renforcement vis-à-vis au séisme ainsi que l'évaluation de la vulnérabilité. Et aussi. Pour arriver à réaliser une expertise et rassembler les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages en béton armé et l'élaboration d'un plan de réhabilitation avec une étude d'un cas réel. Ces méthodes nécessitent, des techniques, y compris anciennes et modernes. Que nous mentionnons ; Les voiles de contreventement, Chemisage en acier, Chemisage en béton, les technologies modernes par les polymères de fibre de carbone et les plaques d'acier.

Les résultats obtenus montrent que la pathologie diffère selon la conception de la structure des bâtiments, des matériaux utilisés, la nature du sol, l'intensité du séisme, etc. Le renforcement à adopter est fonction de la pathologie de la construction. Le renforcement par ajout de voiles de contreventement en béton armé augmente considérablement la capacité de la structure renforcée en augmentant la résistance à l'effort tranchant avec réduction des déplacements.

**Mots clés :** Réhabilitation, Renforcement, Chemisage, Confinement, polymères, Matériaux composites. Plaque d'acier, Amélioration.

## **Abstract**

The présent thesis summarizes the study of a low resistance reinforced concrete building which was destroyed as a result of its low resistance due to natural factors and lack of maintenance. This causes disorders that occur at the level of the structures and which are often due to the degradation of the materials used or to the change of functionality.

After a diagnosis, and aiming at being a remedy to this problem, it is imperative to proceed with one of the following methods : either rehabilitation, repair, or reinforcement.

The objective of this work is to study the pathology of residential buildings with reinforced concrete and examining some reinforcement techniques vis-à-vis earthquakes as well as evaluating vulnerability. The study also aims at achieving an expertise and gathering the factors influencing the degradation of reinforced concrete structures and the development of a rehabilitation plan by studying of a real case. These methods require the use of certain old and modern techniques. The one we mention include ; Bracing sails, steel lining, concrete lining, modern technologies by carbon fiber polymers and steel plates.

The findings of the study show that the pathology differs according to the design of the structure of the buildings, the materials used, the nature of the soil, the intensity of the earthquake, etc. The reinforcement to adopt depends on the pathology of the construction. Reinforcement by adding reinforced concrete shear walls considerably increases the capacity of the reinforced structure by increasing the resistance to the shear force with reduction in displacements.

Keywords : Rehabilitation, Reinforcement, Lining, Containment, polymers, Composite materials. Steel plate, Improvement.

## ملخص

تلخص هذه الرسالة دراسة مبنى خرساني مسلح منخفض المقاومة تم تدميره بسبب قلة مقاومته لعوامل طبيعية وقلة الصيانة. يتسبب هذا في اضطرابات تحدث على مستوى الهياكل، والتي غالبًا ما تكون بسبب تدهور المواد المستخدمة أو تغيير الوظيفة.

بعد التشخيص، ومن أجل معالجة هذه المشكلة، من الضروري المضي قدمًا في طرق إما: إعادة التأهيل؛ أو التعزيز.

الغرض من هذا العمل هو دراسة أمراض المباني السكنية في الخرسانة المسلحة، وكذلك بعض تقنيات التعزيز لمواجهة الزلزال وكذلك تقييم الضعف. وأيضًا اكتساب الخبرة وجمع عوامل التأثير على تدهور الهياكل الخرسانية المسلحة، ووضع خطة إعادة تأهيل مع دراسة حالة حقيقية. تتطلب هذه الأساليب تقنيات قديمة وحديثة؛ ومن بين ما نذكر: أشعة التدعيم، والبطانة الفولاذية، والبطانة الخرسانية، والتقنيات الحديثة ببوليمرات ألياف الكربون والألواح الفولاذية.

أظهرت نتائج الدراسة أن علم الأمراض يختلف باختلاف تصميم هيكل المباني والمواد المستخدمة وطبيعة التربة وشدة الزلزال وما إلى ذلك. ويعتمد التعزيز الذي يجب اعتماده على علم أمراض البناء. ويزيد التعزيز عن طريق إضافة جدران القص الخرسانية المسلحة إلى حد كبير من قدرة الهيكل المعزز عن طريق زيادة المقاومة لقوة القص مع تقليل إزاحة قوة القص وتقليل عمليات النزوح.

الكلمات المفتاحية: إعادة التأهيل، التعزيز، البطانة، الاحتواء، البوليمرات، المواد المركبة، صفيحة فولاذية، محسنة.

|   |    |
|---|----|
| <b>SOMMAIRE</b>   |    |
| Introduction générale   | 1  |
| <b>CHAPITRE I : REABILITATION</b>   |    |
| I. Généralités sur la réhabilitation  | 3  |
| I.1. Introduction   | 3  |
| I.2. Les définitions générale   | 3  |
| I.2.1. Pathologie   | 3  |
| I.2.2. Réhabilitation   | 4  |
| I.3.3. Rénovation   | 5  |
| I.2.4. Restauration   | 5  |
| I.3. Différents types de réhabilitation   | 7  |
| I.3.1. Réhabilitation légère  | 7  |
| I.3.2. Réhabilitation moyenne   | 7  |
| I.3.3. Réhabilitation lourde  | 7  |
| I.3.4. Réhabilitation exceptionnelle  | 8  |
| I.4. Différence entre réhabilitation, rénovation et restauration                | 8  |
| I.4.1 Réhabilitation  | 8  |
| I.4.2 Rénovation.   | 8  |
| I.4.3 Restauration.   | 9  |
| I.5. Technique de réhabilitation  | 9  |
| I.5.1. La préparation de la surface de béton                                    | 9  |
| I.5.2. Synoptique des étapes clés pour la réhabilitation d'ouvrages en béton    | 10 |
| I.5.3. Solutions de réhabilitation  | 11 |
| I.5.3.1. Ragréage   | 11 |
| I.5.3.2. Béton projeté  | 12 |
| A-Technique de projection   | 12 |
| B- Mode opératoire  | 13 |
| I.5.3.3. Tissu de fibres de carbone   | 15 |
| <b>CHAPITRE II : LES DIFFERENTES METHODES DE RENFORCEMENT</b>                   |    |
| II.1. Généralité sur le renforcement  | 16 |
| II.1.1. Définition  | 16 |
| II.1.2. Techniques de renforcement  | 16 |
| II.1.3. Renforcement des structures   | 17 |
| II.2 : Les voiles de contreventement  | 18 |
| II.2.1 Introduction   | 18 |
| II.2.2. Renforcement des structures en béton armé par voiles de contreventement | 21 |
| II.2.2.1. Les principales caractéristiques du comportement des voiles           | 24 |
| II. 3. Chemisage en acier   | 26 |
| II. 3.1. Introduction   | 26 |
| II. 3.2. Avantages et inconvénients du chemisage en acier                       | 27 |
| II. 3.3. Renforcement par chemisage métallique                                  | 28 |
| II. 3.3.1. La mise en œuvre des plats collés                                    | 30 |
| II. 3.3.2. Le renforcement au moyen de profilés métalliques                     | 31 |
| II. 3.3.3. Le scellement d'armatures pour béton armé                            | 33 |
| II. 3.3.4. Renforcement d'un poteau existant en fonte avec un corset en acier   | 34 |

|   |    |
|---|----|
| II. 3.4. Renforcement par plaque métallique                               | 34 |
| II. 4. Renforcement par chemisage en béton                                | 36 |
| II. 4.1. Projection du béton  | 37 |
| II. 4.1.1. Projection par voie sèche                                      | 39 |
| II. 4.1.2. Projection par voie mouillée                                   | 39 |
| II. 4.1.3. Inconvénients des deux méthodes                                | 40 |
| II. 4.2. Chemisage en BTHP  | 41 |
| II. 4.2.1. Préparation des surfaces en béton                              | 41 |
| II. 4.2.1.1. Précautions et limites d'utilisation                         | 42 |
| II. 4.2.2. Préparation du support   | 43 |
| II. 4.2.2.1. Mise en œuvre du chemisage                                   | 43 |
| II. 4.2.3. Adhérence entre les deux bétons.                               | 45 |
| II. 4.2.3.1. Les inconvénients de chemisage                               | 45 |
| II. 4.3. Conclusion   | 49 |
| II. 5. Confinement par polymères renforcés de fibres (PRF)                | 49 |
| II. 5.1. Renforcement à la flexion des poteaux par PRF collés             | 49 |
| II. 5.2. Echec par séparation des PRF                                     | 50 |
| II. 6. Enveloppe en PRF   | 50 |
| II. 7. Placage d'acier  | 52 |
| II. 7.1. Renforcement d'un poteau par une fourrure en acier               | 54 |
| II. 8. Réduction de la portée   | 55 |
| II. 9. Amélioration du sol  | 55 |
| II. 9.1. Renforcement des sols en place                                   | 56 |
| II. 9.2. Renforcement des sols de remblaiement                            | 57 |
| II. 9.3. Technique de renforcement des sols                               | 57 |
| II. 9.3.1. Renforcement des sols compressibles                            | 58 |
| II. 9.3.2. Domaine d'applications des techniques de renforcement des sols | 60 |
| II. 9.4. Renforcement des sols fins                                       | 60 |
| II. 9.4.1. Pré chargement   | 61 |
| II. 9.4.2. Colonnes de sol traité en place                                | 62 |
| II. 9.4.3. Renforcement par inclusions rigides verticales                 | 62 |
| II. 9.4.4. Renforcement des sols grenus                                   | 63 |
| II. 9.4.5. Vibro compactage / vibro-flottation                            | 63 |
| II. 9.4.6. Compactage dynamique   | 63 |
| II. 9.4.7. Pré-chargement   | 64 |
| II. 9.5. Conclusion   | 64 |
| <b>CHAPITRE III : CHOIX DES METHODES DE RENFORCEMENT</b>                  |    |
| III.1. Introduction   | 65 |
| III.2. Choix d'une méthode de renforcement                                | 67 |
| III.3. Techniques de renforcement   | 68 |
| III.4. Choix d'une méthode de renforcement                                | 69 |
| <b>CHAPITRE IV : Réhabilitation d'un bâtiment en béton armé</b>           |    |
| IV.1. Etude d'un bâtiment d'habitation                                    | 70 |
| IV.1.1 Diagnostic   | 70 |
| IV.1.2 Analyse de la structure existante                                  | 70 |

|   |    |
|---|----|
| IV.1.3. Choix de la technique du renforcement | 71 |
| IV.1.4. Analyse de la structure renforcée     | 74 |
| <b>CHAPITRE V : Analyse des résultats</b>     |    |
| V.1. Analyse                                  | 76 |
| Conclusion générale                           | 77 |
| Reference bibliographique                     | 78 |
| Annexe  | 86 |

## LISTE DES TABLEAUX

### CHAPITRE I

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Tableau I.1 | Types de réparation en fonction du type de dégradation | 10 |
| Tableau I.2 | Traitement et réparations en fonction des désordres    | 10 |
| Tableau I.3 | Tableau comparatif (Ragréage v/s Béton projeté).       | 14 |

### CHAPITRE II

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Tableau II.1 | Principales méthodes de renforcement de sol de fondation pour l'édification des remblais [Magnan, 1994] | 59 |
|--------------|---|----|

### CHAPITRE V

|             |                                  |    |
|-------------|----------------------------------|----|
| Tableau V.1 | Comparaison des résultats, sen x | 76 |
| Tableau V.2 | Comparaison des résultats, sen y | 76 |

## LISTE DES FIGURES

### CHAPITRE I

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Figure I.1 | Pathologie de béton.  | 3  |
| Figure I.2 | Réhabilitation des immeubles d'Alger.                                     | 4  |
| Figure I.3 | Réparation de béton.  | 5  |
| Figure I.4 | Rénovation du vieux bâti d'Alger.   | 5  |
| Figure I.5 | Restauration de la Citadelle d'Alger (Palais du Dey) à la Casbah d'Alger. | 6  |
| Figure I.6 | Aciers dégagés, Application du mortier et finissage par taloche.          | 11 |
| Figure I.7 | Projection par voie humide.   | 12 |
| Figure I.8 | Projection par voie sèche.  | 13 |
| Figure I.9 | Tissus de fibre de carbone.   | 15 |

## CHAPITRE II

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| Figure II.1  | Comportement de deux immeubles voisins face aux secousses sismiques (Zack, 2008)                   | 19 |
| Figure II.2  | Voile très endommagé (séisme de Kobe, Japon 1995)  | 20 |
| Figure II.3  | Dégradation du bâtiment au niveau de la zone critique (Zacek, 2008)                                | 20 |
| Figure II.4  | Configuration du renforcement d'un voile en flexion dans le plan                                   | 22 |
| Figure II.5  | Détail du scellement dans le béton de la mèche d'ancrage des bandes de renfort en flexion          | 22 |
| Figure II.6  | Renforcement en béton armé par voiles de contreventement   | 23 |
| Figure II.7  | Modes de rupture de voiles élancés (Davidovici et al. 1985)  | 25 |
| Figure II.8  | Modes de rupture de voiles courts (Davidovici et al. 1985)   | 26 |
| Figure II.9  | Chemisage d'un poteau en acier.  | 27 |
| Figure II.10 | Chemisage acier des poteaux à section circulaire et rectangulaire                                  | 29 |
| Figure II.11 | Différentes étapes renforcement d'un poteau par chaînage métallique.                               | 32 |
| Figure II.12 | Renforcement de poteaux au moyen de profilés métallique.   | 33 |
| Figure II.13 | Des poteaux renforcés avec un corset en acier.   | 34 |
| Figure II.14 | Différentes étapes de renforcement des poteaux au moyen d'une enveloppe en béton armé (chemisage). | 35 |
| Figure II.15 | Chemisage béton de poteaux de section circulaire et rectangulaire                                  | 36 |
| Figure II.16 | Renforcement au moyen de béton projeté   | 37 |
| Figure II.17 | Fondation solidarifiée par ajout de longrine.  | 38 |
| Figure II.18 | Exemple de renforcement d'un poteau par ajout de béton et d'armatures.                             | 38 |
| Figure II.19 | Projection par voie sèche.   | 39 |
| Figure II.20 | Projection par voie mouillée.  | 40 |

|                     |   |    |
|---------------------|---|----|
| Figure II.21        | Détails du chemisage en BTHP fibré.   | 41 |
| Figure II.22        | Chemisage en béton armé des poteaux (ferraillage complet).  | 42 |
| Figure II.23        | Chemisage en béton d'un poteau +fondation renforcée (coupe transversale).                                 | 43 |
| Figure II.24        | Différentes étapes de renforcement des poteaux au moyen d'une enveloppe en béton armé (chemisage).        | 44 |
| Figure II.25        | Organigramme du processus de chemisage en béton armé.   | 45 |
| Figure II.26        | Renforcement d'une habitation individuelle R+ 3 par chemisage des poteaux.                                | 46 |
| Figure II.27        | Chemisage des 4 poteaux centraux.   | 47 |
| Figure II.28        | Chemisage des 4 poteaux sous-sol terminus.  | 48 |
| Figure II.29        | Technique de chemisage.   | 50 |
| Figure II.30        | Renforcement d'un nœud à multi branches   | 51 |
| Figure II.31        | Renforcement d'un nœud deux branches  | 51 |
| Figure II.32        | Renforcement par composites   | 52 |
| Figure II.33        | Colonne dont l'élancement est accru.  | 52 |
| Figure II.34        | Le renforcement par les profiler et les plaques en acier.   | 53 |
| Figure II.35        | Colonne architectonique en fonts et détails du pied et de la tête de colonne.                             | 54 |
| Figure II.36        | Renforcement des sols par ajout d'inclusion   | 56 |
| Figure II.37        | Système d'inclusions rigides flottantes et ancrées  | 57 |
| Figure II.38        | Exemples de géo synthétiques  | 57 |
| FigureII.39         | Principe de Pré chargement pour le contrôle des tassements.   | 61 |
| FigureII.40         | Schéma de principe d'un renforcement par inclusions rigides verticales [D'après Berthelot et al. (2003)]. | 62 |
| FigureII.41         | Procédé de renforcement du sol par vibrocompactage  | 63 |
| FigureII.42         | Procédé de renforcement de sol par compactage dynamique.  | 64 |
| <b>CHAPITRE III</b> |   |    |

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| Figure III.1 | Les Différentes techniques de renforcement                           | 66 |
| Figure III.2 | Organigramme pour diagnostic   | 67 |
| Figure III.3 | Options du renforcement en fonction des informations sur le bâtiment | 69 |
|              | <b>CHAPITRE IV</b>   |    |
| Figure IV.1  | Vue 3D robot, structure existante                                    | 70 |
| Figure IV.2  | Calcul de la pertinence  | 73 |
| Figure IV.3  | Outil de sélection de décision                                       | 74 |
| Figure IV.4  | Vue 3D robot, structure existant avec renforcement                   | 75 |

***Introduction***  
***Générale***

## **Introduction générale :**

Avec le vieillissement des structures en génie civil et l'atteinte de leur durée de vie utile. Leurs éléments structuraux présentent des dégradations et de déficiences. Deux options offertes sont pour remédier à ces déficiences. Soit démolir puis reconstruire ces structures. Soit les renforcer.

La première option n'est pas pratique car dans la plupart des cas, elle exige beaucoup de temps et de financement. La deuxième option, qui consiste à renforcer les structures déficientes, est une approche plus économique et pratique. Par conséquent, aujourd'hui l'une des principales activités de recherches en génie civil consiste à trouver des nouvelles techniques et de nouveaux matériaux pour réhabiliter ou réparer les éléments structuraux en béton déficients existants.

Le terme de renforcement est communément applicable à des opérations de réparation ou de réhabilitation. La réparation visant ainsi à retrouver les performances initiales d'une structure endommagée, alors que le renforcement consiste en une amélioration des performances d'une structure endommagée ou non. Le but escompté est de répondre à de nouveaux besoins ou pour répondre à une volonté de remise en conformité.

Bien entendu, à l'issue d'une intervention de réparation, l'ouvrage peut présenter des performances supérieures à celles qu'il présentait initialement. Les objectifs du renforcement parasismique peuvent être de différente nature : augmenter la résistance aux efforts latéraux, augmenter la ductilité, ou encore combiner ces deux aspects, afin de satisfaire aux nouvelles exigences de résistance aux séismes.

L'objectif d'un renforcement parasismique est la sauvegarde d'un maximum de vies lors d'une secousse liée à un certain aléa sismique. La construction peut alors subir des dommages irréparables, mais ne doit pas s'effondrer sur ses occupants et doit permettre les opérations de secours. En cas de secousse plus modérée, l'application des dispositions définies dans les règles parasismiques doit aussi permettre de limiter les destructions et les pertes économiques.

Le choix d'une ou de plusieurs méthodes de réparation et de renforcement est défini par rapport à la nature et le degré d'importance des désordres constatés lors d'un diagnostic.

Ce choix est tributaire des matériaux de construction utilisés, des techniques choisies, et de critères économiques.

On peut être amené donc à procéder ainsi :

- A des remises en état d'éléments structurels présentant des défauts que l'on cherche à atténuer, pour obtenir un aspect satisfaisant tels que : l'obturation de fissures qui sont dues le

plus souvent au retrait et aux variations environnementales.

- Au renforcement ou à la réparation d'éléments insuffisamment résistants, les réparations sont souvent réalisées dans les zones où les sections sont trop sollicitées et défailtantes, par contre le renforcement des éléments consiste à améliorer leurs caractéristiques mécaniques de manière à ce qu'elles offrent une meilleure solidité aussi bien en état de service qu'en état de résistance ultime.

Les produits de renforcement utilisés doivent avoir vis-à-vis d'un béton dégradé les qualités suivantes :

Présenter une compatibilité avec le support béton à savoir :

Un retrait limité pour des liants hydrauliques employés, ce phénomène qui apparaît dès la prise et au durcissement final, et de manière à éviter l'apparition de fissures ou un décollement de l'interface.

Une adhérence au béton support et une résistance au moins égale à la résistance du béton renforcé.

Une adhérence aux armatures métalliques initiales ou rajoutées.

Des résistances mécaniques à la compression, à la traction, similaire ou supérieures à celles du béton de support.

Un coefficient de dilatation le plus proche possible de celui du béton support.

Présenter une durabilité par rapport aux conditions environnementales :

Les principaux agents agressifs participant au phénomène de corrosion des armatures.

Cependant, avant toute validation du procédé de renforcement retenu pour augmenter la ductilité de l'ouvrage, il faut réaliser une analyse de la structure renforcée, de manière à vérifier que le renforcement améliore le comportement de la structure dans son ensemble. En effet, il faut prendre garde à ne pas trop dissocier les différents modes de rupture : renforcer un élément vis-à-vis d'un désordre peut conduire à simplement déplacer le problème. Par exemple, renforcer un poteau vis-à-vis du cisaillement peut entraîner le développement d'une rotule plastique, qu'il faudra alors confiner. Il faut donc envisager une stratégie globale de réhabilitation.

***Chapitre I***  
***Réhabilitation***

## **I. Généralités sur la Réhabilitation :**

### **I.1. Introduction :**

Dans le secteur du bâtiment, il existe plusieurs interventions de réhabilitation, de maintenance, de réparation et de renforcement, correspondant à des métiers différents. Mais dans tous les cas, il est indispensable de bien connaître l'existant, d'être « réactif » aux gens et aux choses et de mesurer l'enjeu véritable de chaque opération envisagée.

Toutefois, il faut noter que les domaines d'action auxquels correspondent ces interventions, bien que comportant une partie commune qui est bien sûr le diagnostic, doivent être distingués l'un de l'autre. [1]

Cependant, l'opposition "rénovation ou réhabilitation" est toujours présente, car pour de nombreux maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre, il est plus facile de démolir et de reconstruire que de restaurer. On prétend aussi que la rénovation coûte moins cher que la restauration. En fait, le choix relève de nombreux facteurs : techniques, économiques, sociaux, historiques, esthétiques, etc. [2]

### **I.2. Les définitions générales : Pathologie, Réhabilitation, Rénovation et Restauration**

#### **I.2.1 Pathologie :**

La pathologie est le terme employé pour définir les dégradations subies par les maçonneries altérées par le temps. L'humidité est la cause principale de la plupart d'entre elles, elle prédispose les constructions à des mouvements de tassements qui engendrent des fissures. Le diagnostic de réparation d'une bâtisse doit permettre de découvrir les causes des dégradations pour les éliminer de manière à garantir l'opération de restauration. [3]



**Figure1.1 :** Pathologie de béton.

### **I.2.2 Réhabilitation :**

"Réhabilitation" : apporter le confort des normes d'aujourd'hui.[2] Englobe l'ensemble des actions en vue de récupérer et d'améliorer un édifice en l'adaptant à un usage de confort moderne. [4]

L'objectif fondamental consiste à éliminer les anomalies constructives ou fonctionnelles accumulées au cours du temps, à moderniser installations, équipements et organisation des espaces, améliorant ainsi son fonctionnement et le préparant à une utilisation actuelle. [5]

Contrairement au neuf, en réhabilitation, il faut composer avec l'existant et parfois savoir revoir le programme, d'où l'importance d'établir avec son concepteur une relation de confiance. Il n'est pas toujours possible d'examiner le gros œuvre avant le début des travaux. Prévoyez d'éventuels surcoûts. [2]



**Figure1.2:**Réhabilitation des immeubles d'Alger.



**Figure I.3:** Réparation de béton

### **I.2.3. Rénovation :**

Rénovation : rebâtir à neuf.

Englobe les actions qui s'attaquent à un tissu urbain dégradé, en l'éliminant pour le remplacer par une occupation nouvelle et actuelle, attribuant à la zone une nouvelle structure urbaine et fonctionnelle généralement avec ou sans lien avec la préexistante. [1]



**Figure I.4:** Rénovation du vieux bâti d'Alger.

### **I.2.4. Restauration :**

Englobe l'ensemble des actions nécessaires à la conservation d'un édifice et à la récupération de son image qu'il s'agisse de sa conception originale ou du moment historique où il a atteint son apogée, en maintenant la plus grande fidélité possible aux techniques et matériaux de construction de l'époque. [1]

Elle est réservée aux bâtiments ayant une valeur historique certaine qu'il s'agit de remettre en état à l'identique.

Redonner au bâtiment caractère un bon moyen d'éviter les désordres de tout genre : employer les matériaux d'origine selon les techniques d'époque. La restauration demande un savoir-faire de spécialiste. [6]



**Figure I.5:** Restauration de la Citadelle d'Alger (Palais du Dey) à la Casbah d'Alger.

### **I.3- Différents types de réhabilitation :**

On distingue plusieurs niveaux de réhabilitation :

#### **I.3.1. Réhabilitation légère :**

Sans travaux sur les parties communes.

Elle concerne les bâtiments sous équipés dont la structure porteuse ne présente pas de faiblesse particulière. Elle consiste à une réorganisation des espaces ou à une amélioration du confort thermique et acoustique. Elle touche :

- Les enduits ;
- Le nettoyage ;

Le remplacement de la menuiserie.

#### **I.3.2. Réhabilitation moyenne :**

Des travaux plus complets sur les parties privatives.

Elle concerne les immeubles qui demandent l'amélioration de certain confort et le renforcement des structures porteuses ainsi que le changement de certains équipements :

- Réfection de l'électricité et des peintures ;
- Amélioration du confort acoustique ;
- Installation des pièces d'eau ou d'ascenseur.

#### **I.3.3. Réhabilitation lourde :**

Redistribution des pièces, réfection des toitures, travaux touchant les gros œuvres.

Elle concerne les bâtiments dont la structure porteuse est sérieusement endommagée et l'état de la restauration et la réhabilitation se distinguent par leur rapport à la continuité et au changement. L'une est dévolue au maintien de la forme bâtie, sans égard particulier pour l'évolution éventuelle de son contenu ; l'autre transforme un bâtiment pour en actualiser à la fois le programme et la construction. Cette modification d'un lieu existant impose des arbitrages entre les exigences patrimoniales, sociales et économiques, qui nécessitent la médiation d'un acte architectural fortement empreint de culture sure est très avancé. Il s'agit dans ce cas de renforcer la structure ou de la remplacer. [1]

#### **I.3.4. Réhabilitation exceptionnelle :**

Intervention sur les gros œuvres

C'est une opération d'intervention très lourde et très délicate, elle nécessite le déplacement des occupants en vue de remettre en état un bâti présentant un degré d'altération très important comprenant le renforcement des structures ou leurs remplacements si le besoin et par endroit (cage d'escalier, toiture, étanchéité) il arrive que cette dernière aille jusqu'à la reprise de structure porteuse de l'habitation si la stabilité de cette dernière s'avère atteinte en profondeur.  
[2]

#### **I.4 Différence entre réhabilitation, rénovation et restauration :**

##### **I.4. Réhabilitation :**

"Réhabilitation" : apporter le confort des normes d'aujourd'hui

Employez les techniques et les matériaux actuels : isolation, menuiseries, salle d'eau, électricité... Les changements d'aspect extérieur et les changements de destination (d'usage) nécessitent des autorisations d'urbanisme (renseignement en mairie). Certains architectes ou maîtres d'œuvre sont compétents et expérimentés dans le domaine. Leur mission se décompose alors ainsi :

Phase initiale de relevé et de diagnostic : établissement des plans de l'état existant, expertise technique de la construction.

Mission classique de maîtrise d'œuvre : esquisses puis projet selon le programme, les Contraintes physiques du bâtiment et les conséquences financières de l'option choisie.

Contrairement au neuf, en réhabilitation, il faut composer avec l'existant et parfois savoir revoir le programme, d'où l'importance d'établir avec son concepteur une relation de confiance. Il n'est pas toujours possible d'examiner le gros œuvre avant le début des travaux. Prévoyez d'éventuels surcoûts.

##### **I.4.2. Rénovation :**

Rénovation : rebâtir à neuf.

Elle concerne les opérations qui commencent par une démolition. Elles sont similaires aux opérations de travaux neufs si ce n'est la phase de démolition et de libération des emprises foncières.

La rénovation dans le bâtiment est l'acte de rénover un bâti ou un équipement ancien ou existant afin de lui donner des caractéristiques techniques, réglementaires et esthétiques de

meilleure qualité. Lorsque la rénovation est poussée en termes de travaux techniques et réglementaires, nous pouvons alors parler plus de réhabilitation, cependant la frontière entre ces deux termes est proche. [7]

#### **I.4.3. Restauration :**

Restauration : redonner au bâtiment son caractère.

Un bon moyen d'éviter les désordres de tout genre : employer les matériaux d'origine selon les techniques d'époque. La restauration demande un savoir-faire de spécialiste. [7]

Elle est réservée aux bâtiments ayant une valeur historique certaine qu'il s'agit de remettre en état à l'identique.

Restauration d'une construction ancienne avec préservation de la façade principale (préservation du patrimoine ancien) Bruxelles.

#### **I.5. Techniques de réhabilitation :**

Les techniques de réhabilitation peuvent être classées selon divers critères et être dites structurantes ou non structurantes, continues ou ponctuelles, destructives ou non destructives.

Le plan d'action doit être fait d'une manière précise et très attention. [8]

##### **I.5.1. La préparation de la surface de béton :**

La préparation de la surface de béton en vue de l'application d'un produit de réparation englobe toutes les étapes qui suivent l'élimination du béton dégradé.

Elle dépend du type de réparation et du nombre de ces étapes qui s'imposent lorsqu'on n'enlève pas ou guère de béton.

Une bonne préparation permet de disposer d'une surface sèche, égale et plane qui est exempte de salissures, de poussière, d'huile et de graisse.

L'élimination des contaminants de surface assure un contact direct entre les primaires et produits de réparation et le substrat, augmentant la surface réelle et la rugosité du support, et assurant une meilleure adhérence du produit appliqué.

Cependant, l'état optimal de la surface de béton dépend du type de réparation envisagé et de l'état du support. [6]

| Type de réparation      | Méthode de réparation  |
|-------------------------|--|
| Réparation des surfaces | Décapage chimique, Nettoyage mécanique, Scarification, Décapage au jet, sablage au jet, Gravure à l'acide, Décapage thermique. |
| Réparation des fissures | Elimination des salissures ouvrir la fissure et évacuer les parties non adhérentes.  |

**Tableau I.1** : Types de réparation en fonction du type de dégradation.

| Désordre             | Traitements et réparations  |
|----------------------|---|
| Bullage<br>Ecaillage | Ragrée la surface avec un produit adapté.<br>Traiter les armatures corrodées, compenser la réduction du diamètre des armatures, reprendre au mortier ou béton à base de liants hydrauliques modifiés.   |
| Fissures             | Traiter la fissure ouverte avec un joint souple étanche<br>Traiter les armatures corrodées ; reprendre au mortier de réparation ; ajouter un complément d'armatures.<br>Faire une injection dans la fissure et renforcer si nécessaire avec le TFC. |

**Tableau I.2** : Traitement et réparations en fonction des désordres.

### **I.5.2. Synoptique des étapes clés pour la réhabilitation d'ouvrages en béton :**

1. Auscultation et diagnostic précis de l'état de l'ouvrage :
  - Observations visuelles.
  - Analyse des documents.
2. Mise en sécurité de l'ouvrage (si nécessaire).
3. Détection, identification et constat des dégradations et de leurs causes :
  - Sondages tests.
  - Analyses en laboratoire.
  - Analyses en situation.
  - Inspections visuelles.
4. Estimation et pronostic de l'évolution des dégradations :
  - Modèles prédictifs.
  - Observations.

5. Détermination des objectifs de la réparation ou du renforcement.
6. Sélection des méthodes et techniques les mieux adaptées.
7. Mise au point du cahier des charges du projet de réparation ou de renforcement.
  8. Réalisation des travaux.
  9. Contrôle et réception des travaux.
  - 10 Suivi de l'efficacité de la réparation ou du renforcement, gestion, surveillance et maintenance de l'ouvrage. [9]

### **I.5.3. Solutions de réhabilitation :**

#### **I.5.3.1. Ragréage :**

Le ragréage est la technique traditionnelle de réparation des bétons. Il permet dans un premier temps de reconstituer les sections d'armatures qui ont disparu, de stopper le phénomène de corrosion des aciers par passivation. Puis, le principe est de protéger les armatures par reconstitution manuelle ou mécanique de l'enrobage à l'aide de mortier de réparation. [2]

Les étapes de la réparation sont les suivantes :

- ✓ Eliminer les zones de faible cohésion.
- ✓ Dégager l'armature corrodée jusqu'à une zone où celle-ci est saine
- ✓ Nettoyer l'armature.
- ✓ Remplacer l'armature si la perte de section est trop forte.
- ✓ Passiver les armatures corrodées par application de produit.
- ✓ Reconstituer manuellement l'enrobage de béton à l'aide de mortier de réparation.



**Figure I.6 :** Aciers dégagés, Application du mortier et finissage par taloche. [10]

### I.5.3.2. Béton projeté :

Lorsque les surfaces de béton à réparer sont importantes, la méthode du béton projeté est une option souvent utilisée.

Puisque ce type de réparation est relativement rapide à mettre en œuvre, mais nécessite du matériel particulier.

#### A Technique de projection :

Projeté avec une force assez importante, le béton se place et se compacte au même instant, ce qui le diffère du béton conventionnellement coulé et ensuite vibré.

Ce procédé permet de produire un béton plus dense, homogène et imperméable, ayant une surépaisseur moins poreuse, plus durable et peu sensible aux attaques chimiques.

La résistance en compression du béton projeté a, selon la norme NBN EN 14487-1, un minimum de 40 MP.

Un mélange soigneusement réalisé, permet l'application de ce béton sur toutes les surface même les surfaces verticales et en surplomb.

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

Différentes méthodes vont présenter de différents résultats. Par voie sèche, le rapport E/C est évidemment plus faible, on obtiendra alors une résistance plus élevée que par voie humide.

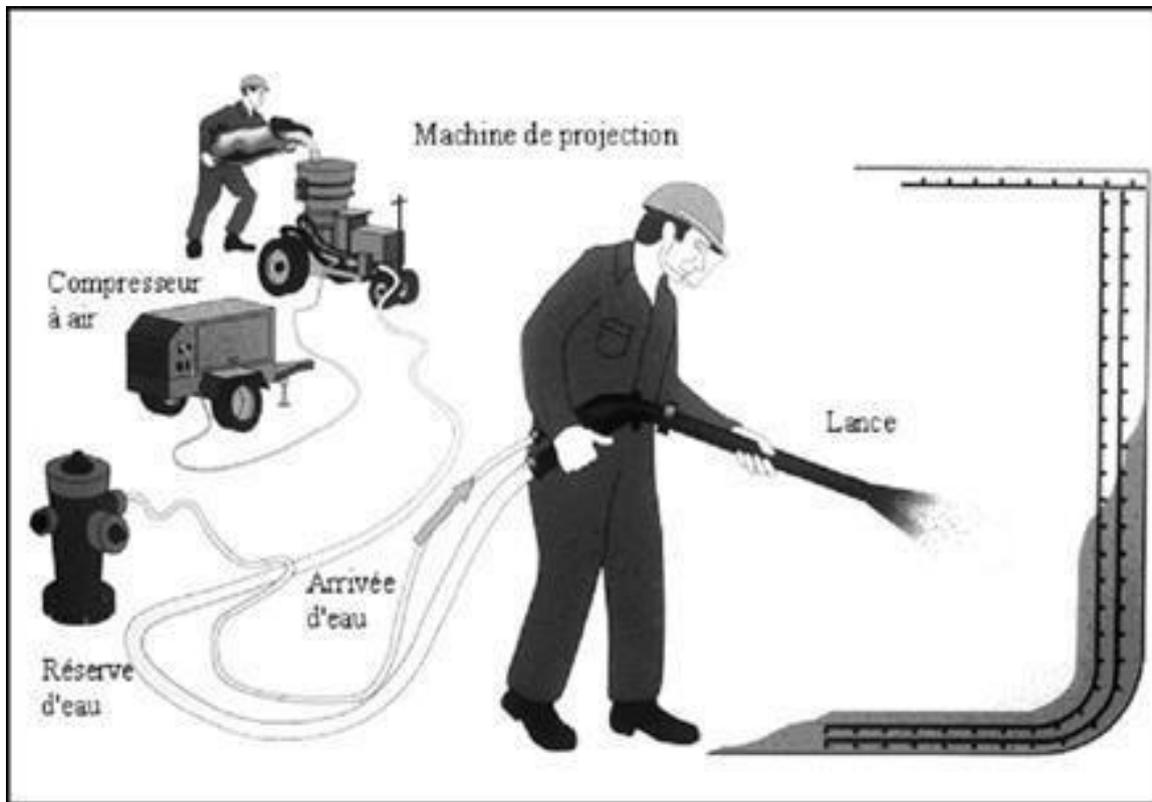
Mais on aura un dégagement de poussière plus important et un risque de détérioration d'un support fragile.



Figure I.7 : Projection par voie humide.

Avantage : Ici Le contrôle de la qualité est simple, puisque l'on utilise un béton conventionnel (le dosage des constituants du mélange est connu).

Désavantage : Ici le procédé ne peut être arrêté, car le mélange eau-ciment est préalable.



**Figure I.8 :** Projection par voie sèche

Avantages : Ce procédé peut être arrêté et continué à tout moment durant les travaux. En effet, le contact ciment-eau ne se fait qu'à la lance, il n'y a aucune prise possible par avant si la production du béton est interrompue. Des résistances élevées sont facilement obtenues puisqu'il permet d'avoir de faibles rapports eau-liant.

Désavantage : Le dosage de l'eau dans le mélange se fait directement à la lance, par le lanceur, ce qui complique le contrôle de la qualité.

### **B Mode opératoire :**

La mise en œuvre se fait à l'aide d'une machine à projeter qui est transporté à travers un boyau et projeté pneumatiquement à très grande vitesse sur une surface.

L'air expulsé et le béton compacté, par la puissance de projection et l'impact sur la surface, permettent au matériau de se supporter sans affaissement, même sur une surface en surplomb.

Il est possible d'appliquer un passivant (par brossage, par application au pinceau, etc.) Sur les armatures réparées pour diminuer les risques de réapparition de la corrosion.

Cette application peut se faire dans le cas du béton projeté par voie humide, mais n'est pas possible lors de la projection par voie sèche, parce que la protection serait abîmée. [10]

**Etude comparative (Ragréage avec passivant v/s Béton projeté)**

|                           | Remplacement du béton par ragréage avec passivant  | Remplacement du béton par béton projeté  |
|---------------------------|--|--|
| Avantages                 | Petites de striction localisées de béton, pas de risque de déstabilisation de la structure.<br>Adapté aux petites surfaces.  | Mise en place du mortier de réparation plus rapide.<br>Béton moins poreux, donc moins sensible aux chlorures.<br>Adapté aux grandes surfaces.  |
| Inconvénients             | Beaucoup de main d'œuvre nécessaire.<br>Délai plus long<br>Nécessite un revêtement imperméabilisant.   | Risque de déstabilisation suite à une enlevée importante du béton.<br>Surcharge possibles -recalcule de la structure.<br>Pas adapté aux petites surfaces   |
| Contraintes phase travaux | Bien éliminer toutes les traces de corrosion des aciers et bien les passiver sur l'ensemble de la zone de désordre et non pas seulement au droit de l'épaufrure sous peine de corrosion accentuée. | Bien éliminer toutes les traces de corrosion des aciers et bien les passiver sur l'ensemble de la zone de désordre et non pas seulement au droit de l'épaufrure sous peine de corrosion accentuée. |
| Durée de vie estimée      | Temps de carbonations/détérioration du nouveau béton.<br>Limité par rapport à la présence de chlorures.<br>Améliorée si protection complémentaire.   | Temps de carbonations/détérioration du nouveau béton.<br>Limité par rapport à la présence de chlorures.<br>Améliorée si protection complémentaire.   |

**Tableau I.3 :** Tableau comparatif (Ragréage v/s Béton projeté).

### **I.5.3.3. Tissu de fibres de carbone :**

Cette technique est sur tout utilisée dans le renforcement d'un ouvrage, soit dans le cas de perte de section d'acier importante, soit lorsque la structure subit un ajout de charges par rapport à ce qu'elle peut supporter.

Ce procédé consiste à placer des bandes de toile de fibres de carbone par collage aux endroits déficients de l'élément concerné.

Préalablement, il est nécessaire d'éliminer les parties dégradées ou sans cohésion de l'élément et de reprendre les bétons.

Il est à noter qu'une protection au feu est nécessaire afin de respecter la norme en vigueur. [3]



**Figure I.9 :** Tissus de fibre de carbone. [6]

***Chapitre II***  
***Les différentes méthodes***  
***De renforcement***

### I I.1. Généralité sur le renforcement

Le renforcement est une opération qui consiste à augmenter le niveau de service ou performance mécanique d'une construction (augmentation de ductilité, de la résistance...).

#### I I.1.1. Définitions :

Le renforcement comporte :

- La mise en place d'un cintre, si nécessaire, suivi de la reprise des charges permanentes (par exemple, par veinage).
- la démolition du béton d'enrobage pour dégager les armatures, si besoin est, suivi d'une préparation de surface.
- le scellement d'armatures de couture dans le béton conservé et la mise en place d'armatures supplémentaires (avec recouvrements ou soudures).
- la réalisation de la nouvelle géométrie de la pièce, le béton ajouté pouvant être mis en place classiquement ou par injection sous pression ou par projection (le béton est mis en place classiquement dans le cas d'un plancher).
- si besoin est, une injection périphérique pour améliorer le collage.
- la mise en charge de la structure renforcée par décintrement ou par ajout de force, en général par déformation imposée (veinage, réglage de poussée...).
- la mise en œuvre d'un revêtement d'aspect et/ou de protection.

#### I I.1.2. Techniques de renforcement :

Les techniques de renforcement ne sont pas spécifiquement parasismiques car elles sont indépendantes des motifs de renforcement. Elles peuvent être classées en plusieurs catégories.

Renforcement par addition de nouveaux éléments de construction : voiles, palées de stabilité, contreforts extérieurs, chaînages, micro pieux, parois enterrées, etc. La liaison entre la partie ajoutée et la structure existante est d'une importance capitale pour l'efficacité de la solution.

Amélioration de la résistance de la section transversale des éléments constructifs :

Augmentation de section par enrobage.

Renforcement de l'armature.

Contre voiles.

Plaques d'acier collées.

Tissu de fibres de carbone collé.

1. Renforcement par confinement :

Chemisage des poteaux.

Corsetage des murs, poteaux, cheminées, ...

Contre voiles bilatéraux solidarisés.

2. Renforcement par précontrainte (essentiellement pour les ouvrages en béton armé ou maçonnerie).

3. Réalisation d'ancrages efficaces :

Ancrage des planchers dans les chaînages.

Ancrage des charpentes sur le niveau sous-jacent.

Ancrage à la fondation des ossatures préfabriquées.

Ancrage des équipements lourds.

1- Réparation :

Injection de fissures.

Remplacement de béton et d'armatures détériorés.

Remplacement des éléments de maçonnerie détériorés.

Traitement de surface afin d'améliorer la durabilité des bétons et des aciers.

2- Traitement de sol visant à :

Augmenter sa capacité portante.

Prévenir les tassements importants en cas de séisme.

Supprimer la susceptibilité de liquéfaction.

Prévenir des mouvements de terrain : glissements, éboulements, affaissements, coulées lentes, etc.

Le choix des techniques de renforcement s'effectue selon les critères habituels : coût, rapidité de mise en œuvre, durabilité, réversibilité (possibilité de retour ultérieur en arrière, ce qui est parfois demandé pour les monuments historiques), disponibilité, compétence des entreprises locales, etc.

Les solutions techniques retenues doivent également tenir compte d'un éventuel impératif de non-interruption de l'exploitation du bâtiment. En effet, cette exigence est très fréquente.

### **I I.1.3. Renforcement des structures :**

On peut citer :

Renforcement par des murs en béton armé.

Renforcement par mur de remplissage.

Renforcement par mur à ailes.

Renforcement par palées triangulées

### I I.2. Les voiles de contreventement :

#### I I.2.1. Introduction :

L'utilisation des voiles en béton armé pour la construction des structures dans les régions sismiques devient de plus en plus fréquente. La raison est que les voiles, outre leur rôle porteur vis-à-vis des charges verticales, sont particulièrement efficaces pour assurer la résistance aux forces horizontales. Reprenant la plus grande partie de l'effort sismique, ils conditionnent le comportement des structures et jouent un rôle primordial pour la sécurité. Par rapport à d'autres éléments de structures, l'utilisation des voiles, entre autres :

1. Augmente la rigidité de l'ouvrage ;
2. Diminue l'influence des phénomènes du second ordre et éloigne la possibilité d'instabilité.
3. Diminue les dégâts des éléments non-porteurs dont le coût de réparation est souvent plus grand que celui des éléments porteurs.
4. Apaise les conséquences psychologiques sur les habitants de hauts bâtiments dont les déplacements horizontaux sont importants lors des séismes.

Rend le comportement de la structure plus fiable que celui d'une structure ne comportant que des portiques. En effet, la philosophie de « capacité design » adoptée par tous les codes parasismiques de nos jours – impose la création d'articulations plastiques dans les poutres, alors que les voiles doivent rester élastiques. L'utilisation des voiles diminue aussi l'influence des éléments non-porteurs sur le comportement de la structure, influence que nous ne maîtrisons pas aujourd'hui. De plus, un voile fissuré garde une grande partie de sa résistance, ce qui n'est pas en général le cas d'un poteau. [11]

Les constructions contreventées par des voiles de béton armé (en nombre suffisant et bien disposés) sont donc un type de « structure rigide » qui limite les déplacements relatifs des planchers beaucoup plus que ne le font les ossatures. Les éventuels dommages dans les zones critiques créent moins d'effondrements que pour les ossatures.

La Figure 1.10 présente deux immeubles voisins, à l'origine apparemment semblables mais inégaux face aux secousses sismiques, le premier montre un comportement excellent et le second complètement ruiné. [12]



**Figure II.1 :** Comportement de deux immeubles voisins face aux secousses sismiques (Zacek,2008)

En effet, les règles parasismiques précisent que les bases des murs voiles (rez-de-chaussée) subissent les contraintes les plus élevées de la structure, elles sont donc considérées comme [13]

« Zones critiques ». C'est donc potentiellement là que la dégradation du béton ou sa rupture fragile commenceront, s'ensuit un effondrement partiel ou total de l'ouvrage. Ces régions situées à la base des voiles (Figure1.2), ainsi que celles situées à chaque niveau de changement notable de la section de coffrage, font l'objet de dispositions spéciales des règles de construction parasismique qui nous demandent de renforcer les chaînages à ces endroits. [14]



**Voile très endommagé  
(Séisme de Kobé, Japon 1995)**

**FigureII.2** : voile très endommagé (séisme de kobé, japon 1995)



**Rotule plastique dans un voile  
(Séisme de Tangshan, Chine 1976)**

Figure II.3 : Dégradation du bâtiment au niveau de la zone critique (Zacek,2008)

Ainsi, il est recommandé d'assurer une parfaite adhérence entre un béton et des armatures de qualité. Tant qu'il ne reçoit que les charges verticales permanentes (poids de la construction, des équipements, des occupants...), le béton armé peut présenter certains défauts qui restent cachés (ou non).

Sous l'effet des secousses, le béton perd (plus ou moins brutalement) son adhérence autour et à l'intérieur des armatures, ce qui affaiblit l'ouvrage.

Au-delà des déformations possibles sans dommage il y a d'abord dégradation puis rupture. Il est donc souhaitable d'obtenir un endommagement progressif sans perte de résistance significative, plutôt que la rupture brutale.

A gauche de la Figure 1.2, est montré un exemple de ruptures « fragiles » (les armatures n'étaient pas appropriées en zone sismique). A droite, exemple de rupture dite « ductile » d'un voile (la disposition des aciers longitudinaux et transversaux très rapprochés et de section modérée permet une bonne « plasticité » ou « ductilité » du béton armé. C'est-à-dire que, s'il est trop contraint sous l'effet des secousses, l'élément de béton armé se dégrade de façon irréversible, mais ne « se rompt pas »). [15]

### **I I.2.2: Renforcement des structures en béton armé par voiles de contreventement**

Des murs de contreventement (hors exigences sismiques) en béton armé peuvent ne pas/plus être capables de résister aux efforts externes dans leur plan et/ou hors plan.

Cela peut être dû à la création d'une ouverture, à des défauts de construction, au changement des charges d'exploitation, à la corrosion, etc.

Le renforcement externe par les systèmes composites Tyfo® peut restaurer ou améliorer la capacité portante et la contribution au contreventement initial (hors exigences sismiques) des murs à l'ensemble de la construction, selon les besoins du projet.

Les systèmes composites Tyfo® peuvent être appliqués sur les surfaces des murs dans les deux directions, horizontale et verticale.

Ils peuvent être appliqués partiellement ou sur la totalité de la surface par des bandes, avec ou sans espacement, pour contribuer à l'augmentation de la contribution du voile à la stabilité et/ou au contreventement général de la structure (hors exigences sismiques).

Le renforcement des voiles sollicités en flexion composé est permis sous réserve que le critère de la NFEN1992-1-1 soit vérifié.

Seules les bandes sur les côtés courts sont considérées pour le renforcement à la flexion dans le plan du voile (efforts de contreventement, ...) et leur dimensionnement est fait selon les principes de dimensionnement en flexion en considérant le voile comme une poutre haute (voir

Figure3-16ci-dessous). La Figure10-17 illustre l'application des mèches d'ancrage à la base du voile dans le cas de renforcement en flexion (flexion dans le plan ou hors plan).

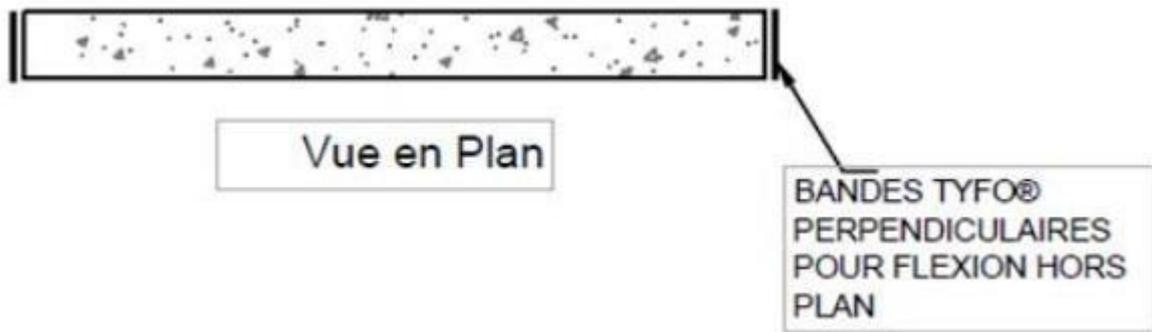


Figure II.4 Configuration du renforcement d'un voile en flexion dans le plan

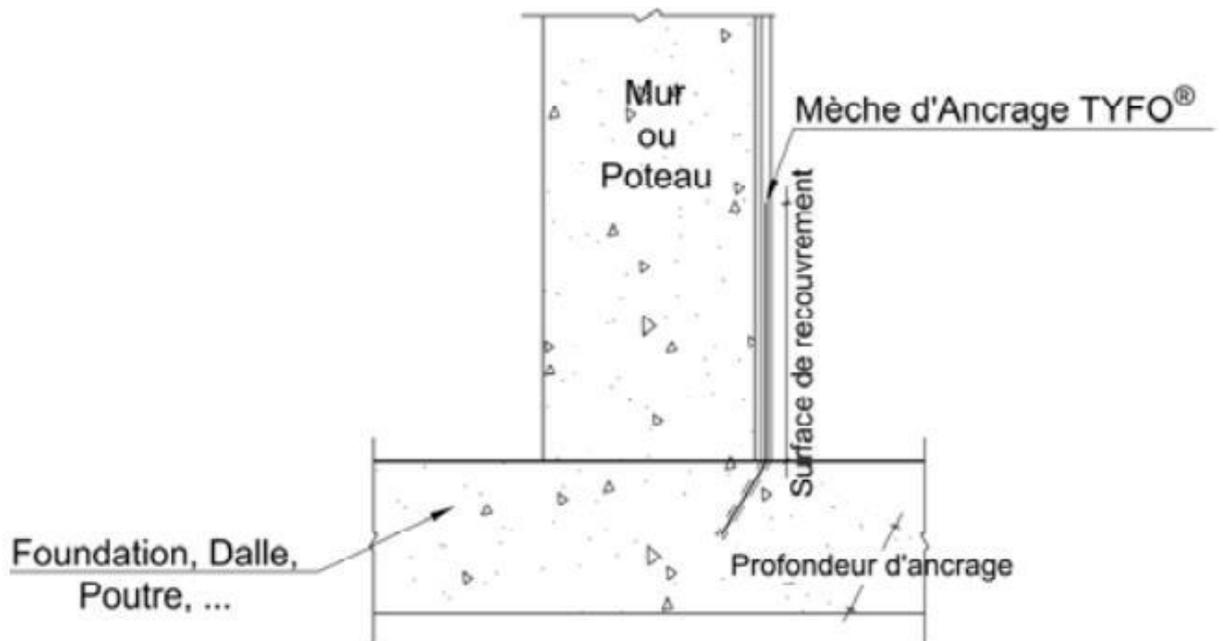


Figure II.5 Détail du scellement dans le béton de la mèche d'ancrage des bandes de renfort en flexion.

Le procédé de renforcement d'éléments de structures par collage de fibres de carbone et de fibres de verre, dénommé Tyfo® Le collage du composite sur toute la surface du voile a donné un résultat trop satisfaisant, mais ce choix n'est pas économique, d'où l'utilisation du principe d'optimisation topologique est nécessaire pour bien localiser les zones de renforcement [16].

Cependant, il faut rester objectif quant à l'application des composite dans les éléments de béton armé car ces derniers peuvent créer des ruptures prématurées des éléments, d'où la nécessité d'approfondir les recherche dans les deux aspects (numérique et expérimentale) concernant le collage externe des composite [17].

Pour améliorer le comportement d'une structure, l'une des solutions qui a été la plus usitée par les bureaux d'études est celle de l'ajout de voiles de contreventement. Leur introduction a pour visée d'empêcher un effondrement d'ensemble en château de cartes. La proposition portant principalement sur des rajouts de voiles en façades de structures contreventées en portiques. L'objectif étant de ne pas modifier la distribution architecturale à l'intérieur des appartements.

Toutefois, pour augmenter la rigidité des éléments structuraux, ou réparer des ensembles de poteaux de niveaux fortement touchés, cette condition n'a pas pu être respectée et des travaux de confortement importants ont été entrepris avec des réaménagements internes rendus Obligatoires. [18]



FigureII.6: Renforcement en béton armé par voiles de contreventement

Une attention particulière doit être accordée à la liaison du voile avec le poteau repris, en s'assurant de la continuité des barres horizontales par un ancrage dans la masse de ce dernier et de la bonne transmission des efforts entre niveaux consécutifs par des dispositions de ferrailage adaptées.

La configuration que l'on retrouve est la disposition d'un voile prolongeant un poteau chemisé. Il est à noter que ce type d'intervention doit respecter la symétrie d'ensemble, c'est à dire qu'il faut prévoir un second dispositif de ce renforcement qui sera disposé à son opposé pour assurer l'équilibre de la structure tout en conservant sa symétrie en plan. Dans le cas de plusieurs niveaux, le voile doit être prolongé verticalement pour satisfaire aux conditions de rigidité de niveaux et de régularité en élévation [19].

### **I I.2.2.1. Les principales caractéristiques du comportement des voiles :**

Les principaux paramètres influençant le comportement des voiles en béton armé sont l'élanement (rapport hauteur H sur la largeur L du voile), les armatures (pourcentages et dispositions) et la contrainte normale moyenne (David ovicietal.1985).

Il y a lieu de distinguer les voiles élancés (élanement H/L supérieur à 1.5 environ) et les voiles courts (élanement H/L inférieur à 1.5). [20]

Voiles élancés :

Les principaux modes de rupture des voiles élancés sont représentés sur la figure 1.3 :

Modes de rupture par flexion

-La rupture en flexion par plastification en traction des armatures verticales (a1) est le mode de rupture « normal » lorsque la flexion est prépondérante et que l'effort normal est faible.

La rupture en flexion par écrasement du béton (a2) apparaît pour des voiles assez fortement sollicités et armés en flexion.

Le mode de ruine (a3) concerne des voiles faiblement armés en flexion, surtout si les armatures verticales sont essentiellement réparties et non pas concentrées aux bords.

Modes de rupture par flexion /cisaillement

-Les deux derniers modes de rupture-rupture en flexion/ effort tranchant :

(b1) par plastification des armatures verticales de flexion et des armatures transversales, (b2) rupture par écrasement dans le béton de l'âme -apparaissent quand le cisaillement

Deviens prépondérant.

Le comportement d'un voile élancé est assimilable à celui des poutres et il n'y a pas de difficulté pour évaluer, par les méthodes classiques, la résistance et la déformabilité vis-à-vis de la rupture par flexion ou par effort tranchant.

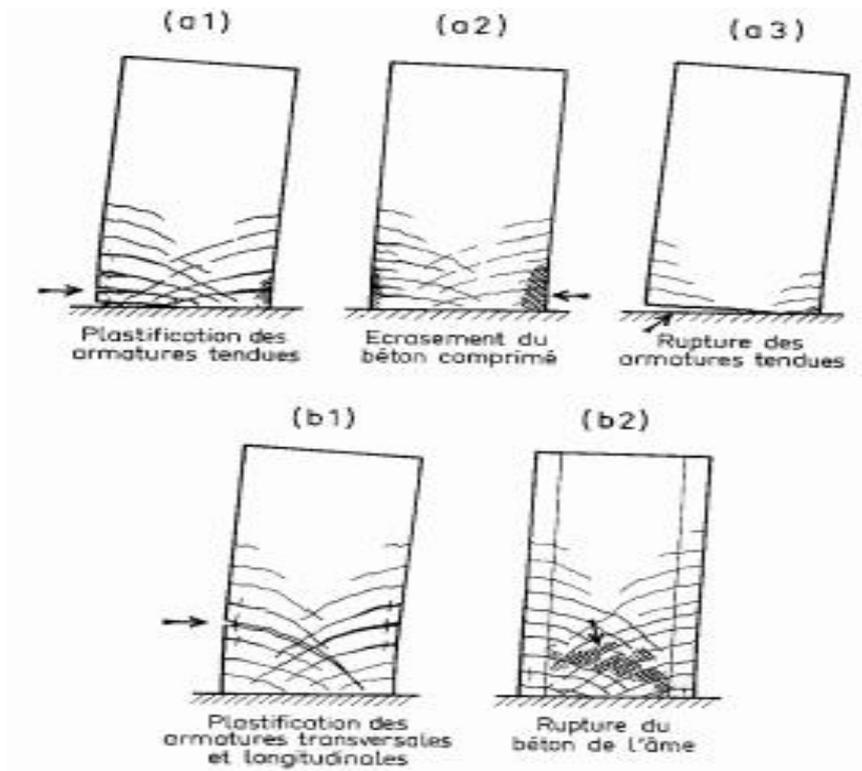


Figure II.7. Modes de rupture de voiles élancés (David ovicietal.1985)

### ➤ Voiles courts :

Dans le cas des voiles courts, l'effort tranchant est généralement prépondérant par rapport à la flexion. Les principaux mécanismes de rupture sont ceux de la figure 1.4. :

-La rupture par glissement à l'encastrement (c1) est obtenue par plastification progressive des armatures verticales sous l'action de la flexion et du cisaillement ou par insuffisance d'armatures verticales réparties. Ce mode de cisaillement est caractérisé par une fissure horizontale située à la base de mur dont les lèvres glissent l'une par rapport à l'autre. Il apparaît souvent pour des chargements cycliques.

-La rupture par effort tranchant avec plastification (éventuellement rupture) des armatures le long de fissures diagonales (c2) est un cas aussi fréquemment rencontré.

-La rupture par effort tranchant dans le béton de l'âme (c3) est produite par une destruction du béton à la base des bielles qui transmettent les efforts de compression

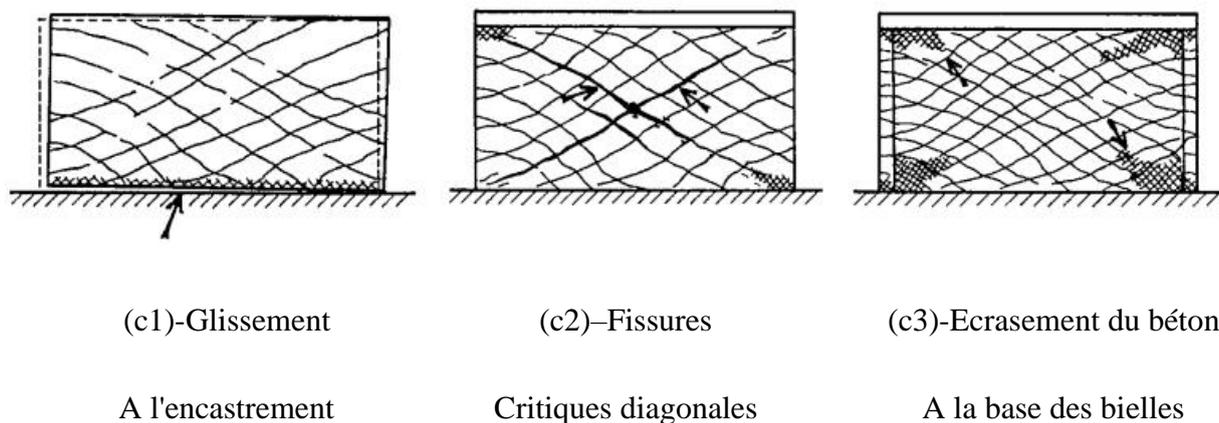


Figure II.8. Modes de rupture de voiles courts (David ovicietal.1985)

### II 3. Chemisage en acier :

#### II 3.1. Introduction :

L'une des méthodes de renforcement qui a été très répandue est le chemisage en acier. Les chemises en acier à parois minces sont plus efficaces et plus faciles à appliquer autour des poteaux circulaires. Ils viennent généralement en deux moitiés, semi-circulaires, attachés à la colonne et soudés le long de deux verticales. L'écart entre l'enveloppe et le poteau est cimenté avec des mortiers non rétractables. Ces chemises sont jugées efficaces, ils ont même été proposés pour le renforcement des poteaux en formes de carrée ou rectangulaire, en utilisant une grande quantité de béton (plutôt que du coulis de mortier) pour remplir l'écart entre l'enveloppe et la colonne.

Sur les poteaux, par exemple, les chemises en acier sont constituées de quatre cornières, généralement, liés à l'aide de l'époxy, ou tout simplement en contact avec l'existant sur toute la longueur. Alors, des plaques d'acier minces continues ou des bandes épaisses en acier horizontales ou des plaques de latte sont soudées sur les cornières. Dans les limites imposées par le poids des segments en acier, des plaques minces continues peuvent être soudées à l'angle en gros morceaux en forme de L, sur la moitié du périmètre du poteau et soudé sur place. L'écart de 12 à 25 mm entre la plaque et la surface du poteau est cimenté avec les mortiers non rétractables. Avant d'être soudé, les plaques de cisaillement peuvent être préchauffées dans le domaine de 200-400°C, dans le but d'exercer un certain confinement "actif" sur la colonne après qu'ils refroidissent.

Les chemises en acier autour de colonnes améliorent la ductilité par confinement, augmentent la résistance au cisaillement, et améliorent les recouvrements défectueux. Tous ces

effets sont liés à la réaction de l'enveloppe dans la direction transversale de l'élément. Mais puisque l'acier est isotrope, si la chemise se compose d'une plaque mince continue, elle présentera une rigidité importante et une résistance dans le sens longitudinal, ce qui affecte inévitablement la rigidité en flexion et le moment résistance. Cependant, des chemises en aciers ne sont pas normalement destinées à l'amélioration de la résistance en flexion. Leur maintien au-delà de l'extrémité de l'élément, n'est pas facile. Par ailleurs, même si elles peuvent transférer des forces au-delà de l'extrémité de l'élément (par boulonnage ou soudage à d'autres éléments en acier à travers la dalle), elles ne sont pas si efficaces dans la résistance à la flexion, puisque leurs parois minces peuvent flamber. [21]



**Figure II.9 :** Chemisage d'un poteau en acier

### **II 3.2. Avantages et inconvénients du chemisage en acier :**

Les chemises en acier sont plus chères que ceux en béton. Cependant, leur technologie est simple, familier à l'industrie de la construction et facilement disponibles presque partout. Ainsi, c'est la technique choisie pour le renforcement d'urgence directement après les tremblements de terre destructeurs, pour éviter l'effondrement des bâtiments fortement endommagés, ou pour rendre disponible ceux modérément endommagés pendant la période de réplique. Ainsi, une évaluation détaillée et une conception de rénovation peuvent avoir lieu par la suite. Les chemises en acier peuvent être enlevées lorsque la modernisation est mise en œuvre, ou incorporée dans un béton enveloppe. Malgré cet avantage et les rôles historiques, les chemisages en acier (dans le renforcement des membres en béton armé), commencent à être remplacés rapidement par les PRF, qui, bien que plus coûteux, sont beaucoup plus léger, plus facile à appliquer et mécaniquement plus efficace. Cependant, les chemises en acier circulaires

ou elliptiques posés autour des éléments rectangulaires sont ni pratique ni esthétique, et peuvent combler le trafic. De plus, l'enveloppe en acier est sujette de la corrosion et nécessite un entretien continu. La plupart des avantages sont progressivement perdus par la suite du fluage du béton.

Ainsi, ils sont négligés dans la conception.

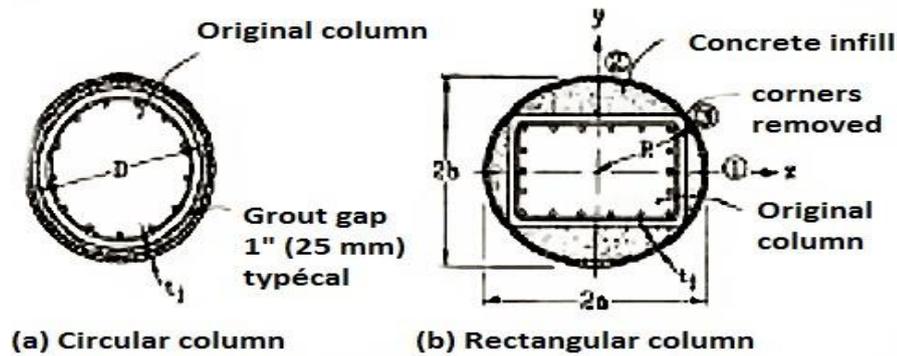
### II 3.3. Renforcement par chainage métallique :

Ce type de renforcement est utilisé généralement pour les poteaux, l'union de la platine. A la structure peut se faire par : Collage, vissage, ou bien ancrage.

Du point de vue transmission des efforts, la meilleure technique est celle du collage.

Pour certains ouvrages en béton armé, le confinement du béton par les cadres d'armature internes peut avoir été sous-dimensionné. Cette déficience peut être compensée par l'ajout d'un confinement extérieur, réalisé par exemple avec un chemisage en acier. La technique du chemisage en acier consiste, pour les poteaux de section circulaire, positionner deux demi-coques en acier (d'un rayon supérieur de 12 à 25 mm au rayon de la section initiale de la colonne) autour du poteau, puis de les souder sur place de manière à former un tube continu. Le faible espace annulaire formé entre le tube d'acier et le poteau est alors comblé avec un coulis de ciment. Pour les poteaux de section rectangulaire, la technique de mise en place est identique mais il est recommandé d'utiliser des chemisages elliptiques, comme illustré sur la Figure (II.7). Ceux-ci présentent l'inconvénient d'être assez encombrants et peuvent par exemple gêner le trafic en réduisant la largeur des voies de circulation, des

Chemisages rectangulaires ont donc également été développés. Cependant, même si les chemisages rectangulaires s'avèrent efficaces pour un renforcement au cisaillement, les performances en termes de confinement et d'amélioration de la ductilité en flexion sont beaucoup moins bonnes que celles obtenues par des chemisages elliptiques [22].



**Figure II.10 :** Chemisage acier des poteaux à section circulaire et rectangulaire. [23].

Beaucoup de réhabilitations de structures par chemisage ont dans un premier temps été dimensionnées par l'unique savoir-faire des ingénieurs qui ne disposaient à l'époque d'aucune doctrine technique.

Durant les dernières décennies, le béton et l'acier ont joué un rôle primordial pour le renforcement, tant de bâtiments que d'ouvrages d'art.

Les techniques de renforcement par chemisage en acier ou béton armé présentent souvent des mises en œuvre difficiles, impliquant des durées de travaux pouvant être assez longues. Il était donc nécessaire d'utiliser des matériaux plus durables et de les associer à de nouvelles méthodes de réhabilitation permettant de ralentir ces dégradations et de prolonger la durée de service des infra structures existantes. De telles techniques

Rencontrent un grand intérêt lors d'opérations de remise en conformité parasismique

- **Avantage :**

- Faible augmentation des sections
- Assez rapide à mettre en œuvre

- **Inconvénient :**

- Coût élevé
- Nécessité d'une main d'œuvre qualifiée
- Sensibilité à la corrosion et entretien régulier nécessaire

- **Les matériaux utilisés :**

- **La colle :**

C'est une résine époxy choisie pour ses propriétés d'adhérence sur acier ainsi que sur le béton. Le film résiduel de la colle doit être de faible épaisseur et d'une rigidité suffisante pour

transmettre intégralement par adhérence les efforts à la tôle. Cette rigidité étant réduite par une augmentation de température, des précautions spéciales doivent être prises dans le cas de structures soumises à des températures élevées.

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

### □ La tôle :

Les tôles d'aciers sont généralement de qualité courante, leur épaisseur est limitée à 3mm de façon à leur permettre de suivre les courbures du support.

Si des sections d'acier plus importantes sont nécessaires, il est préférable de superposer des tôles plutôt que d'augmenter l'épaisseur. Dans le but d'épouser l'allure de la déformée de la section de béton renforcé (exemple : ressorts à lames des camions) [24].

### II 3.3.1 La mise en œuvre des plats collés :

Le renforcement de structures en béton à l'aide de plats d'acier cloué sa vu le jour dans les années 60, en Suisse et en Allemagne. Dans ce procédé, des pièces d'acier sont collées à la surface en béton à l'aide d'un système adhésif à l'époxy à double composante pour obtenir un système composite.

Les pièces en acier peuvent être des plaques, des profilés en U, des cornières ou des poutres composées.

Les pièces en acier appliquées sur les côtés ou le fond d'un élément de la structure peuvent en améliorer la résistance au cisaillement ou à la flexion.

En plus de l'adhésif à l'époxy, on utilise habituellement des ancrages mécaniques pour garantir que les éléments en acier reprennent bien les charges extérieures en cas de défaillance du système adhésif. Les éléments exposés doivent recevoir une protection contre la corrosion immédiatement après leur mise en place. Indépendamment de la protection anti corrosion spécifiée, il conviendra de considérer la durabilité dans le long terme et les prescriptions concernant l'entretien de ces éléments en acier.

Les plats destinés à être collés doivent être traités par sablage pour donner à la surface une rugosité supérieure. Après l'étape qui suit le sablage, les plats doivent être revêtus d'un produit de protection, soit un type de véris, soit un primaire époxy de même nature que la colle, capable d'assurer la protection temporaire de la tôle et son adhérence ultérieure à la structure (compatibilité avec les colles envisagées) [25].

Le sablage est une opération difficile à réaliser puisqu'il est conditionné par les facteurs atmosphériques.

Les tôles doivent être transportées avec soin de façon à ne pas entraîner de défauts de planéité, de rayure ou de choc.

La préparation du support exige les deux actions d'éliminer les parties dégradées et de rendre le support plan. La reprise de la planéité du support nécessite un ragréage au mortier de résine ; les produits de ragréage doivent être compatibles avec les produits d'encollage.

D'une façon générale les surfaces à ragrées ne doivent pas représenter plus de 20% de la surface à en coller.

La colle doit être préparée en respectant le mode d'emploi du produit défini par le fournisseur.

L'encollage exige une couche de colle sur le plat d'acier et sur la paroi du béton.

Le meilleur outil pour étaler régulièrement la colle et assurer l'épaisseur

Moyenne requise est la spatule crantée. Pour un collage efficace, il est indispensable de maintenir la colle sous pression pendant la durée de prise, le temps pendant lequel l'effort de serrage est maintenu doit être fonction de la viscosité de la colle et de la largeur des plats d'acier (Serre-joint, barres filetées, les étais).

Pendant la prise de la résine de collage, il est recommandé d'éviter tout effet vibratoire en particulier tout mouvement issu de trafic répété, ou d'effets dynamiques de machines.

Les plats doivent être protégés en fin des travaux contre la corrosion avec une peinture de type époxy compatible avec le primaire de protection provisoire.

Dans le cas où la structure doit satisfaire à des exigences de stabilité au feu, une protection des plats doit être prévue pour éviter que le film de colle ne dépasse une température jugée critique. Cette protection peut être réalisée par l'utilisation de produit isolant.

Il est à noter que le renfort avec les platines en acier présente des inconvénients tels :

Le découpage des platines se fait généralement en atelier.

Les longueurs sont limitées.

Le transport n'est pas toujours aisé.

L'étalement des éléments structuraux est parfois nécessaire.

La durabilité vis-à-vis de la corrosion et la fatigue pose problème

### **II 3.3.2. Le renforcement au moyen de profilés métalliques :**

L'association des profilés métalliques aux structures en béton armé permet d'augmenter la capacité portante de la structure. La réalisation ainsi d'une structure mixte acier-béton dont il faut assurer la compatibilité entre ces deux matériaux est indispensable et nécessaire.

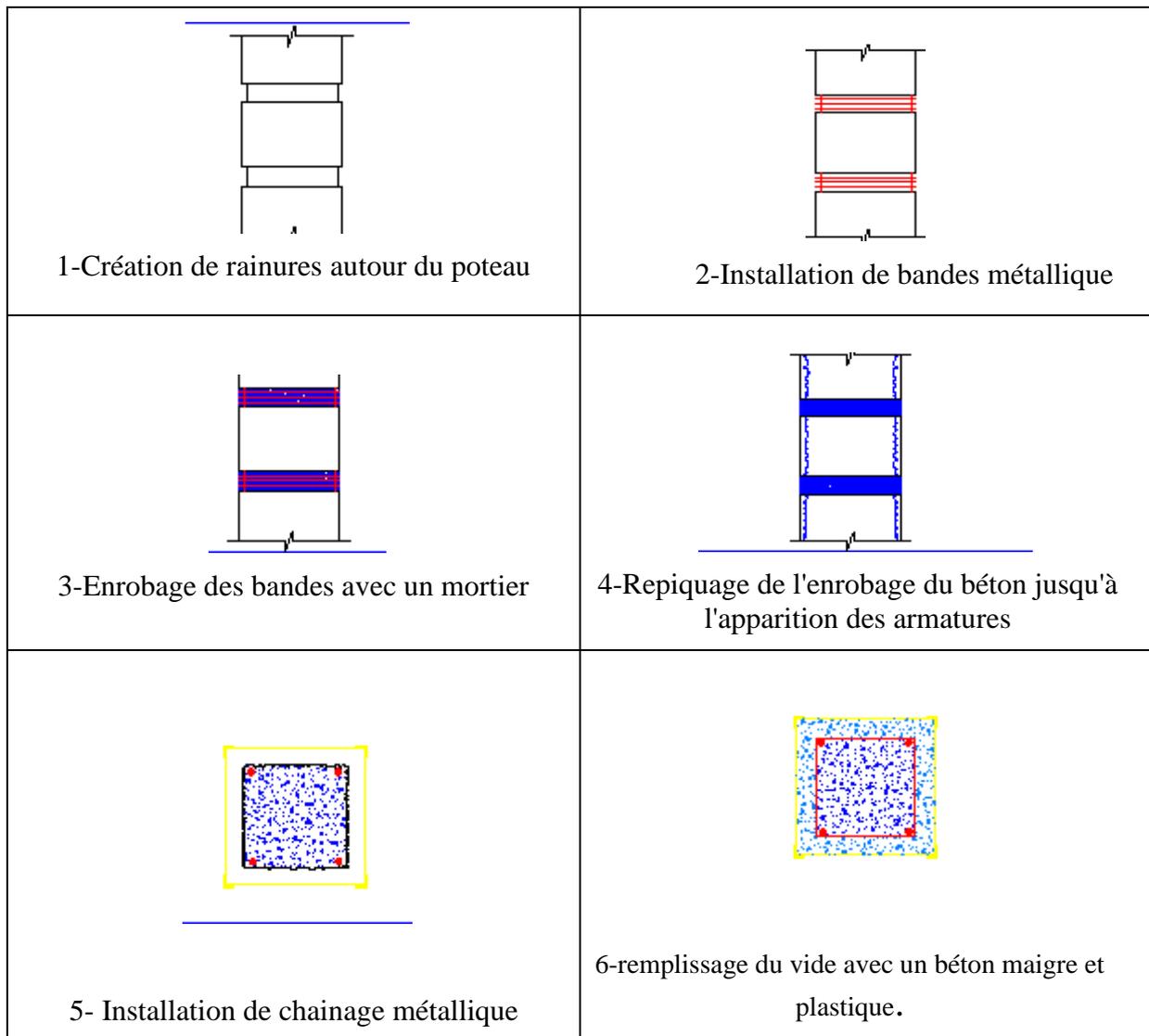
Cette compatibilité entre les deux matériaux est liée directement à la qualité de l'interface

(acier-béton) pour bien transmettre les efforts internes.

L'intérêt de cette méthode est la rapidité de réalisation in-situ, les pièces métalliques sont préfabriquées en atelier, et leur montage s'effectue à l'aide de cheville ou tiges ancrées.

L'assemblage sur site des éléments décomposés en tronçons facilite ainsi leur :

1. Transport et mise en place
2. Création de rainures autour du poteau
3. Installation de bandes métallique
4. Enrobage des bandes avec un mortier
5. Repiquage de l'enrobage du béton jusqu'à l'apparition des armatures
6. Installation de gainage métallique
7. Remplissage du vide avec un béton maigre et plastique.



**FigureII.11** : Différents étapes renforcement d'un poteau par chainage métallique.

L'inconvénient majeur de cette méthode de renforcement tient à la précision qui est requise lors du mesurage de la structure existante, si les éléments fournis Positionnent correctement au montage.

Il recommandé d'envisager des Possibilités d'ajustement et de positionnement des pièces métalliques pré-forées vis-à-vis de forages dans le béton, lors du montage, contrairement aux Constructions métalliques nouvelles [26].



**FigureII.12** : Renforcement de poteaux au moyen de profilés métallique.

### II 3.3.3. Le scellement d'armatures pour béton armé :

Les scellements d'armatures dans le béton armé sont habituellement utilisés pour résoudre les problèmes d'oublis d'armatures en attente, l'extension d'un ouvrage ou bien dans le but d'assurer la continuité d'éléments préfabriqués. Les scellements sont réalisés à l'aide de mortier à base de liants hydrauliques ou de résines dont les constituants du mélange sont pré-dosés.

Dans ce dernier cas, le scellement peut être réalisé à volume prédéterminé (scellement chimique obtenu par broyage d'une ampoule prêt à l'emploi), ou à volume à la demande comme les scellements chimiques réalisés par mélange d'une résine et durcisseur par l'intermédiaire d'une buse et d'un pistolet ou bien à partir d'un kit.

Il est important de signaler qu'il existe une certification concernant les produits Spéciaux pour construction en béton, dont les produits de scellement et de calage, et à pour but de garantir l'aptitude à l'emploi du produit de scellement dont notamment ses performances minimales, ayant reçu un avis favorable d'un contrôleur technique [27].

### II 3.3.4. Renforcement d'un poteau existant en fonte avec un corset en acier :



**Figure II.13 :** Des poteaux renforcés avec un corset en acier.

Les poteaux de fonte ont été utilisés très tôt au 19<sup>ème</sup> siècle pour suppléer les porteurs traditionnels en bois, trop vulnérables aux agressions de l'humidité en pied. Leur section creuse ou pleine d'un diamètre réduit offrait une grande réduction d'encombrement par rapport à une solution maçonnée mais aussi une vitesse d'exécution sans comparaison. La vente sur catalogue de ces produits manufacturés en grande série par les fonderies fait que l'on retrouve ces poteaux supportant aussi bien des structures de planchers en fer que des structures de plancher en bois [28].

### II 3.4. Renforcement par plaque métallique :

La préparation du support est très importante, il est donc nécessaire de faire des décaissés dans le béton pour améliorer la transmission des efforts, de traiter les surfaces avec une peinture primaire de résine époxy.

S'il s'agit d'un renforcement avec armatures, il faudra mettre cette armature en place et réaliser le bétonnage par coulage ou pompage.

Lorsqu'il n'est pas possible de faire un chemisage complet des éléments pour le cas des façades, il faut recourir à d'autres procédés : renforcement par plaques métalliques ou bien l'épaississement de l'élément en béton sur deux faces opposées.

## Chapitre II : Les différentes méthodes de renforcement

Les éléments de renfort doivent être ancrés dans le béton primitif : soit par boulonnage pour le cas des platines métalliques, soit par ancrage pour le cas de béton additif.

- 1- Nettoyage et sablage du support initial de béton du poteau.
- 2- Ancrage et scellement de chevilles pour fixation d'armatures additionnelles.
- 3- Scellement d'armatures d'ancrage sur le plancher en amont du poteau.
- 4- Scellement d'armatures d'ancrage sous le plancher en aval du poteau.
- 5- Fixation des armatures additionnelles sur les tiges d'ancrage.
- 6- Étamage d'une couche de résine sur la surface de béton primitif.
- 7- Coulage de l'enveloppe en béton riche et fluide.

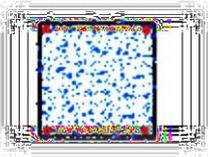
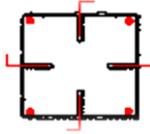
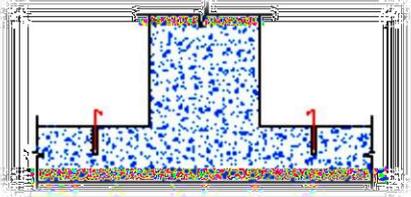
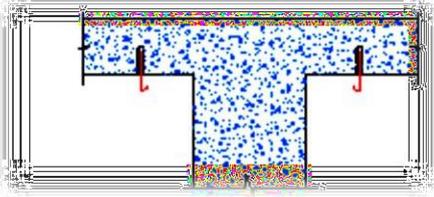
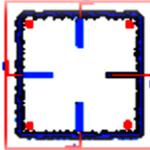
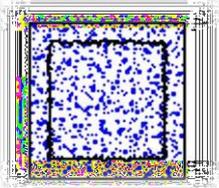
|   |   |
|---|---|
|    |    |
| 1- nettoyage et sablage du support initial de béton du poteau                       | 2- Ancrage et scellement de chevilles pour fixation d'armature additionnelles.        |
|  |   |
| 3- scellement d'armatures d'ancrage sur le plancher en amont du poteau              | 4- scellement d'armatures d'ancrage sous le plancher en aval du poteau.               |
|  |  |
| 5- fixation des armatures additionnelles sur les tiges d'ancrage.                   | 6- étamage d'une couche de résine sur la surface de béton primitif.                   |
|  |   |
| 7- coulage de l'enveloppe en béton riche et fluide.                                 |   |

Figure II.14 : Différents étapes de renforcement des poteaux au moyen d'une enveloppe en béton armé (chemisage).

**II. 4. Renforcement par chemisage en béton :**

Le procédé classique dont l'efficacité a été largement vérifié par l'expérience, consiste à chemiser l'élément en augmentant sa section par mise en œuvre d'une épaisseur

De béton surtout le périmètre de l'élément primitif. L'utilisation d'un micro-béton, auto compactable, pour remplir les interstices sans mode de vibration, peut s'avérer essentielle.

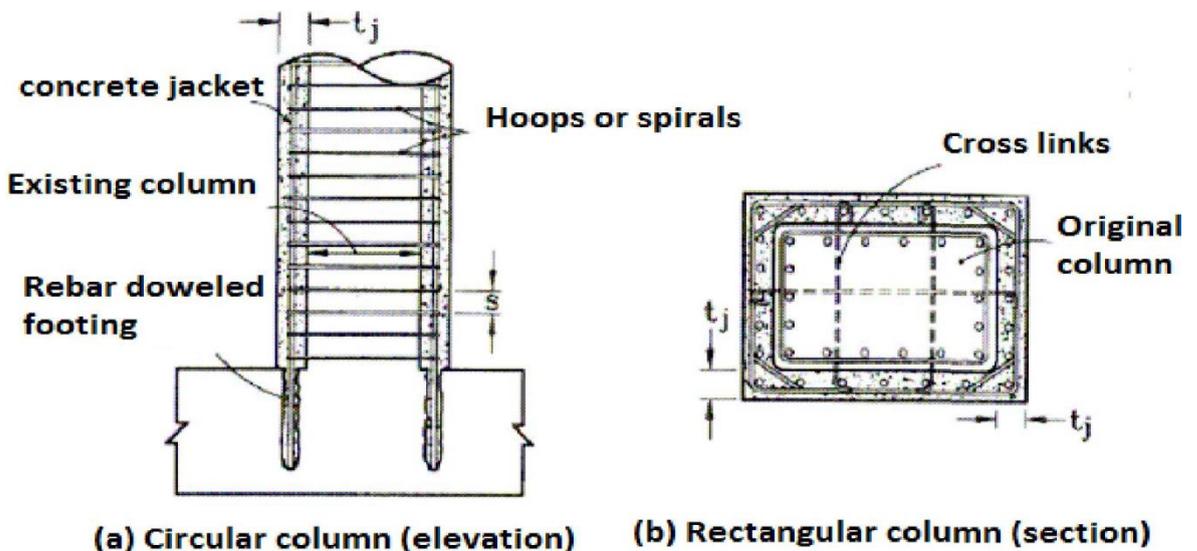
La préparation du support est très importante, il est donc nécessaire de faire des décaissés dans le béton pour améliorer la transmission des efforts, de traiter les surfaces avec une peinture primaire de résine époxy.

S'il s'agit d'un renforcement avec armatures, il faudra mettre cette armature en place et réaliser le bétonnage par coulage ou pompage.

Lorsqu'il n'est pas possible de faire un chemisage complet des éléments pour le cas des façades, il faut recourir à d'autres procédés : renforcement par plaques métalliques ou bien l'épaississement de l'élément en béton sur deux faces opposées.

Les éléments de renfort doivent être ancrés dans le béton primitif : soit par boulonnage pour le cas des platines métalliques, soit par ancrage pour le cas de béton additif.

Les endroits les plus communs pour ce type de renfort sont les piliers soumis à compression (en plaçant des couronnes autour de l'élément à renforcer), les éléments (poutres ou dalles) soumis à des moments fléchissant et à des efforts de cisaillement et la partie comprimée des dalles ou plaques. [29]



**Figure II.15 :** Chemisage béton de poteaux de section circulaire et rectangulaire

### II. 4.1. Projection du béton :

Cette technique est largement répandue, tant sur le plan de renforcement des structures ou éléments structurels insuffisantes, que sur un plan de réparation des structures ou éléments structurels défailantes, et exigeant une mise en œuvre soignée. Le béton projeté peut éventuellement être associé avec un autre mode de réparation, qui est le rajout d'armatures d'aciers. Cette méthode de projection de béton peut être réalisée, soit par voie sèche ou bien par voie humide.

Le procédé par voie sèche est particulièrement recommandé pour la réparation des ouvrages car cette voie permet de recueillir un béton très compact.

Cette projection est effectuée à grande vitesse de lancement, assurant ainsi :

- Une pénétration en grande profondeur dans les pores du support à renforcer.
- Une bonne adhérence de l'interface

Si les dégradations sont profondes, on procède au préalable à un repiquage ou une démolition des surfaces de béton, sinon on fait appel au procédé de sablage pour le cas des dégradations superficielles.

La qualité des matériaux d'adjonction ou de rajouts, doit être au moins égale à celles des matériaux d'origine des ouvrages.

Dans la mesure du possible, la lance de projection doit être tenue perpendiculairement à la surface à traiter, et à une distance moyenne de 1.2m.

En faisant un nombre de passes aussi faible que possible, il faut chercher à réaliser un enrobage régulier, et obtenir ainsi une couche compacte.

La projection verticale vers le bas n'est pas recommandée, ainsi qu'un talochage n'est pas souhaité.



**Figure II.16 :** Renforcement au moyen de béton projeté.

Principales techniques de renforcement Ancienne poteaux Chemisage en béton projeté

Armatures ajoutées :

- Réduction des masses pour réduire l'action sismique
- Solidarisation de deux blocs de bâtiment lorsqu'il est impossible de réaliser un joint de désolidarisation (figure II.13).

- Renforcement du système de fondations Objectifs :

– Augmentation de la surface d'assise pour réduction de la pression sur le sol ;

– Augmentation de la rigidité et renforcement du ferrailage de la semelle.

- Renforcement par application de matériaux composites (fibres carbone, verre ...) ou par chemisage en béton armé.

- Renforcement par remplissage des portiques. [30]

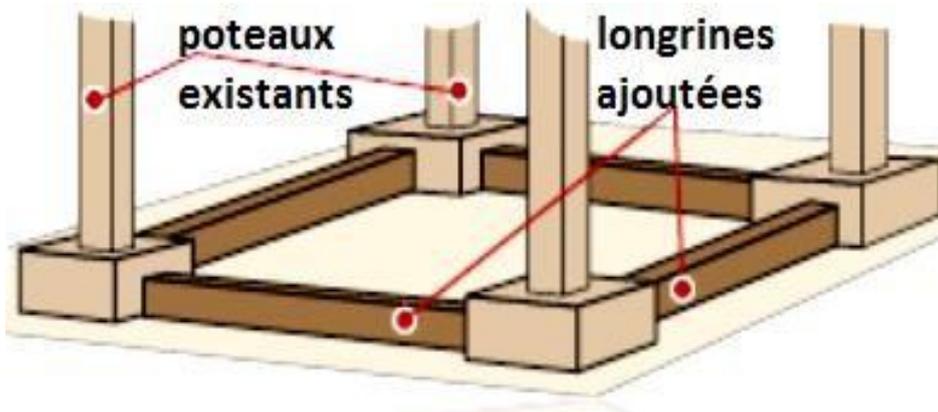


Figure II.17 Fondation solidarisées par ajout de longrine

◇ Exemple de renforcement d'un poteau par ajout de béton et d'armatures passives

La figure ci-après montre le renforcement du ferrailage d'un poteau

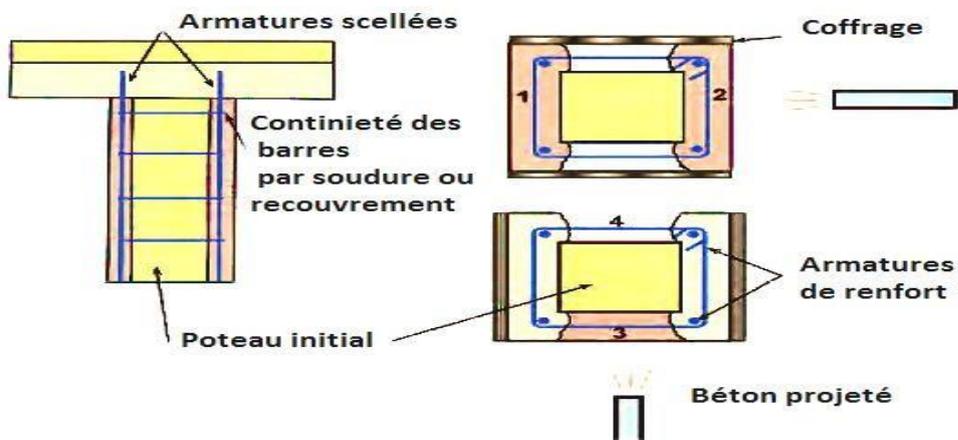


Figure II.18: exemple de renforcement d'un poteau par ajout de béton et d'armatures

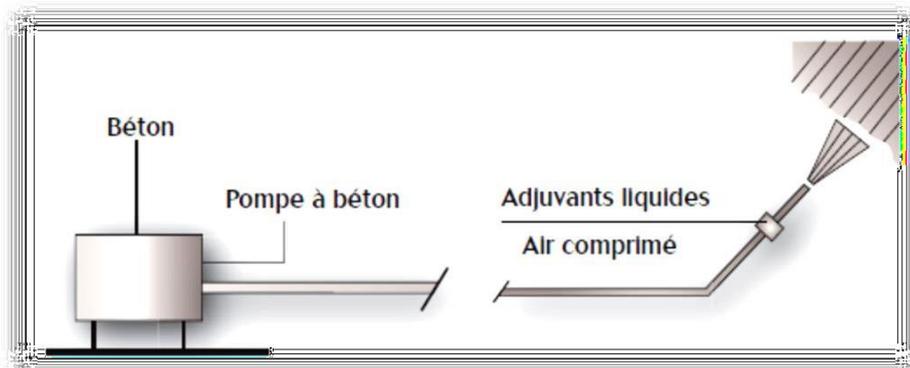
### II. 4.1.1. Projection par voie sèche :

La vitesse des éléments du mélange à la sortie de la lance est de l'ordre de 100m/s. elle décroît plus rapidement pour les éléments de faible masse (eau-fines-ciment) que pour les gros granulats.

Il se forme alors sur la surface d'application une fine couche de pâte formée par l'eau et le ciment, qui retient instantanément les granulats fins, mais sur laquelle les gros granulats commencent par rebondir, au fur et à mesure de son épaisseur, cette couche est « martelée » par les gros granulats qu'elle finit par retenir, ce qui donne. [26]

- Un serrage énergétique dû à la grande vitesse de projection.
- Une bonne adhérence due à la richesse en ciment dans la zone au contact de la surface d'application.

Du fait de l'enrichissement en ciment au voisinage de la surface, le dosage initial en ciment peut être limité. Toute fois les normes préconisent un dosage pas moins de 280kg/m<sup>3</sup> de ciment ayant une résistance à la compression supérieure à 25MPa.



*Figure II.19 : projection par voie sèche.*

### II. 4.1.2. Projection par voie mouillée :

La vitesse de transport et de projection est inférieure à 1m/s, nettement plus faible que dans le cas d'une projection à voie sèche. Le mélange ayant sa composition définitive au passage de la lance, il n'y a pas de surdosage dans la zone de contact avec la surface d'application.

Pour obtenir des performances mécaniques équivalentes à celles d'un béton

Projeté par voie sèche, il est nécessaire d'augmenter le dosage en ciment.

L'emploi d'adjuvants permet d'obtenir la maniabilité désirée, avec un dosage en eau aussi faible que possible, une telle consistance du béton exigera un affaissement au cône correspondant, de l'ordre de 12 cm [31].



**Figure II.20 :** Projection par voie mouillée.

### Avantages des deux méthodes :

#### a) Par voie sèche :

- Possibilité d'utiliser des granulats de grande dimension (15 à 20 mm)
- Un dosage relativement faible en ciment.
- Un faible rapport E/C.
- Un compactage énergétique
- Une bonne adhérence sur le support.
- Une pénétration en grande profondeur dans les pores.
- Une éventuelle projection en plafond sans accélérateur de prise

#### b) Par voie mouillée :

- Composition uniforme de la couche projetée
- Pas de rebondissement violent.
- Pas de productions dépeussérées

### II. 4.1.3. Inconvénients des deux méthodes :

#### a) Par voie sèche :

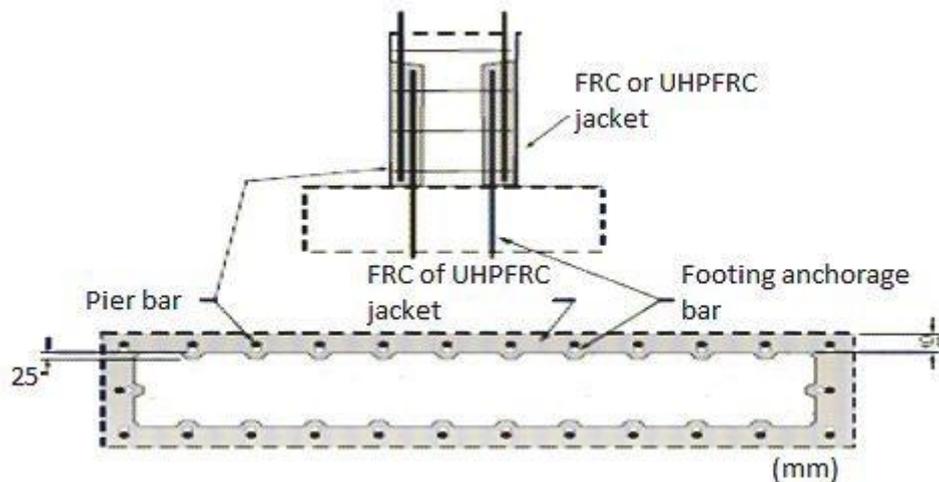
- Pertes de volume du béton projeté importantes par rebondissement.
- Production de poussières.

#### b) Par voie mouillée :

- Dosage en eau et en ciment plus élevé pour assurer une plasticité nécessaire.
- Compactage faible.
- Nécessité d'accélérateurs de prise.

### II. 4.2. Chemisage en BTHP :

Le chemisage par BTHP fibré permis d'améliorer le comportement sous charge sismique (ou réputée représentative d'une charge sismique) de poteaux subissant habituellement une rupture fragile par perte d'ancrage des armatures longitudinales, qui ne permettent pas une dissipation satisfaisante d'énergie.



*Figure II.21: Détails du chemisage en BTHP fibré. [32]*

Néanmoins, tout comme le chemisage béton armé simple, cette technique de chemisage par BTHP présente l'inconvénient d'induire une augmentation importante de la masse de l'élément, ce qui peut être problématique pour un renforcement parasismique, l'action sismique étant directement proportionnelle à l'accélération du séisme ainsi qu'à la masse de la structure.

- **Avantage :**
  - Bonnes performances en termes de dissipation d'énergie
  - Très bonne durabilité

- **Inconvénient :**

- Augmentation du poids de la structure
- Nécessite une main d'œuvre qualifiée
- Coût élevé

#### II. 4.2.1. Préparation des surfaces en béton :

Le fonctionnement d'un renfort dépend de la transmission correcte des efforts entre le béton existant et l'élément additionné. Il doit exister une adhérence parfaite dans l'interface béton-élément de renfort.

La préparation des surfaces consiste à éliminer la laitance superficielle du béton (couche très

faible), à nettoyer les particules de poussière (graisses ou saletés), à éliminer les cloques, à créer le degré d'humidité adapté pour accueillir les éléments qui seront ajoutés.

Les opérations de préparation superficielle consistent à traiter les surfaces par moyens manuel ou mécanique : bouchardage, poinçonnage, nettoyage des poussières et graisses, efflorescence par brosse, jet de sable, hydro nettoyage, jet d'eau-sable. Le jet de sable est le plus approprié.

### II. 4.2.1.1. Précautions et limites d'utilisation :

- Tenir compte d'une redistribution des efforts due au renforcement local d'un élément de la structure.
- Vérifier le taux de travail des fondations.

Dans le cas de l'utilisation d'un ferrailage longitudinal, on doit assurer la Continuité des armatures à tous les niveaux.

*Mise en œuvre pratique :*

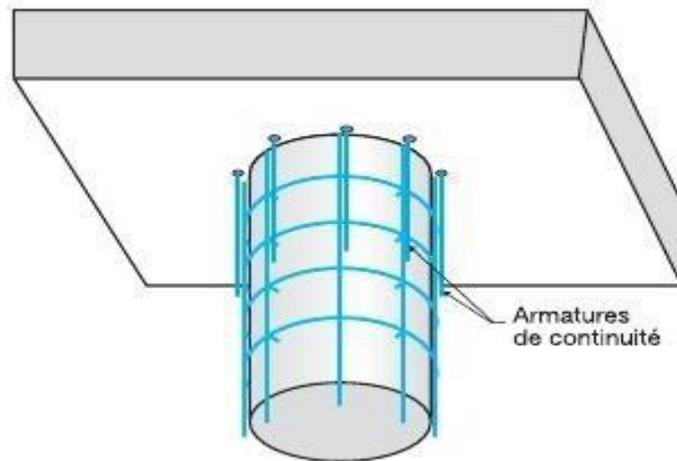


Figure II.22 : Chemisage en béton armé des poteaux (ferrailage complet)

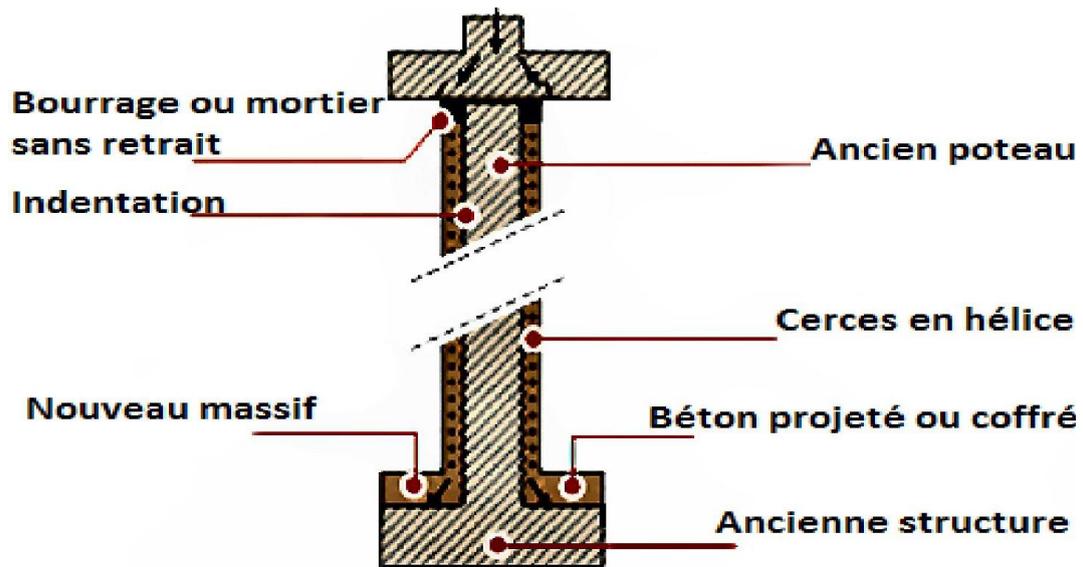


Figure II.23: Chemisage en béton d'un poteau + fondation renforcée (coupe transversale)

#### II. 4.2.2. Préparation du support :

- Étayer les poutres de part et d'autre du poteau afin de le soulager.
- Décaper le poteau pour enlever le revêtement et faire apparaître les armatures, détruire éventuellement le remplissage à l'interface avec le poteau.
- Percer la dalle et éventuellement les poutres pour permettre le passage des armatures de continuité.
- Bien nettoyer pour éliminer toutes les poussières.

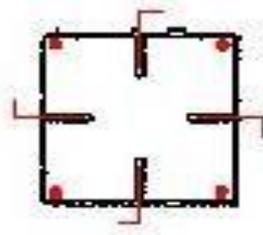
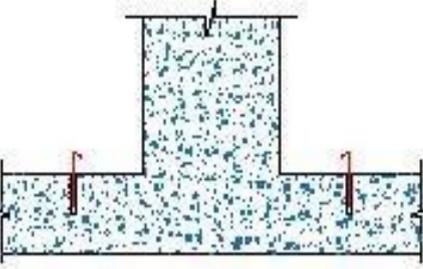
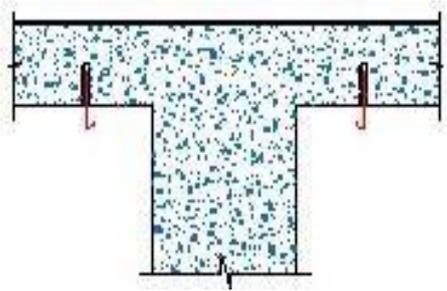
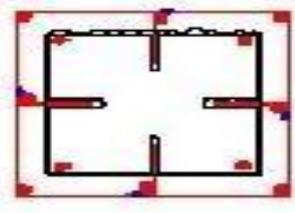
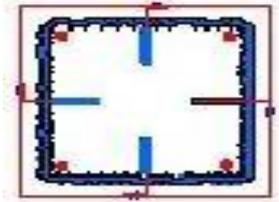
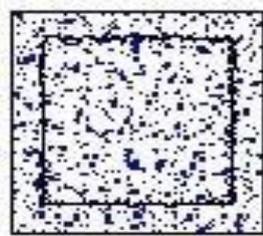
##### II. 4.2.2.1. Mise en œuvre du chemisage :

- Sceller des barres courtes dans le poteau pour assurer la continuité du ferrailage.
- Mettre en place le nouveau ferrailage (cadres et armatures longitudinales) et les lier aux barres de scellement.

• Disposer les barres de continuité et les fixer au ferrailage. Pour ce qui est du Plancher bas du premier niveau, les barres de continuité doivent être scellées.

Dans les têtes de fondation. Sceller les barres de continuité à la dalle. Projeter le béton ou la gunité. [23]

**Chapitre II : Les différentes méthodes de renforcement**

|   |  |
|---|--|
|    |      |
| <p>1- nettoyage et sablage du support initial de béton du poteau</p>  | <p>2- Ancrage et scellement de chevilles pour fixation d'armatures additionnelles.</p> |
|    |      |
| <p>3-scellement d'armatures d'ancrage sur le plancher en amont du poteau</p>  | <p>4-scellement d'armatures d'ancrage sous le plancher en aval du poteau.</p>          |
|    |   |
| <p>5-fixation des armatures additionnelles sur les tiges d'ancrage.</p>   | <p>6-étalage d'une couche de résine sur la surface de béton primitif.</p>              |
|  <p align="center">7-coulage de l'enveloppe en béton riche et fluide</p> |  |

**Tableau II.24:** Différents étapes de renforcement des poteaux au moyen d'une enveloppe en béton armé (chemisage)

II. 4.2.3. Adhérence entre les deux bétons :

L'adhérence représente la résistance au cisaillement, en l'absence d'un effort de compression normal sur cette interface et d'une armature de couture qui la traverserait.

Cette adhérence est due essentiellement à une liaison chimique entre le béton existant et le nouveau béton. La valeur maximale de l'adhérence est atteinte pour valeurs de glissement d'environ 0,01 à 0,02mm et est maintenue pratiquement constante jusqu'à des valeurs de glissement de l'ordre de 0,05mm. [23].

II. 4.2.3.1 Les inconvénients de chemisage :

Les inconvénients de renforcement par un béton additionnel sont résumés comme suit :

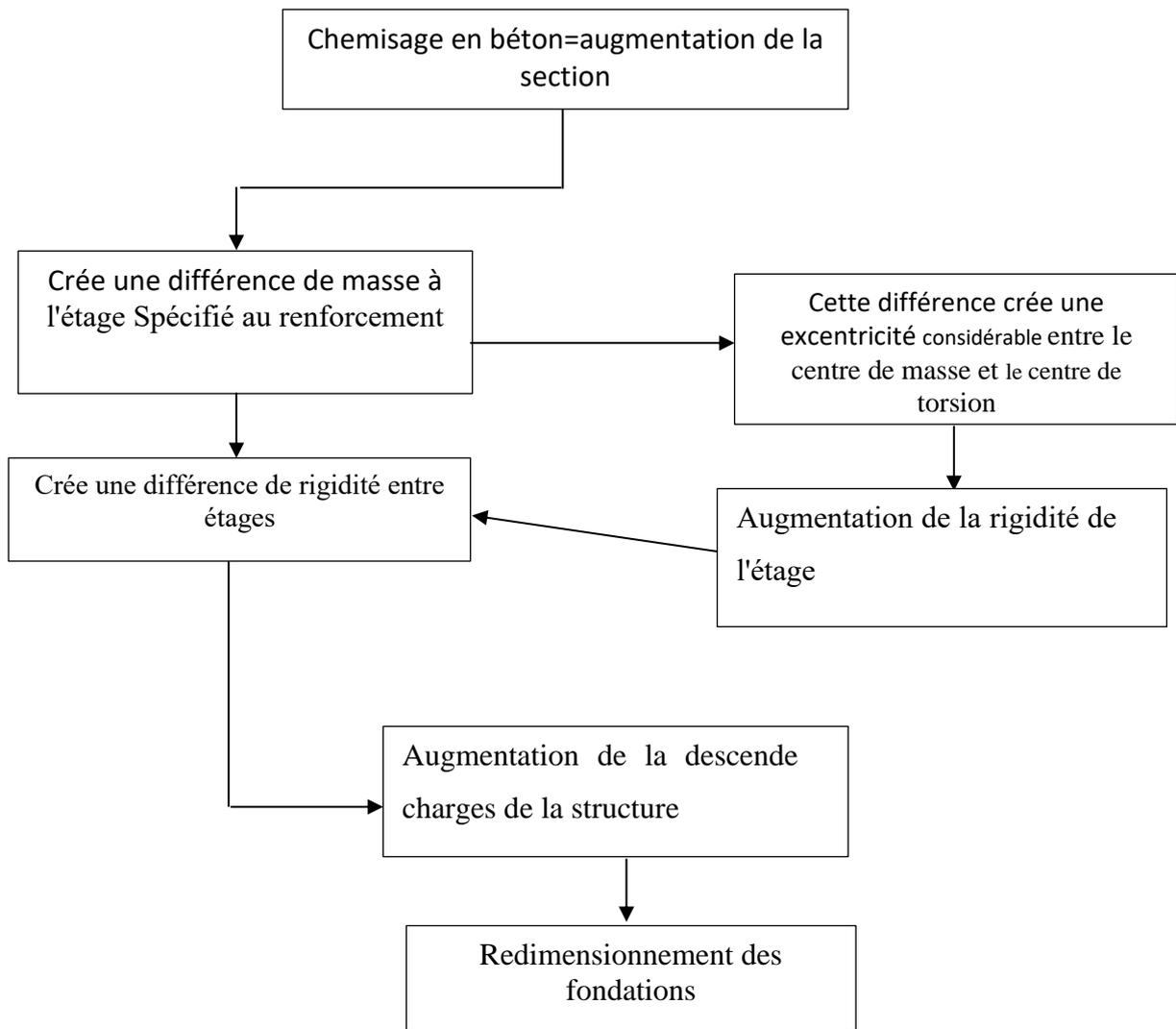


Figure II.25: Organigramme du processus de chemisage en béton armé.

A noter que le renforcement d'un élément par l'augmentation de sa section de béton (chemisage), influe directement sur la masse de la structure, comparativement aux autres moyens de renforcements, qui se caractérisent par leur légèreté relative. [29]

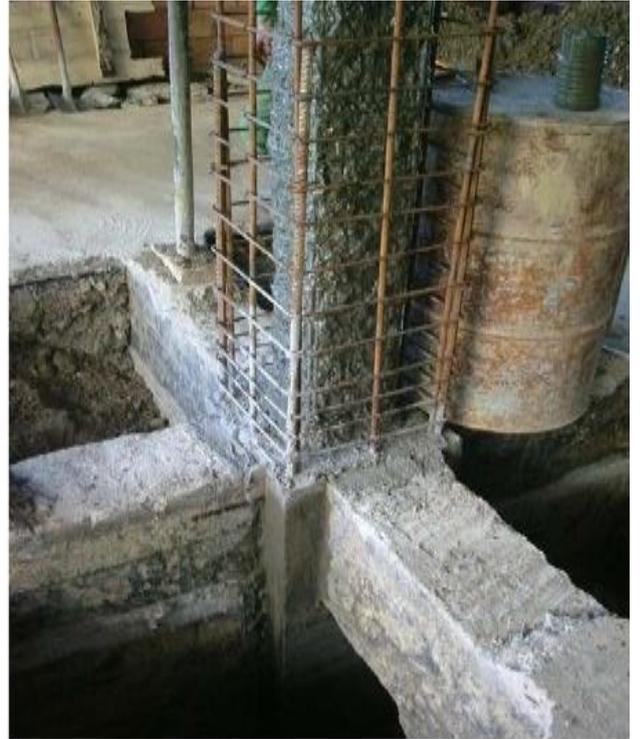
❖ **Exemple :**

Renforcement d'une habitation individuelle R+3 par chemisage des poteaux

a. Chemisage des quatre poteaux du RDC à partir du sous-sol.



**Figure II.26 :** Renforcement d'une habitation individuelle R+3 par chemisage des poteaux



*Figure II.27* : Chemisage des 4 poteaux centraux



*Figure II.28:* Coffrage à mi-hauteur et résultat après décoffrage



*Figure II.29 :* Chemisage des 4 poteaux sous-sol terminés

### II. 4.3. Conclusion :

Beaucoup de réhabilitations de structures par chemisage ont dans un premier temps été dimensionnées par l'unique savoir-faire des ingénieurs qui ne disposaient à l'époque d'aucune doctrine technique. Des études expérimentales ont ensuite été réalisées de manière à établir et justifier des règles de dimensionnement spécifiques à cette technique. C'est dans cette optique que, par exemple, Rodriguez et Park ([Rodriguez et Park,1994]) ont mené une campagne expérimentale des tinées à recueillir des données précises sur la résistance, la raideur ou encore la ductilité obtenue en renforçant des poteaux, endommagés ou non, par un chemisage en béton armé. Dans cette étude, les poteaux chemisés et testés ont ainsi montré une nette amélioration de la résistance et de la raideur par rapport au poteau de référence non renforcé. [21]

Durant les dernières décennies, le béton et l'acier ont joué un rôle primordial pour le renforcement, tant de bâtiments que d'ouvrages d'art. Cependant, ces matériaux sont soumis à d'importantes sollicitations dans les infrastructures, à la pollution, à la corrosion, et à d'autres actions extérieures qui tendent à les détériorer. De plus, les techniques de renforcement par chemisage en acier ou béton armé présentent souvent des mises en œuvre difficiles, impliquant des durées de travaux pouvant être assez longues. Il était donc nécessaire d'utiliser des matériaux plus durables et de les associer à de nouvelles méthodes de réhabilitation permettant de ralentir ces dégradations et de prolonger la durée de service des infrastructures existantes. De telles techniques rencontrent un grand intérêt lors d'opérations de remise en conformité parasismique.

### II. 5. Confinement par PRF :

Lorsque la charge axiale est appliquée sur le poteau, ce dernier se dilate latéralement (effet Poisson). L'enveloppe de PRF confine les colonnes et augmente sa capacité portante et sa ductilité. Cette enveloppe conserve son comportement élastique jusqu'à la rupture. Lors du dimensionnement, il est plus sécuritaire d'utiliser la méthode de performance en déplacement. Tant de recherches et des essais sont menés sur le renforcement parasismique par PRF des poteaux de différentes sections avec ou sans zone de recouvrement d'armatures sur pied. Ce qu'on peut conclure est que le confinement du poteau est réalisé de façon à ce qu'il résiste mieux aux charges gravitaires et qu'il ait un comportement plus ductile.

#### II. 5.1. Renforcement à la flexion des poteaux par PRF collés :

Pour assurer un tel renforcement, on procède par coller des plaques ou feuilles PRF sur la face tendue de l'élément. Le sens des fibres est parallèle cet axe.

D'après plusieurs tests, il a été observé que ce renforcement permet d'améliorer la ductilité et de retarder le glissement des aciers en zone de recouvrement. La meilleure solution est celle dite hybride : il s'agit d'utiliser des bandes de tissus PRFC et les plats PRFC posés dans des rainures pré-creusées sur l'élément. Les lamelles seront ancrées dans la semelle (12 à 15 cm de profondeur).

On remarque ainsi une augmentation de la capacité portante, de la capacité à dissiper l'énergie, et une augmentation de la résistance à la flexion.

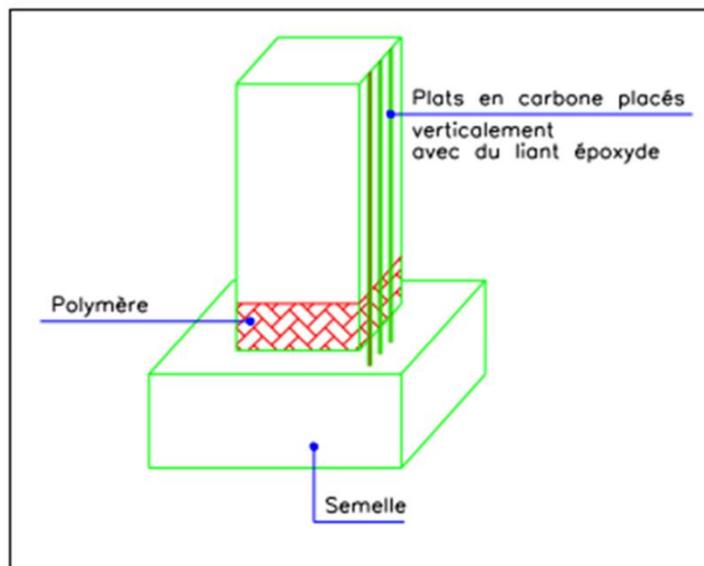


Figure II.30 : Technique de chemisage

### II. 5.2. Echec par séparation des PRF :

Les éléments renforcés de fibre extérieurement peuvent se détruire faute d'une séparation des PRF. C'est le cas d'une déchirure et d'un décollement. La déchirure se réalise sur les extrémités de l'élément là où la continuité est interrompue. Elle est associée avec la concentration du cisaillement et des forces normales dans les PRF. La grandeur de ces forces est influencée par différents facteurs comme les dimensions du PRF, la différence dans le module de l'élasticité entre les polymères et les adhésives, et la forme du diagramme du moment fléchissant. En revanche, le décollement normalement a lieu loin des extrémités. Il sera plus grave si les adhésives ne sont pas bien placées. Le décollement est associé avec des fissures. [33]

### II. 6. Enveloppe en PRF :

Les PRF éliminent des limitations importantes existantes dans les autres méthodes de

renforcements comme les difficultés dans la construction et l'augmentation des dimensions. La résistance au cisaillement des joints extérieurs ayant des poutres dans une seule direction est renforcée par des fibres avec une inclinaison de 45°. Les expériences montrent que dans quelques

Cas les tissus ont été décollés de l'existant avant la formation des rotules plastiques dans les poutres. Alors, des nouvelles méthodes d'ancrage doivent être développées pour prévenir se décollage et pour pouvoir assurer une résistance des joints. Notons que la présence des dalles et des poutres dans toutes les directions limite et perturbe le travail.

On peut voir dans les figures ci-joint quelques méthodes de renforcement : [34]

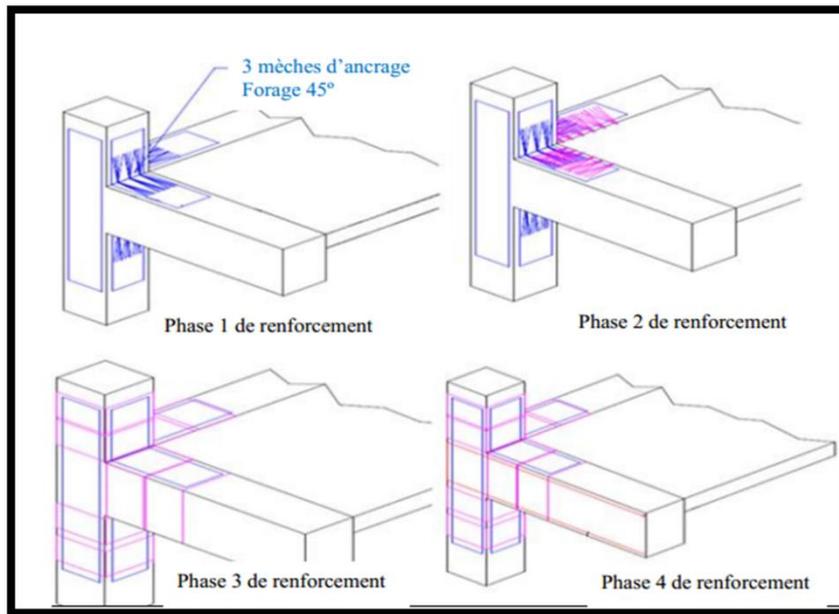


Figure II.31 : Renforcement d'un nœud à multi branches

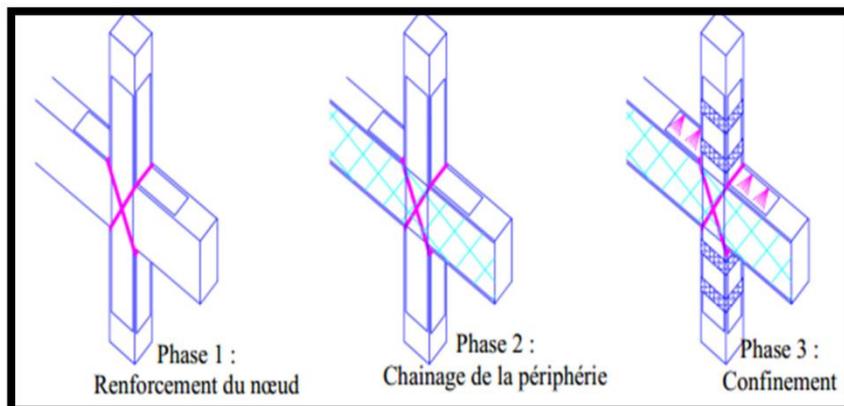
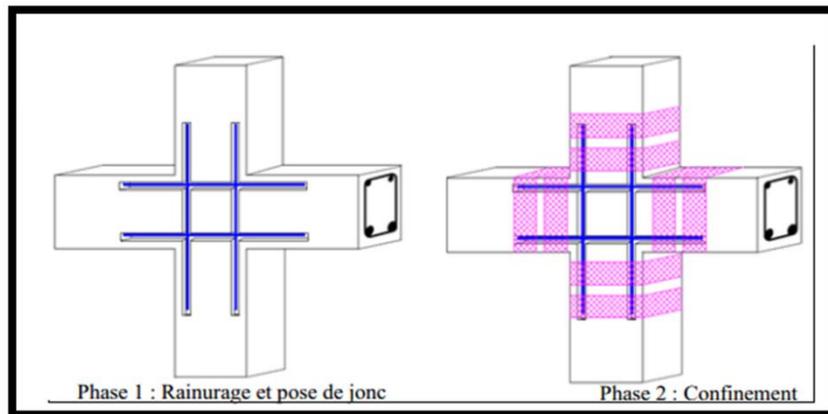


Figure II.32 : Renforcement d'un nœud deux branches



**FigureII.33** : Renforcement par composites

### II. 7. Placage d'acier :

Les premiers travaux de recherche sur l'application de cette technique de renforcement ont été initiés par Krieg et al [KRI-66], Hermite et Bresson [HER-67], et Burkhardt et al [BUR-75]. La proposition a été faite que la capacité portante d'un élément en béton armé peut être augmentée par la mise en place de plaques en acier par l'intermédiaire d'un joint collé.

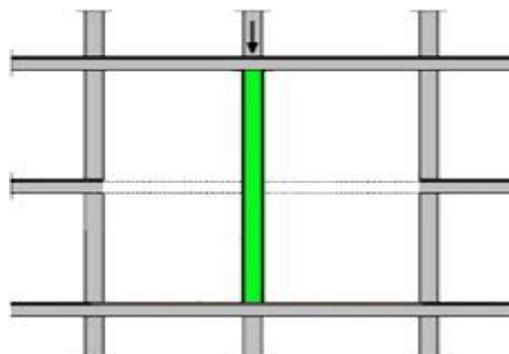
Un modèle qui estime la charge ultime provoquant le décollement des plaques en acier est proposé par [THE-90] [35].

La création d'un double niveau par suppression d'une partie des planchers d'une structure en béton armé pose le problème de la résistance des poteaux dont la longueur de flambement est doublée par la disparition de la dalle.

Si la réduction des charges sur le poteau par suppression du plancher est un élément favorable, elle ne suffit pas toujours à équilibrer le doublement de l'élanement.

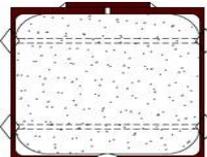
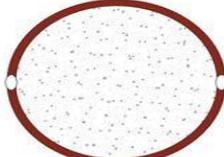
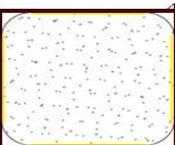
Les concepteurs doivent alors renforcer le poteau pour accroître son rayon de giration et satisfaire au nouvel état statique de la construction.

Ce nouvel état peut également être dû à l'accroissement important des charges, dû à un simple changement d'exploitation. [36]



**FigureII.34** : colonne dont l'élanement est accru.

Trois solutions de renforcement en utilisant des profilé-soudes plaques métallique.

|   |  |
|---|--|
|    |    |
| Moisage du poteau béton par deux U en acier et fixation par des tiges traversantes, ou par des barrettes soudées ou encore par des cordons de soudure alternés bord à bord. | Mise en place de deux demi-coquilles en tôle d'acier soudée 4 à 10 mm par cordons alternés pour renforcer un poteau cylindrique. |
|    |  |
| Collage de plaques d'acier par colle époxy, les plans de collages ont représentés en jaune, les points De soudure de sécurité sont aux angles.                              |  |

**Figure II.35** : le renforcement par les profiler et les plaques en acier.

Très souvent, la solution de "l'engraissage" du poteau existant par coffrage d'un ferrailage complémentaire n'est pas satisfaisante. D'une part, elle accroît la taille des colonnes en béton armé dont les dimensions sont déjà importantes, d'autre part, elle est fastidieuse à mettre en œuvre. Le renforcement par des profilé soudes plaques en acier est économique et simple à mettre en œuvre.

Les éléments de renfort sont amenés sur place par tronçons manu portables et assemblés à sec par boulonnage, par soudure ou par collage.

Il est judicieux, autant que faire se peut, de ne pas mélanger les modes de fixations sans en étudier les conséquences !

Dans le cas où l'on veut réduire la section du poteau au minimum, on peut étayer la structure, déposer le poteau en béton armé et le remplacer par une section compacte de type HEM ou tout simplement par une colonne pleine en acier de forme ronde ou carrée comme exposé dans la fiche suivante. [36]

Conclusion :

Une méthode déjà établie depuis l'avènement de l'acier et fortement présente

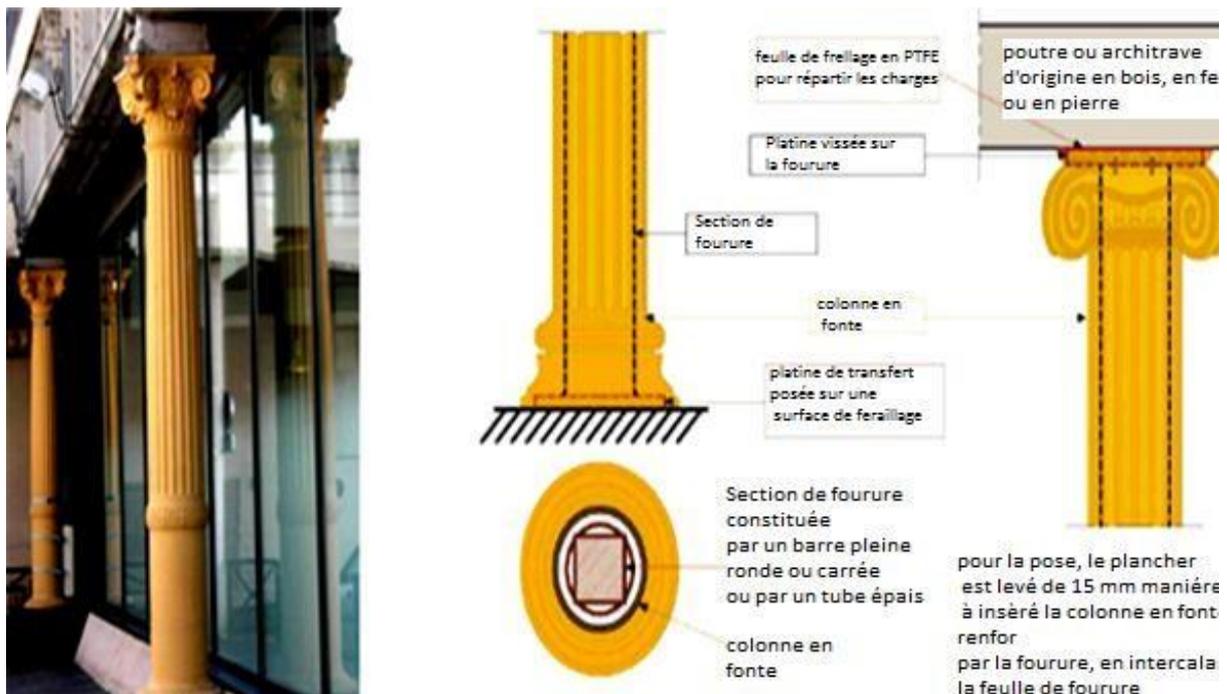
Sur le marché pour la mise à niveau des structures en béton armé (BA), y compris les

structures en béton précontraint, est le collage de plaques d'acier à la structure. L'idée a été proposée pour la réparation d'éléments en béton, et a été suivie par plusieurs années de recherche jusqu'à ce qu'il devienne une pratique de terrain maîtrisée et efficace. Par exemple, des projets expérimentaux ont été menés afin d'étudier l'influence de plusieurs facteurs, tels que l'épaisseur de la plaque, le type d'adhésif à employer ou encore les conditions d'ancrage.

En général, le collage des plaques d'acier à des structures en béton armé augmente à la fois la résistance et la rigidité et réduit efficacement les fissures.

Toutefois, la corrosion de l'acier peut être un problème à long terme, car elle peut endommager le lien et éventuellement conduire à l'échec de la réparation et à la ruine de la structure. En outre, du cisaillement est susceptible de se développer après la formation de fissures de cisaillement en diagonale, Cette technique de collage présente d'autres avantages, comme il a été constaté dans la pratique, comme sa simplicité et son mode d'application relativement rapide.

### II. 7.1. Renforcement d'un poteau par une fourrure en acier :



*Figure II.36: colonne architectonique en fonte et détails du pied et de la tête de colonne.*

La plupart des colonnes en fonte sont creuses avec des fûts plus ou moins ouvragés. Les colonnes des entrepôts étaient simplement cylindriques alors que celles des bâtiments plus nobles, étaient moulurées de tore, voire sculptées.

Lorsque la valeur esthétique doit être conservée, une solution consiste à équiper la colonne par une fourrure en acier sous forme de barres pleines ronde ou carrées. La mise en œuvre de cette transformation nécessite la dépose de la colonne et sa transformation comme le montre les détails ci-dessus. La capacité portante de la nouvelle colonne est limitée à la capacité portante de la barre d'acier insérée dans le fût. Sa nuance peut être en acier à très haute limite élastique pour augmenter la charge critique du poteau.

Lorsque la capacité portante n'est pas suffisante, le concepteur n'a d'autre solution que de remplacer la colonne d'origine par une pièce de substitution faite d'une barre pleine d'acier ou d'un tube à paroi épaisse de section suffisante sur lequel il peut faire souder des tores et/ou enfilet des éléments en fonte moulés exécutés spécialement.

### **II. 8. Réduction de la portée :**

La réduction de la portée se fait par ajout de poteaux intermédiaires afin de réduire la longueur des poutres. Dans ce cas on réduit considérablement les sollicitations (effort normal, effort tranchant et moment fléchissant) au niveau des nœuds et les vibrations en cas de séisme.

### **II. 9. Amélioration du sol :**

Les méthodes d'amélioration des sols sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformation qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet. De nombreuses techniques ont été développées par les ingénieurs géotechniciens au cours du 20<sup>ème</sup> siècle. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des terrains.

Suivant le type de sol considéré et le type d'ouvrage à réaliser, il convient de retenir une solution de renforcement adaptée qui s'accorde à la fois à la nature du sol en place et à son environnement. Deux techniques majeures peuvent être utilisées pour accroître les caractéristiques mécaniques des sols : par la modification de la structure interne du sol en place et le renforcement du sol par ajout d'inclusions (figure **II.34.**).



**Figure II.36** Renforcement des sols par ajout d'inclusion

Plus spécifiquement, les techniques d'amélioration des sols permettent d'accroître la compacité du sol en place, soit en réduisant le volume des vides, par exemple en appliquant une surcharge sur un sol saturé et en le laissant tasser par expulsion de l'eau en surpression, on parle dans ce cas de consolidation des sols, soit en imposant des vibrations dans le sol pour qu'il se densifie par réarrangement des grains (compactage dynamique).

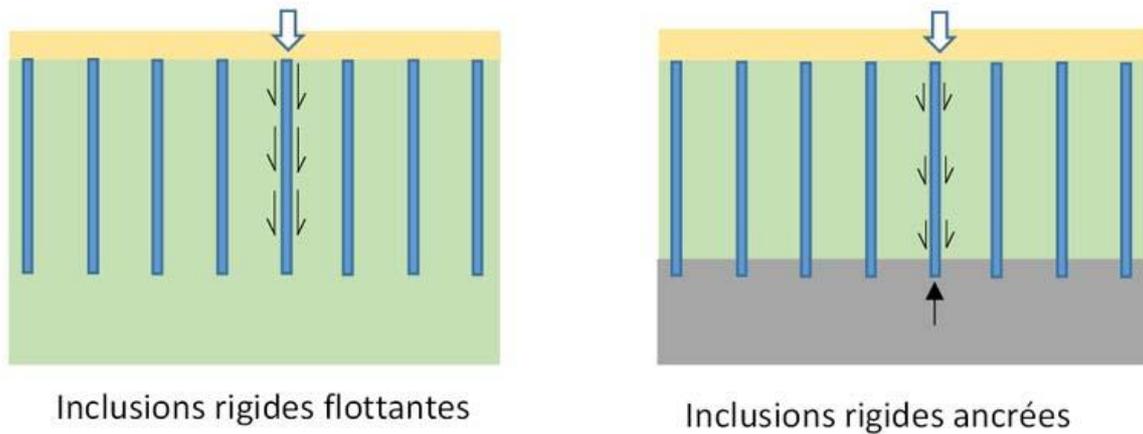
Parmi les méthodes de renforcement des sols, on peut citer :

### **II.9. 1. Renforcement des sols en place :**

Ces techniques de renforcement des sols en place reposent sur l'utilisation de pieux destinés à répartir ou à transmettre la charge apportée par l'ouvrage vers des zones de sols plus étendues ou plus résistantes.

L'objectif de réduire sensiblement les tassements de surface du sol en place, telles que :

- **Inclusions rigides de béton**, réalisées en insérant dans le sol une tarière refoulante (par rotation ovibos-fonçage) jusqu'à la couche de sol porteur et en injectant gravitairement par le pied de l'outil le béton lors de la remontée de l'outil (figure **II.35**).



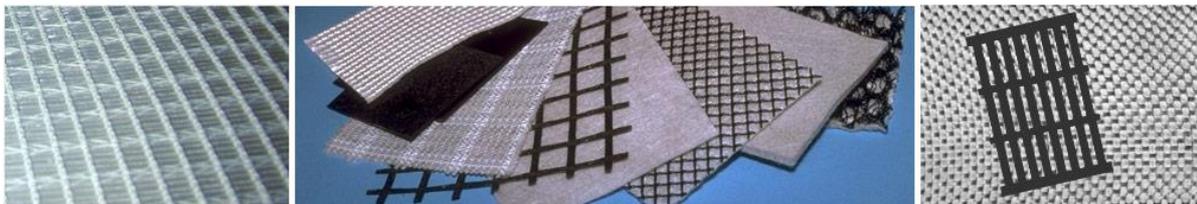
**Figure II.37** Système d'inclusions rigides flottantes et ancrées

- **Colonnes ballastées**, incontestablement les plus souples, constituées de matériaux granulaires, sans cohésion, mis en place par refoulement dans le sol et compactées par passes successives,

### II.9. 2. Renforcement des sols de remblaiement :

Dans ce cas on utilise la technique de construction de murs de soutènement qui s'est diversifiée sous la forme :

- d'un renforcement par armatures plates, métalliques (Terre Armée) ou synthétiques disposées horizontalement et à intervalles réguliers.
- d'un renforcement par nappes géo synthétiques (Figure II.36).



**Figure II.38** Exemples de géo synthétiques

### II.9. 3. Technique de renforcement des sols :

Les méthodes d'amélioration des sols sont l'un des outils dont dispose l'ingénieur pour résoudre les problèmes de stabilité ou de déformations qu'il rencontre lors de l'élaboration d'un projet.

De nombreuses techniques ont été développées par les ingénieurs géotechniciens au cours du 20ème siècle. Elles permettent l'amélioration des caractéristiques géotechniques et les propriétés mécaniques des terrains, et, sont jugées efficaces.

Certaines de ces méthodes sont très anciennes, comme le battage de pieux de bois dans les sols de faible portance, d'autres sont plus récentes, comme les méthodes d'injection, de pilonnage ou de congélation.

Elles ont connu, depuis une vingtaine d'années, un développement considérable et sont maintenant utilisées comme un élément à part entière des projets.

On peut diviser les techniques d'amélioration de sols en trois catégories en fonction de la manière avec laquelle l'amélioration est obtenue :

Dans la première catégorie on trouve celles qui conduisent à réduire l'indice des vides et à densifier le sol ou on trouve le pilonnage, le vibro compactage, les colonnes ballastées, le pré chargement, les drains verticaux, ...etc.

En deuxième catégorie on trouve les techniques d'injection (Jet Grouin, ...etc.) qui se basent sur la notion de former un nouveau matériau plus résistant en injectant un liant dans le sol.

Dans la troisième catégorie on trouve celles qui utilisent un autre matériau pour combler les défauts du matériau sol (les géo synthétiques par exemple pour reprendre les efforts de traction).

### **II.9. 3.1. Renforcement des sols compressibles :**

Les sols compressibles de mauvaise qualité ont toujours existé, mais la raréfaction des sols de bonne qualité pour développer les réseaux routiers, autoroutiers et ferroviaires ainsi que les zones industrielles entraînent la nécessité de mettre en œuvre des techniques de renforcement des sols compressibles [37].

Il existe différentes méthodes de renforcement des sols compressibles, plus ou moins anciennes et plus ou moins développées. Magnan (1994) présente un bilan des méthodes permettant de réduire les tassements des remblais édifiés sur sol compressibles. Les diverses méthodes ainsi que les principales conclusions sont reportées dans le Tableau (I-08).

| <b>Technique</b>   | <b>Données nécessaires</b>  | <b>Contrainte</b>   | <b>Fiabilité</b>                                      | <b>Commentaires</b>         |
|--|---|---|---|-----------------------------|
| Pré chargement   | Compressibilité<br>Perméabilité                                   | Temps<br>Nécessaire   | Peu fiable pour<br>obtenir de faibles<br>déplacements | Lent Peu cher               |
| Pré chargement<br>avec drains<br>verticaux               | Compressibilité<br>Perméabilités verticales<br>et horizontales    | Plus rapide   | Plus flexible   | Rapide<br>Relativement cher |
| Remplacement<br>Du sol                                   | Epaisseur de la couche  | Mise en dépôt<br>du sol<br>Nouveau<br>matériau              | Bonne en cas de<br>remplacement total                 | Rapide Cher                 |
| Colonnes<br>ballastées<br>Colonnes de sables<br>compacté | Résistance et<br>déformabilité du sol                             | Équipement<br>Plot<br>expérimental                          | Bonne après<br>analyse de plots<br>expérimentaux      | Rapide Cher                 |
| Dalle sur pieux  | Résistance du sol   |   | Bonne   | Très cher                   |
| Electro-osmose et<br>injection                           | Propriétés chimio-<br>physique<br>Compressibilité<br>Perméabilité | Destruction<br>des électrodes<br>Alimentation<br>Électrique | Incertaine  | Très cher                   |
| Remblais léger   | Compressibilité<br>Perméabilité                                   | Protection du<br>matériau léger                             | Peu fiable pour<br>obtenir de faibles<br>déplacements | cher                        |
| Remblais sur<br>inclusion rigides                        | Résistance et<br>déformabilité du Sol                             |   | Bonne   | Rapide Cher                 |
| Colonnes de<br>Jet Grouin                                | Résistance et<br>déformabilité du Sol                             |   | Bonne   | Rapide Cher                 |

Tableau II.1: Principales méthodes de renforcement de sol de  
fondation pour l'édification des remblais [Magnan, 1994]

### **II.9. 3.2. Domaine d'applications des techniques de renforcement des sols :**

Chaque technique de traitement de sol à un domaine d'action restreint qui dépend des conditions géologique et hydrogéologique du site mais aussi de l'état de compacité et de sur consolidation du sol en place. L'application des techniques d'amélioration des sols est directement liée à la granulométrie des sols à traiter. L'expérience acquise dans ce domaine permet de tirer les conclusions suivantes d'après, figure(I-36) :

1. Il est possible de procéder à des compactages dynamique, statique (dit aussi compactage horizontale statique) ou par vibration radiale (vibro-flottation ou vibro compactage) ; ou d'effectuer des colonnes de mortier sol-ciment (Jet-Grouin) d'ans des matériaux sablo-graveleux plus ou moins fins.
2. Lorsque les sols à compacter présentent un fuseau granulométrique des sols fins à très fins, à la limite des procédés de compactage correspondent le début de l'application des techniques de colonnes ballastées, d'inclusions rigides et de colonnes de sol chaux-ciment. Il demeure évidemment que la réalisation des colonnes ballastées est subordonnée à l'existence d'une étreinte latérale suffisante et pérenne mobilisable par le milieu traité pour éviter l'expansion latérale du ballast dépourvu de cohésion (matériau grenu).

3. Lorsque les sols à traiter sont mous et compressibles, renfermant des matériaux organiques, le terrain ne peut offrir une résistance pérenne au refoulement (expansion latérale de la colonne ballastée).

Dans ce cas, l'amélioration des sols par colonnes ballastées peut être impossible en raison du comportement évolutif des matériaux organiques et de leurs déformations par fluage.

L'incorporation d'inclusions rigides est dans ce cas nécessaire.

### **II.9. 4. Renforcement des sols fins :**

Les méthodes d'amélioration des sols fins font appel à des techniques permettant de réduire l'indice des vides avec diminution de volume de l'eau interstitielles des sols partiellement ou complètement saturés [38].

Ces sols sont caractérisés par :

- Grandes déformations qu'ils subissent suite aux charges appliquées.
- Les déformations ne sont pas instantanées, mais peuvent durer plusieurs mois, voir des années.
- Leur capacité portante est souvent faible.

Il existe plusieurs types de méthodes permettant d'améliorer un sol fin pour qu'il supporte un ouvrage dans des conditions de tassement et stabilités admissibles.

### II.9. 4.1. Pré chargement :

Afin que la consolidation puisse se produire, la meilleure méthode consiste à placer sur le sol un remblai de terre et le laisser suffisamment longtemps. Comme suit (Fig I.1) :

- Augmenter la résistance au cisaillement et la capacité portante du massif de sol.

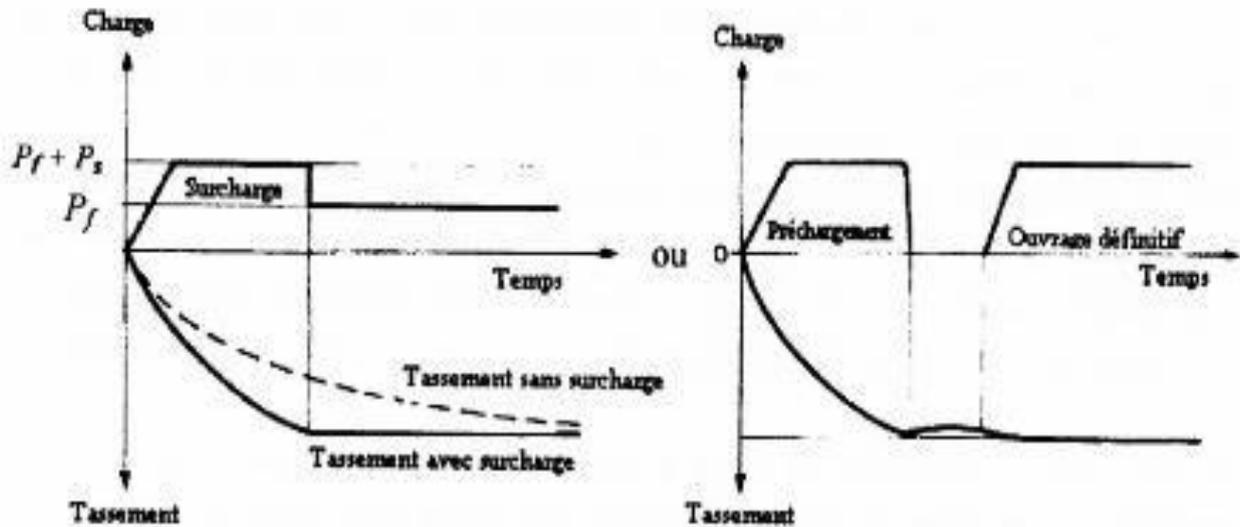


Figure II.39: Principe de Pré chargement pour le contrôle des tassements.

Domaine d'application : On applique généralement cette méthode sur de mauvais terrains composés principalement de sols fins (faible perméabilité).

Cette méthode est également appliquée sur des sols de faible taux de travail et très compressibles, principalement de composition argileuse qui ont besoin d'être surchargés. Il existe deux méthodes pratiques.

- Pré chargement seul.
- Pré chargement associé à un réseau drainant.

#### a) Pré chargement seul :

Cette technique consiste à placer sur le terrain une charge égale à la charge définitive, et augmenter éventuellement une surcharge assurée par les effets suivants :

- produire un développement rapide de tassement d'une consolidation primaire ;
- provoquer rapidement l'apparition et le développement des tassements de consolidation secondaire ;
- augmenter la cohésion non drainée du sol.

#### b) b) -Préchargement associé à un réseau drainant :

Lorsque l'épaisseur de la couche molle d'argile est importante, ou lorsque sa perméabilité

est très faible, la consolidation de l'argile de fondation du remblai peut être très lente, une méthode très efficace pour accélérer la consolidation consiste à introduire dans le massif d'argile des éléments ou des réseaux drainant.

Les réseaux drainants sont constitués par des drains verticaux ou des tranchées drainantes.

Sous la pression des terres au repos (sans chargement) les réseaux sont inactifs, ils deviennent efficaces dès que le sol est chargé, les réseaux drainants ont pour but d'accélérer l'évolution de la consolidation entraînée par un chargement du sol.

#### II.9. 4.2. Colonnes de sol traité en place :

La technique, consiste à créer des colonnes constituées d'un mélange de sol et d'autres matériaux (généralement la chaux), Cette technique est appliquée principalement aux sols fins mous et compressibles.

#### 4.3. Renforcement par inclusions rigides verticales :

Le renforcement par inclusions rigides, verticales est envisagé pour des ouvrages de types remblais, dallages, silos... lorsque le sol est trop compressible pour supporter sans tassements importants l'ouvrage à construire. Les inclusions sont généralement verticales et disposées suivant un maillage régulier. Elles doivent présenter des caractéristiques intrinsèques de déformation et de raideur, compatibles avec les terrains encaissants et les structures à supporter. Différents modes de mise en œuvre (forage avec ou sans refoulement, battage, vibration) et différents types de matériaux (ballast, gravier, mélange sol-ciment et tous types de mortier ou béton) sont utilisables pour permettre de réaliser à moindre coût un système de fondations superficielles en lieu et place d'un système de fondations profondes.

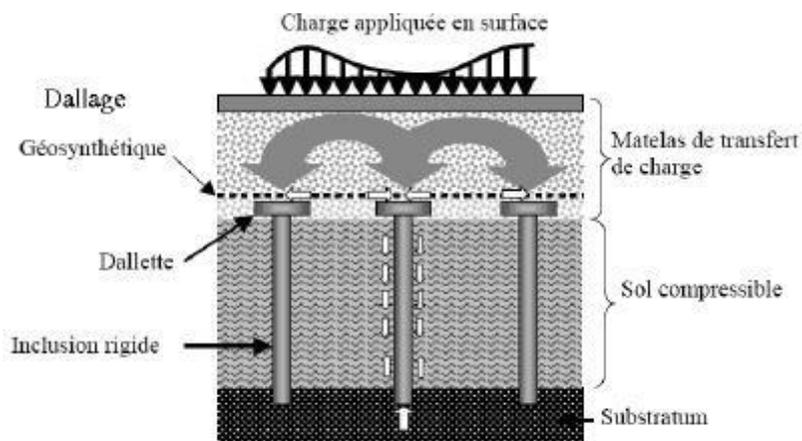


Figure II.40 : Schéma de principe d'un renforcement par inclusions rigides verticales[D'après Berthelot *et al.* (2003)].

#### II.9. 4.4. Renforcement des sols grenus :

Ce qui empêche les sols grenus d'avoir une augmentation de la pression interstitielle, c'est leur perméabilité (sauf dans le cas de liquéfaction causée généralement par les séismes). Tout le contraire des sols fins, néanmoins dans l'amplitude de tassement, ce genre de sol peut rencontrer des problèmes tels que la résistance à la liquéfaction.

Parmi les méthodes de renforcement des sols grenus, on peut citer :

#### II.9. 4.5. Vibro compactage / vibroflotation :

Le terme vibro compactage est à associer aux termes anglais de vibroflotation, La procédure de vibro-compactage sert à effectuer une vibration au sol grâce à une aiguille vibrante, dans le sable lâche en l'aidant par lançage (c'est-à-dire par un jet d'eau) jusqu'à des profondeurs pouvant atteindre 20 à 25 m et le compactage est effectué en remontant par passes de 0.5 à 1 m, (Fig I.3) l'augmentation de la consommation électrique signifie la fin de l'efficacité du traitement.

Le serrage du sable engendre une augmentation de la pression interstitielle qu'il faut laisser se dissiper avant de poursuivre le traitement, ou avant de le contrôler. De même, si le lançage a entraîné de l'air dans le sol, il y a intérêt à attendre qu'il se dissipe.

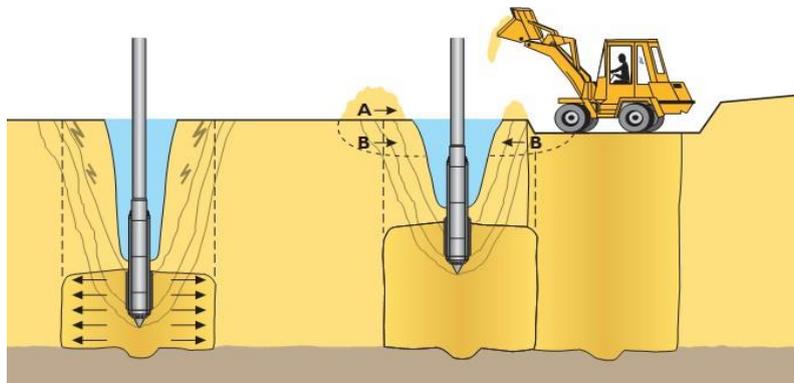


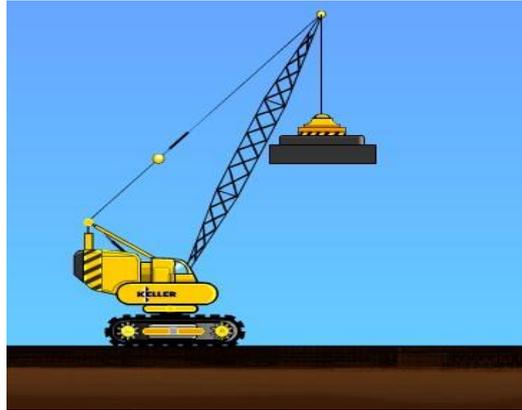
Figure II.41: Procédé de renforcement du sol par vibrocompactage.

Le vibro compactage est un procédé d'amélioration des sols bien adopté aux sols pulvérulents non cohésifs (sable, gravier, cailloux, certains remblais,) de compacité faible à moyenne.

#### II.9. 4.6. Compactage dynamique :

De façon successive, il consiste à faire chuter de lourds pilons (masse de 10 à 20 tonnes) d'acier au-dessus de la surface du sol, partant d'une hauteur de 15 à 20m (Fig I.4). Avec des

énergies de choc en surface cumulées atteignant 100 à 200 Tf. m/m<sup>2</sup> on obtient des augmentations sensibles de densité de l'ordre de 5% jusqu'à 5 ou 6m de profondeur, ce qui correspond à des augmentations de 20% de densité relative. Cette méthode, a l'avantage de réduire les tassements différentiels en homogénéisant les tassements ultérieurs en surface et par suite, de permettre à la couverture d'isolation finale de la décharge de conserver leur qualité d'étanchéité et donc leur efficacité. Elle a par contre l'inconvénient des nuisances apportées par les vibrations des chocs lourds qui font sentir leur effet au loin.



**Figure II.42 :** Procédé de renforcement de sol par compactage dynamique.

Le procédé s'applique aux sols sablo-graveleux, et aux matériaux argilo- limoneux saturés à condition qu'il y ait présence d'air occlus (1 à 4%) (Cas des tourbes ou des remblais récents avec matières organiques). Son emploi peut être intéressant pour consolider des couches sous l'eau. Ce procédé de renforcement n'est pas applicable en site urbaine.

#### **II.9. 4.7. Pré chargement :**

Concernant les sols grenus, le pré chargement est identique que pour les sols fins, excepté que la durée de consolidation est plus courte.

#### **II.9.5. Conclusion**

Les techniques modernes d'amélioration des sols sont largement utilisées dans le cadre de la gestion et de la valorisation du patrimoine foncier. C'est ainsi que certains terrains, dont la seule valeur intrinsèque peut être représentée par leur emplacement unique, peuvent gagner une valeur ajoutée importante grâce à des techniques développées. Les techniques d'amélioration des sols sont largement utilisées à travers le monde afin de prévenir les risques sismiques ou pour consolider des terrains à la structure hétérogène, inconstructibles en l'état

## ***Chapitre III***

# ***Choix des méthodes de renforcement***

### **III.1. Introduction**

Le renforcement est la stratégie la plus traditionnelle et la plus fréquente lors de la réhabilitation parasismique d'un bâtiment. Elle est entièrement gouvernée par l'équilibre entre les énergies développées pendant le mouvement sismique, accumulées et dissipées par la structure dans le domaine inélastique. Son objectif est de rehausser la capacité portante, la ductilité ou les deux simultanément [39.40].

L'agression sismique sur les ouvrages n'est pas constituée par des forces appliquées, mais par l'énergie cinétique générée lors des déplacements imposés par le sol d'assise et dont l'action se traduit par des déformations de la super structure. Si toute l'énergie

Cinétique présente dans la construction est absorbée par stockage temporaire grâce aux déformations élastiques et par dissipation lors des déformations non élastiques, il n'y a pas de rupture d'éléments structuraux. Les ouvrages construits avant l'apparition des codes parasismiques nécessitent une mise en conformité par réhabilitation pour qu'ils puissent résister aux séismes [41]. Dans ce cas les constructions ont besoins à des travaux de réparation ou de renforcement pour améliorer leur performance [42].

Le choix des techniques de renforcement s'effectue selon les critères habituels : Coût, rapidité de mise en œuvre, durabilité, réversibilité ou la possibilité de retour ultérieur en arrière pour les monuments historiques, disponibilité des matériaux, compétence des entreprises locales, etc. Les solutions techniques retenues doivent également tenir compte d'un éventuel impératif de non-interruption de l'exploitation du bâtiment pendant la durée des travaux. En effet, cette exigence est très fréquente.

Les objectifs, les types et les éléments utilisés pour le renforcement de la super structure des bâtiments vis-à-vis du séisme sont mentionnées sur la figure III.1[43].

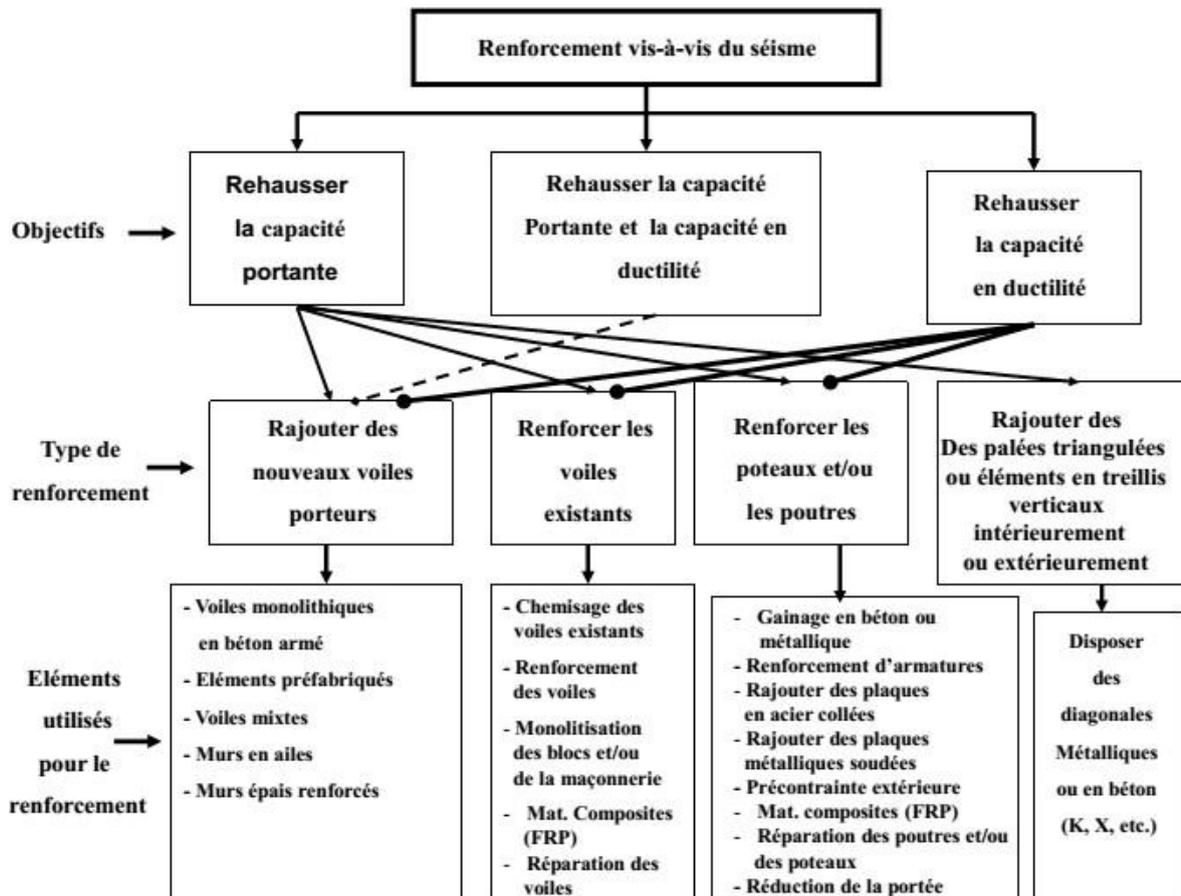


Figure III.1 Les Différentes techniques de renforcement

On peut aussi renforcer les structures par traitement du sol de fondation pour augmenter sa capacité portante, prévenir les tassements importants en cas de séisme, supprimer la susceptibilité de liquéfaction et prévenir des mouvements de terrain : glissement, éboulement, affaissement, coulées lentes, etc.

Les étapes à suivre pour le renforcement sont :

- Le projet d'exécution : Il s'agit de vérifier le comportement au séisme du bâtiment renforcé.
- Le choix définitif du renforcement : Il faut procéder à l'étude des détails de renforcement et de la méthodologie de la mise en œuvre avec l'établissement des plans d'exécution correspondants.
- La réalisation.

La stratégie du renforcement peut être :

- Locale : elle concerne l'amélioration de la résistance et la ductilité des éléments structuraux tel que les poteaux, les poutres et les dalles. Les techniques de renforcement utilisées sont

généralement le chemisage en béton ou en acier et l'utilisation des PRF.

- Globale : Elle concerne l'amélioration de la performance de la construction entière. Pour ce type de stratégie, on utilise le renforcement par ajout des voiles de contreventement, contreventement métallique, etc.
- Combinée : elle est utilisée pour atteindre la performance souhaitée. Dans ce cas on peut utiliser la combinaison de plusieurs techniques de renforcement.

### III.2. Choix d'une méthode de renforcement

Avant de procéder au renforcement il faut faire un diagnostic (figure III.2). Cette étape s'effectue par une visite des lieux, l'examen des différents plans, l'expertise de l'ouvrage et l'estimation du coût des travaux de renforcement [44, 45].

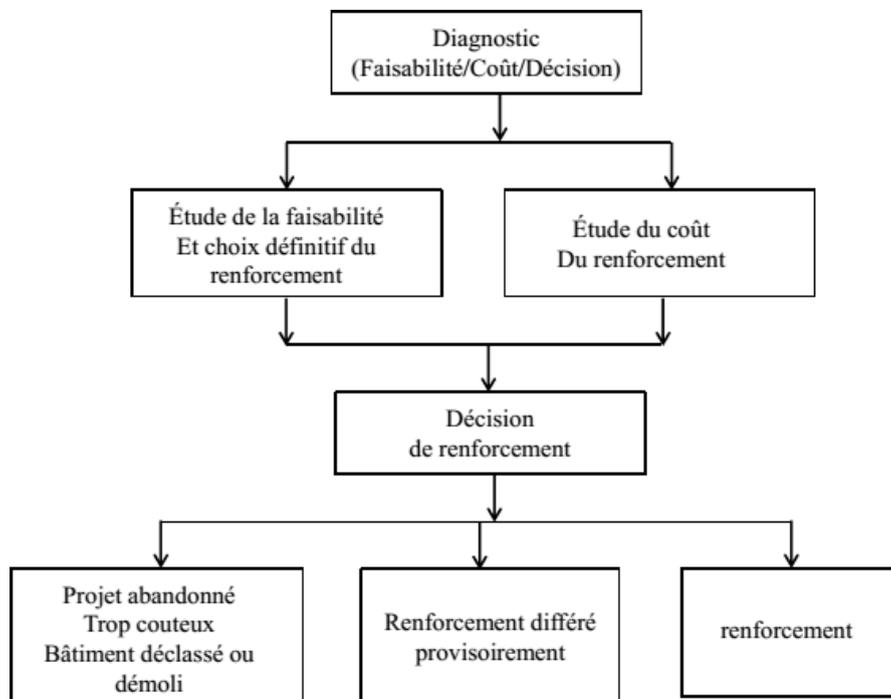


Figure III. 2 Organigramme pour diagnostic

Le but du diagnostic est de connaître l'état existant des différents éléments qui composent la structure (figure 3) : les poteaux, les poutres, les nœuds de jonction des éléments, les planchers, les fondations, l'irrégularité de la structure, la sismicité de la zone d'implantation de l'ouvrage, la nature du sol d'assise, etc.

### III.3. Techniques de renforcement :

Selon les recherches dans le domaine de renforcement [46], les méthodes les plus utilisées sont (figure III.3) : les voiles de contreventement en acier, gainage en béton et en acier [47, 48, 49, 50] confinement en PRF [51, 49], Plaques en acier, bandage en PRF, [52, 53] réduction des portées, traitement du sol, etc.

Le choix d'une méthode de renforcement en fonction des défauts qui existent dans les différents éléments est mentionné sur la figure III.3 :

Zéro (0) : indique que l'option du renforcement ne convient pas pour l'information choisie sur le bâtiment ;

Un (1) : indique que l'option du renforcement convient pour l'information choisie sur le bâtiment.

| <b>Options du renforcement</b>       | <b>Voile de contreventement (1)</b> | <b>Contreventement en acier (2)</b> | <b>Chemisage en béton (3)</b> | <b>Confinement par FRP (4)</b> | <b>Placage d'acier (5)</b> | <b>Chemisage en acier (6)</b> | <b>Enveloppe en PRF (7)</b> | <b>PRF/ Contreventement en acier (8)</b> | <b>PRF/ Chemisage en acier (9)</b> | <b>Réduction de la portée (10)</b> | <b>Bande en PRF (11)</b> | <b>Amélioration du sol (12)</b> | <b>Voile de contreventement /Poteau (13)</b> |
|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|--|
| <b>1. Sismicité</b>                  |                                     |                                     |                               |                                |                            |                               |                             |  |                                    |                                    |                          |                                 |  |
| Non sismique                         | 0                                   | 1                                   | 1                             | 1                              | 1                          | 1                             | 0                           | 0  | 0                                  | 0                                  | 0                        | 0                               | 0  |
| Faible sismicité                     | 1                                   | 1                                   | 1                             | 0                              | 0                          | 1                             | 1                           | 0  | 0                                  | 0                                  | 0                        | 0                               | 0  |
| Sismique                             | 1                                   | 1                                   | 1                             | 0                              | 0                          | 0                             | 0                           | 1  | 1                                  | 0                                  | 0                        | 0                               | 0  |
| <b>2. Stratégie du renforcement</b>  |                                     |                                     |                               |                                |                            |                               |                             |  |                                    |                                    |                          |                                 |  |
| Stratégie globale                    | 1                                   | 1                                   | 1                             | 0                              | 0                          | 0                             | 0                           | 0  | 0                                  | 0                                  | 0                        | 0                               | 0  |
| Stratégie locale                     |                                     |                                     |                               |                                |                            |                               |                             |  |                                    |                                    |                          |                                 |  |
| <b>3. Poteau</b>                     |                                     |                                     |                               |                                |                            |                               |                             |  |                                    |                                    |                          |                                 |  |
| Faibles dimensions                   | 0                                   | 0                                   | 1                             | 1                              | 1                          | 1                             | 0                           | 0  | 0                                  | 0                                  | 0                        | 0                               | 1  |
| Poteau dégradé                       | 0                                   | 0                                   | 0                             | 0                              | 0                          | 0                             | 0                           | 0  | 1                                  | 0                                  | 0                        | 0                               | 0  |
| Insuffisance d'armature transversale | 0                                   | 0                                   | 1                             | 1                              | 0                          | 0                             | 0                           | 0  | 0                                  | 0                                  | 0                        | 0                               | 0  |
| Mauvaise qualité du béton            | 0                                   | 0                                   | 0                             | 1                              | 0                          | 0                             | 0                           | 0  | 0                                  | 0                                  | 0                        | 0                               | 0  |
| Poteau court                         | 0                                   | 1                                   | 0                             | 0                              | 0                          | 0                             | 0                           | 0  | 0                                  | 0                                  | 0                        | 0                               | 0  |
| Poutre forte/Poteau faible           | 0                                   | 1                                   | 1                             | 1                              | 0                          | 0                             | 0                           | 0  | 0                                  | 0                                  | 0                        | 0                               | 1  |
| Corrosion des armatures intérieures  | 0                                   | 0                                   | 0                             | 0                              | 0                          | 0                             | 0                           | 0  | 1                                  | 0                                  | 0                        | 0                               | 0  |
| <b>4. Nœuds</b>                      |                                     |                                     |                               |                                |                            |                               |                             |  |                                    |                                    |                          |                                 |  |
| Insuffisance d'armature transversale | 0                                   | 0                                   | 0                             | 0                              | 0                          | 0                             | 1                           | 0  | 0                                  | 0                                  | 0                        | 0                               | 0  |
| <b>5. Poutre</b>                     |                                     |                                     |                               |                                |                            |                               |                             |  |                                    |                                    |                          |                                 |  |
| Mauvaise qualité du béton            | 0                                   | 0                                   | 0                             | 0                              | 1                          | 0                             | 0                           | 0  | 0                                  | 0                                  | 0                        | 0                               | 0  |
| Faibles dimensions                   | 0                                   | 0                                   | 1                             | 1                              | 0                          | 1                             | 0                           | 0  | 0                                  | 0                                  | 0                        | 0                               | 0  |
| Insuffisance d'armature transversale | 0                                   | 0                                   | 0                             | 1                              | 1                          | 1                             | 0                           | 0  | 0                                  | 0                                  | 0                        | 0                               | 0  |

|                                    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Poutre sur-sollicitée              | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| <b>6. Dalle</b>                    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| Faible épaisseur                   | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Insuffisance d'armature            | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Longue travée                      | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| <b>7. fondation</b>                |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| Faibles dimensions                 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Mauvais sol                        | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| <b>8. irrégularité du bâtiment</b> |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| Régulier                           | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| Irrégulier                         |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| Asymétrique                        |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| Eléments saillants                 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Etage ouvert                       | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Flottant/poteau décalé             | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Bâtiment type gratte-ciel          | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Irrégularité de masse              | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

**Figure III. 3** Options du renforcement en fonction des informations sur le bâtiment [54]

#### III.4. Choix d'une méthode de renforcement :

Le choix d'une méthode de renforcement en fonction des défauts qui existent dans les différents éléments structuraux est mentionné sur la figure IV.2.

Dans la colonne « choix » de la figure IV.2 :

Zéro (0) : indique l'absence d'une anomalie et le renforcement n'est pas nécessaire ; Un (1) : indique la présence d'une anomalie. Le renforcement est nécessaire.

Dans la partie droite de la figure IV.2, il est indiqué les valeurs zéro (0) ou un (1) correspondent aux options du renforcement mentionnées dans la figure 3 lorsque les problèmes sont sélectionnés dans la colonne verticale "choix".

La pertinence d'une méthode de renforcement, en fonction de la somme des options du renforcement choisies  $\sum(\text{options})$  et la somme des choix  $\sum(\text{choix})$ , est définie par (figure IV.2):

$$Pertinence = \frac{\sum(\text{options})}{\sum(\text{choix})}$$

Le choix final de la méthode du renforcement est en fonctions de la pertinence, la disponibilité des matériaux, la perturbation ou non du bâtiment pendant la réalisation et le coût de réalisation (figure IV.3).

***Chapitre IV***

***Réhabilitation d'un***

***Bâtiment en béton armé***

## IV.1. Etude d'un bâtiment d'habitation :

### IV.1.1. Diagnostic :

Il s'agit d'une structure en béton armé (R+5). Planchers en corps creux de 20 cm d'épaisseur. Les dimensions sont (25x40) cm pour les poutres, (25x35) pour les chaînages, (30x35) pour les poteaux et 20 cm d'épaisseur pour les voiles de contreventement. L'ouvrage est implanté dans une zone sismique de classe II a (RPA 99, version 2003), avec un sol de type meuble [55]. Le plan de coffrage de l'étage courant est mentionné sur la figure 4. Les caractéristiques des matériaux sont les suivantes : Acier FeE400 pour armature longitudinale avec  $E_s=2.10^5$  MPa et  $f_y=400$  MPa, Acier FeE235 pour armature transversale avec  $E_s=2.10^5$  MPa et  $f_y=235$  MPa. Béton de  $f_{c28}=25$  MPa et  $E_c=32164$  MPa. Le béton est de :

### IV.1.2. Analyse de la structure existante :

- Pour l'analyse, Nous avons utilisés le logiciel ROBOT. La modélisation de la structure existante est mentionnée sur la figure IV.1.

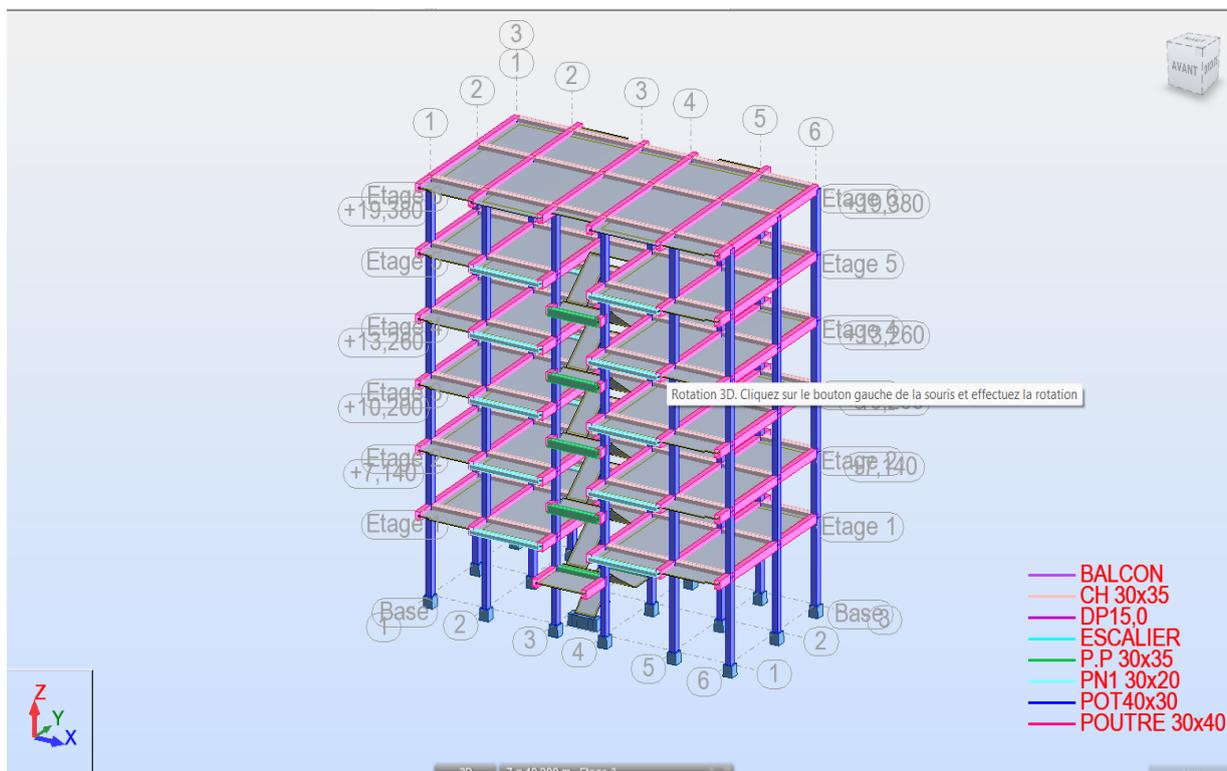


Figure IV.1 Vue 3D robot, structure existante

D'après l'analyse, on remarque l'apparition des rotules plastiques de type C (effondrement) dans quelques poutres et poteaux. Par conséquent le renforcement de la structure est nécessaire pour améliorer les performances de l'ouvrage.

**IV.1.3. Choix de la technique du renforcement :**

Dans la colonne choix, on mentionne l'existence ou non des anomalies mentionnées dans le diagnostic (1 ou 0). Dans les colonnes adroites on affecte latechnique convenable aux anomalies détectées et à la fin on calcule la pertinence(figure IV.1).

| Options<br>Du renforcement              | Choix | Information sur le bâtiment  |                              |                        |                         |                     |                        |                      |                                   |                             |                             |                   |                          |                                       |
|---|-------|------------------------------|------------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------|------------------------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------|--------------------------|---------------------------------------|
|   |       | Voile de contreventement (1) | Contreventement en acier (2) | Chemisage en béton (3) | Confinement par FRP (4) | Placage d'acier (5) | Chemisage en acier (6) | Enveloppe en PRF (7) | PRF/ Contreventement en acier (8) | PRF/ Chemisage en acier (9) | Réduction de la portée (10) | Bande en PRF (11) | Amélioration du sol (12) | Voile de contreventement /Poteau (13) |
| <b>1. Sismicité</b>                     |       |                              |                              |                        |                         |                     |                        |                      |                                   |                             |                             |                   |                          |                                       |
| Non sismique                            | 0     | 0                            | 0                            | 0                      | 0                       | 0                   | 0                      | 0                    | 0                                 | 0                           | 0                           | 0                 | 0                        | 0                                     |
| Faible sismicité                        | 0     | 0                            | 0                            | 0                      | 0                       | 0                   | 0                      | 0                    | 0                                 | 0                           | 0                           | 0                 | 0                        | 0                                     |
| Sismique                                | 1     | 1                            | 1                            | 1                      | 0                       | 0                   | 0                      | 0                    | 1                                 | 1                           | 0                           | 0                 | 0                        | 0                                     |
| <b>2. Stratégie du renforcement</b>     |       |                              |                              |                        |                         |                     |                        |                      |                                   |                             |                             |                   |                          |                                       |
| Stratégie globale                       | 1     | 1                            | 1                            | 1                      | 0                       | 0                   | 0                      | 0                    | 1                                 | 0                           | 0                           | 0                 | 0                        | 1                                     |
| Stratégie locale                        | 0     | 0                            | 0                            | 0                      | 0                       | 0                   | 0                      | 0                    | 0                                 | 0                           | 0                           | 0                 | 0                        | 0                                     |
| <b>3. Poteau</b>                        |       |                              |                              |                        |                         |                     |                        |                      |                                   |                             |                             |                   |                          |                                       |
| Faibles dimensions                      | 1     | 0                            | 0                            | 1                      | 1                       | 1                   | 1                      | 0                    | 0                                 | 0                           | 0                           | 0                 | 0                        | 1                                     |
| Poteau dégradé                          | 0     | 0                            | 0                            | 0                      | 0                       | 0                   | 0                      | 0                    | 0                                 | 0                           | 0                           | 0                 | 0                        | 0                                     |
| Insuffisance d'armature<br>Transversale | 0     | 0                            | 0                            | 0                      | 0                       | 0                   | 0                      | 0                    | 0                                 | 0                           | 0                           | 0                 | 0                        | 0                                     |
| Mauvaise qualité du béton               | 1     | 0                            | 0                            | 0                      | 0                       | 1                   | 0                      | 0                    | 0                                 | 0                           | 0                           | 0                 | 0                        | 0                                     |
| Poteau court                            | 0     | 0                            | 0                            | 0                      | 0                       | 0                   | 0                      | 0                    | 0                                 | 0                           | 0                           | 0                 | 0                        | 0                                     |
| Poutre forte/Poteau faible              | 1     | 0                            | 1                            | 1                      | 1                       | 0                   | 0                      | 0                    | 0                                 | 0                           | 0                           | 0                 | 0                        | 1                                     |
| Corrosion des armatures<br>Intérieures  | 0     | 0                            | 0                            | 0                      | 0                       | 0                   | 0                      | 0                    | 0                                 | 0                           | 0                           | 0                 | 0                        | 0                                     |
| <b>4. Nœuds</b>                         |       |                              |                              |                        |                         |                     |                        |                      |                                   |                             |                             |                   |                          |                                       |
| Insuffisance d'armature<br>Transversale | 1     | 0                            | 0                            | 0                      | 0                       | 0                   | 0                      | 1                    | 0                                 | 0                           | 0                           | 0                 | 0                        | 0                                     |
| <b>5. Poutre</b>                        |       |                              |                              |                        |                         |                     |                        |                      |                                   |                             |                             |                   |                          |                                       |
| Mauvaise qualité du béton               | 1     | 0                            | 0                            | 0                      | 0                       | 1                   | 0                      | 0                    | 0                                 | 0                           | 0                           | 0                 | 0                        | 0                                     |
| Faibles dimensions                      | 0     | 0                            | 0                            | 0                      | 1                       | 0                   | 0                      | 0                    | 0                                 | 0                           | 0                           | 0                 | 0                        | 0                                     |
| Insuffisance d'armature<br>Transversale | 0     | 0                            | 0                            | 0                      | 0                       | 0                   | 0                      | 0                    | 0                                 | 0                           | 0                           | 0                 | 0                        | 0                                     |
| Poutre sur-sollicitée                   | 0     | 0                            | 0                            | 0                      | 0                       | 0                   | 0                      | 0                    | 0                                 | 0                           | 0                           | 0                 | 0                        | 0                                     |

|                                    |    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |
|------------------------------------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---|------|
| <b>6. Dalle</b>                    |    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |
| Faible épaisseur                   | 0  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 | 0    |
| Insuffisance d'armature            | 1  | 0    | 0    | 1    | 0    | 1    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1    | 0 | 0    |
| Longue travée                      | 0  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 | 0    |
| <b>7. fondation</b>                |    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |
| Faibles dimensions                 | 0  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 | 0    |
| Mauvais sol                        | 0  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 | 0    |
| <b>8. irrégularité du bâtiment</b> |    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |
| Régulier                           | 1  | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 0 | 1    |
| Irrégulier                         | 0  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 | 0    |
| Asymétrique                        |    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |
| Eléments saillants                 | 1  | 0    | 1    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 | 0    |
| Etage ouvert                       | 0  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 | 0    |
| Flottant/poteau décalé             | 1  | 1    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 | 0    |
| Bâtiment type gratte-ciel          | 0  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 | 0    |
| Irrégularité de masse              | 0  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0 | 0    |
|                                    |    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |      |
| <b>Sommation</b>                   | 11 | 4    | 5    | 6    | 4    | 5    | 2    | 2    | 3    | 2    | 1    | 2    | 0 | 4    |
| <b>Pertinence</b>                  | 1  | 0.36 | 0.45 | 0.54 | 0.36 | 0.45 | 0.18 | 0.18 | 0.27 | 0.18 | 0.09 | 0.18 | 0 | 0.36 |

**Figure IV. 2** Calcul de la pertinence

La pertinence la plus élevée (0.54) est celui du chemisage en béton.

La décision finale du renforcement est obtenue après combinaison de la pertinence, la disponibilité des matériaux, la perturbation du bâtiment et le coût de réalisation (figure IV.3).

| Options<br>Du<br>renforce<br>ment  | Voile de contreventement (1)                     | Contreventement en acier (2) | Chemisage en béton (3) | Confinement par PRF(4) | Placage d' acier (5) | Chemisage en acier (6) | Enveloppe en PRF (7) | PRF/ Contreventement en acier (8) | PRF/ Chemisage en acier (9) | Réduction de la portée (10) | Bande en PRF (11) | Amélioration du sol (12) | Voile de contreventement / Chemisage des poteau (13) |
|------------------------------------|--|------------------------------|------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------|--------------------------|--|
| <b>Pertinence</b>                  | 0.36   | 0.45                         | 0.54                   | 0.36                   | 0.45                 | 0.18                   | 0.18                 | 0.27                              | 0.18                        | 0.09                        | 0.18              | 0                        | 0.36   |
| <b>Disponibilité des Matériaux</b> | Oui  | Oui                          | Oui                    | Oui                    | Non                  | Non                    | Oui                  | Non                               | Non                         | Oui                         | Oui               | Oui                      | Oui  |
| <b>Perturbation du bâtiment</b>    | Non  | Non                          | Oui                    | Non                    | Oui                  | Oui                    | Non                  | Oui                               | Non                         | Oui                         | Non               | Oui                      | Non  |
| <b>Proposition</b>                 | 0.36   | 0.45                         | 0                      | 0.36                   | 0                    | 0                      | 0.18                 | 0                                 | 0                           | 0                           | 0.18              | 0                        | 0.36   |
| <b>Choix du renforcement</b>       | Voile de contreventement/Poteau                  |                              |                        |                        |                      |                        |                      |                                   |                             |                             |                   |                          |  |
| <b>Coût</b>                        | Elevé  |                              |                        |                        |                      |                        | Acceptable           |                                   |                             |                             |                   |                          |  |
| <b>Décision</b>                    | Projet trop couteux, bâtiment déclassé ou démoli |                              |                        |                        |                      |                        | Renforcement         |                                   |                             |                             |                   |                          |  |

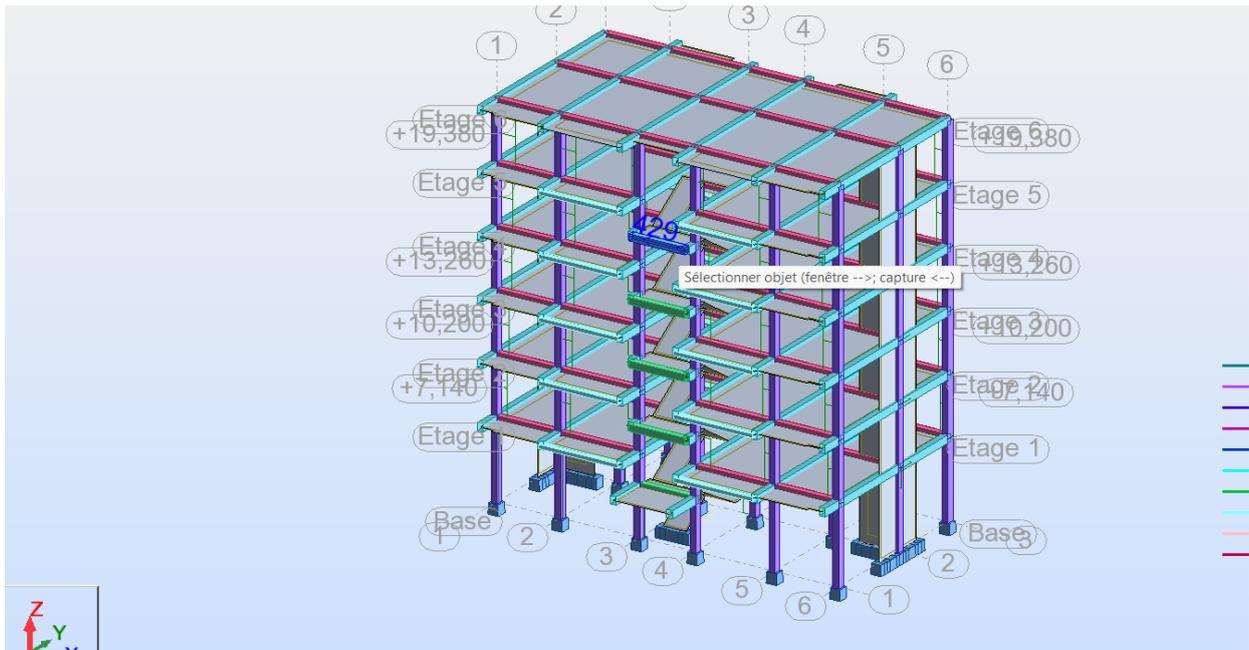
**Figure IV. 3** Outil de sélection de décision

La décision finale : renforcement par l'utilisation des voiles de contreventement.

La solution proposée est : ajout de voiles de contreventement dans les deux sens de la construction.

#### **IV.1.4. Analyse de la structure renforcée :**

La modélisation de la structure renforcée est mentionnée sur la figure IV.4.



**Figure IV.4** Vue 3D robot, structure existant avec renforcement

L'analyse des résultats après renforcement, montre, une augmentation dans la capacité portante, réduction dans la période et le déplacement.

***Chapitre V***  
***Analyse des résultats***

**V.1. Analyse :**

Les résultats de l'analyse sont mentionnés sur les tableaux : V.1 et V.2.

| Structure          | Période<br>$T(s)$ | Effort<br>tranchant<br>$V(Tf)$ | Déplacement<br>$D(m)$ |
|--------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Étudiée            | 1.45              | 190.55                         | 0.1597                |
| Existante          | 1.48              | 187.77                         | 0.1638                |
| Après renforcement | 0.84              | 262.97                         | 0.085                 |

**Tableau V.1.** Comparaison des résultats, sens x

| Structure          | Période<br>$T(s)$ | Effort<br>tranchant<br>$V(Tf)$ | Déplacement<br>$D(m)$ |
|--------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------|
| Étudiée            | 1.46              | 211.86                         | 0.1355                |
| Existante          | 1.48              | 208.15                         | 0.14                  |
| Après renforcement | 0.84              | 276.64                         | 0.0781                |

**Tableau V.2.** Comparaison des résultats, sens y

# ***Conclusions***

## **Conclusions :**

Les bâtiments construits avant l'apparition des codes parasismiques ou qui présentent des anomalies au niveau des structures nécessitent des travaux de réparation ou de renforcement ou les deux simultanément, pour la mise en conformité avec la législation en vigueur et pour augmenter le niveau de performance. L'évaluation de l'état de la construction existante nécessite un diagnostic, qui est une opération très délicate, lente et fatigante pour remédier efficacement aux cas pathologiques existants. L'expertise des anciennes constructions présente quelques difficultés notamment pour trouver la nuance et la quantité de ferrailage, les caractéristiques du béton, la nature du sol de fondation, etc. La connaissance du niveau de sécurité des éléments facilite le choix des méthodes de renforcement et / ou des réparations nécessaires pour assurer la sécurité globale de la structure.

Les méthodes de renforcement les plus utilisés sont : ajout de voiles de contreventement, contreventement en acier, chemisage en acier, chemisage en béton, confinement par PRF, placage d'acier, chemisage en acier, enveloppe en PRF, PRF/Contreventement en acier, PRF/Chemisage en acier, réduction de la portée, bande en PRF, amélioration du sol et voiles de contreventement/chemisages des poteaux.

La décision finale du renforcement est obtenue après combinaison de la pertinence, la disponibilité des matériaux, la perturbation du bâtiment et le coût de réalisation. Dans l'exemple envisagé, la pertinence la plus élevée est celle de la technique voile de contreventement avec chemisage des poteaux. Enfin nous avons choisi la méthode de voile de contreventement. Cette technique est très utilisée dans le domaine du renforcement, ce qui est confirmé par l'analyse du ROBOT où la capacité de la structure renforcée est devenue supérieure à celle de la structure existante.

Les résultats présentés ici représentent des exemples d'utilisation pour l'évaluation des dommages et le choix de la technique de renforcement et fournissent une estimation des niveaux de risque et une décision d'aide des pouvoirs publics dans l'évaluation du risque d'un bâtiment dans son état existant.

***Références***  
***Bibliographiques***

- [1] Dr. OUZAA Kheira, polycopié « Réhabilitation des structures », Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF U.S.T.O, Année 2015.
- [2] MAIZI Ibtissam, BENJOUDI Mouslam, mémoire de master II « Réhabilitation des structures en béton armé », Université 8 Mai 1945 Guelma, Année 2013.
- [3] HAMOUCHI Meryem, mémoire de master II « Pathologie et réparation des ouvrages en béton armé », Université 8 Mai 1945 Guelma, Année 2013.
- [4] Jean PERRET, " Guide de la maintenance de bâtiments », Editions du moniteur, 1997, (59-119).
- [5] Bertrand SCHWARTZ, « Réhabilitation des bâtiments. Structures et enveloppe, solutions techniques », Edition Lavoisier, 2010.
- [6] KHOBIZI Sena, mémoire de master II « Réhabilitation des structures en béton armé », Université 8 Mai 1945 Guelma, Année 2017.
- [7] [<http://www.btpconsulting.fr/activites/auscultation-reconnaissance/> 21/04/2021  
Année 2013.
- [8] MEGUENNI Mustapha, BEKHALED Abdelouahab, Mémoire pour l'Obtention du diplôme de master en génie civil « La réhabilitation d'un ancien bâtiment industriel R+3, « AIN TEMOUCHENT », Université Aboubekr BELKAID, Tlemcen,2012.
- [9] Patrick GUIRAUD « Les solutions techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages de génie civil en béton», Construction moderne / Annuel "Ouvrages d'art" 2011.
- [10] JOSEPH Abou Zeid ; 'Information et communication pour l'ingénieur Génie Civil'–ENG 222 ; « Méthodes de réparation et de protection des ouvrages en béton armé. » Institut des Sciences Appliquées et Économiques - Université Libanaise ISAE – Cnam Liban, Centre du Liban associé au Conservatoire

national des arts et métiers – Paris ; on 30 April 2016.

- [11] ASCE-ACI Committee 445 on Shear and Torsion. 1998. "Recent Approaches to Shear Design of Structural Concrete". Journal of Structural Engineering Vol. 124, No. 12, 1375 - 1417, December.
- [12] BELARBI A; THOMAS T.C.HSU; Constitutive law of softened concrete in biaxial tension- compression. ACI Structural Journal September-October 1995
- [13] Bhide S.B. & Collins M.P. 1989. "Influence of axial tension on the shear capacity of reinforced concrete members" ACI Struct. J., 86(5), 570-581.
- [14] Collins M.P. 1978. "Toward a rational theory for RC members in shear". J. Struct. Eng., ASCE, 104(4), 649-666.
- [15] Collins M.P & Mitchell D. 1980. "Shear and torsion of prestressed and non-prestressed concrete beams". ACI journal, September- October, pp. 32-100.
- [16] Avis Technique 3/15-838, Renforcement de structure par un procédé de collage de fibres de carbone et de fibres de verre 2016
- [17] Ali Kezmane, Said Boukai, Madounilylia, Mohand Hamizi Simulation numérique des voiles en béton armé renforcés par un matériau composite ; Département de génie civil, Université de Tizi-Ouzou, Algérie, Article ,2013.
- [18] Combes D. 1996. "Modélisation du comportement sous chargement sismique des structures de bâtiments comportant des murs de remplissage en maçonnerie". Thèse Ecole Centrale Paris, ELSA JRC.
- [19] Davenne L. 1990. "Modélisation de l'influence des armatures transversales sur le comportement non linéaire d'éléments de béton armé ". Thèse Université Pierre et Marie Curie, Paris 6.
- [20] Davidovici V. et al. 1985. "Génie Parasismique". Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [21] Mémoire d'ingénieur, « Analyse et renforcement d'un bâtiment existant soumis à une extension et aux nouvelles normes sismiques » présenté par Mariana Abou, CNAM Paris, 2015
- [22] Sun Z., Seible F., Priestley M.J.N., (1993) – Flexural retrofit of rectangular reinforced concrete bridge column by steel jacketing – Structural Systems

Research Project, Report SSRP-93/07, University of California, San Diego, February 1993, 215p

[23] Priestley M.J.N., Seible F., Calvi G.M., (1996) – Seismic design and retrofit of bridges – Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc. 686p

[24] J. PERCHAT. « Béton Armé, Règles BAEL, Pièces soumises à des sollicitations normales », Techniques de l'Ingénieur, C2306-C2320, 1991

[25] A.PLUMIER, pathologie et réparations structurelles des constructions, ArGenCo, édition 2006

[26] J.V. MIRANDA, techniques et systèmes de renfort des structures en béton 2004.

J. PERCHAT. « Béton Armé, Règles BAEL, Pièces soumises à des sollicitations normales », Techniques de l'Ingénieur, C2306-C2320, 1991

[27] Perfectionnement sur les techniques de réhabilitation et de renforcement des structures, rencontres scientifiques, SOCOTEC-CTC année 2002

[28] GUIDES STRRES/FABEM 7 Réparation et renforcement des structures

[29] AFPS, (1995) – Le séisme de Hyogo-Ken Nambu (Kobe, Japon) du 17janvier 1995. Rapport de mission

[30] (Guide technique) Renforcer le bâti existant en zone sismique

[www.qualiteconstruction.com](http://www.qualiteconstruction.com) rubrique « Nos publication ».

[31] Massicotte, B., Boucher-Proulx, G. (2010). Seismic retrofitting of bridge pier with UHPFRC -Designing and Building with UHPFRC: State of the Art and Development, ISTE-Wiley, pp. 531-540

[32] NISEE (National Information Service for Earthquake Engineering), Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center University of California, Berkeley ([nisee.berkeley.edu](http://nisee.berkeley.edu)).

[33] BENOUGHIDENE Sara et MOUES Racha, mémoire de master II, « Analyse sismique et renforcement d'un bâtiment existant en vue d'une extension», Université 8 Mai 1945

Guelma, Année 2022.

- [34] Thèse en cotutelle de DOCTORAT (Université de Reims Champagne Ardenne)  
Le 13 décembre 2008
- [35] Thèse de doctorat. Contribution à l'analyse du comportement mécanique de dalles en béton arme renforcées par matériaux composites. El Hussain ROCHDI. L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON 1.2004
- [36] Farid Abou Chakra. Renforcement des poteaux en béton armé au moyen de polymère renforcé par fibre de carbone : comparaison des codes. Matériaux composites et construction. 2016
- [37] KHANOUCHE Khadîdja, OUDJANE Rabah, mémoire de master II « Etude du ballastées Echanger des quatre chemins Bejaia », Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, Année 2012.
- [38] Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise, génie civil, Jean-François Garneau, 2015.
- [39] Madi R. Bordjiba A. Guenfoud M. 2019, "Rehabilitation of Reinforced Concrete Buildings A ainst the Earthquake", The 7th International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics, 16-18 December 2019, Hammamet, Tunisia.
- [40] Madi R. Bordjiba A. Guenfoud M. 2020, "Amélioration de la capacité des bâtiments par réhabilitation des éléments structuraux", Congrès Algérien de mécanique CAM2019, 23-26 Février 2020, Université de Ghardaïa, Ghardaïa, Algérie.
- [41] Madi R. Bordjiba A. Guenfoud M. 2019, "Compliance with RPA of an old building", 4th International Symposium on Material and Sustainable Development, 12-14 November 2019, Boumerdes, Algeria.
- [42] Madi R., Guenfoud M. 2011, "Etude de la vulnérabilité des constructions vis-à-vis du séisme", 1er congrès international : le génie civil et le développement durable, 17-19 Octobre 2011, Université de Tébessa, Algérie.

- [43] Madi R., Guenfoud M., "Etude de la vulnérabilité des constructions vis-à-vis du Séisme", Revue : Technologie et développement, ANDRU, Volume n° 8, 207-220, 2011.
- [44] Madi R., Guenfoud M. 2011, "Techniques de renforcement des bâtiments en béton armé vis-à-vis au séisme", Association Universitaire de Génie civil, La 29ème Rencontre Universitaire de Génie Civil: Le Génie Civil au service de la Méditerranée, 29-31 Mai 2011, Université Aboubekr Belkaïd, Tlemcen, Algérie.
- [45] A. Okakpu, G. Ozay. 2015, "Decision selection technic for building strengthening methods", Asian journal of civil engineering (BHRC), Vol. 16, No. 2, PP. 203-218, Iran.
- [46] Madi R., Guenfoud M. « Recherche de la position optimale des voiles", CMSS-2017, MATEC Web of Conferences 149, 02010 (2018).
- [47] Madi R., Guenfoud M. 2011, "Renforcement des poteaux en béton armé", Congrès Algérien de mécanique CAM2011, 14-17 Novembre 2011, Université 08 mai 45, Guelma, Algérie.
- [48] Madi R., Guenfoud M. 2013, "Renforcement des poteaux en béton armé par PRF et chemisage en béton", Congrès Algérien de mécanique CAM2013, 25-28 Novembre 2013, Université de Mascara, Mascara, Algérie.
- [49] Madi R., Guenfoud M. 2015, "Renforcement des poteaux en béton armé par PRF et chemisage en béton", Annales du Bâtiment et des travaux Publics, Volume 67, N° 1, Avril 2015, Editions ESKA, Paris, France.
- [50] D. Sen, M. Bigamy. 2017, "Decision selection technic for building strengthening methods", Asian journal of civil engineering (BHRC), Vol. 18, No. 3 (2017), PP. 515-534, Iran.
- [51] Madi R. Guenfoud M. 2013, "Renforcement par PRF des poteaux rectangulaires en béton armé", 11ème congrès de mécanique, AFM, 23-26 Avril 2013, Université Ibn Zohr, Agadir, Maroc.
- [52] Madi R., Guenfoud M., Nouaouria M. S. 2008, "Behavior of reinforced concrete

beams reinforced by composite materials", International Review of Mechanical Engineering (IREME), Volume 2, n° 4, pp. (524 – 536).

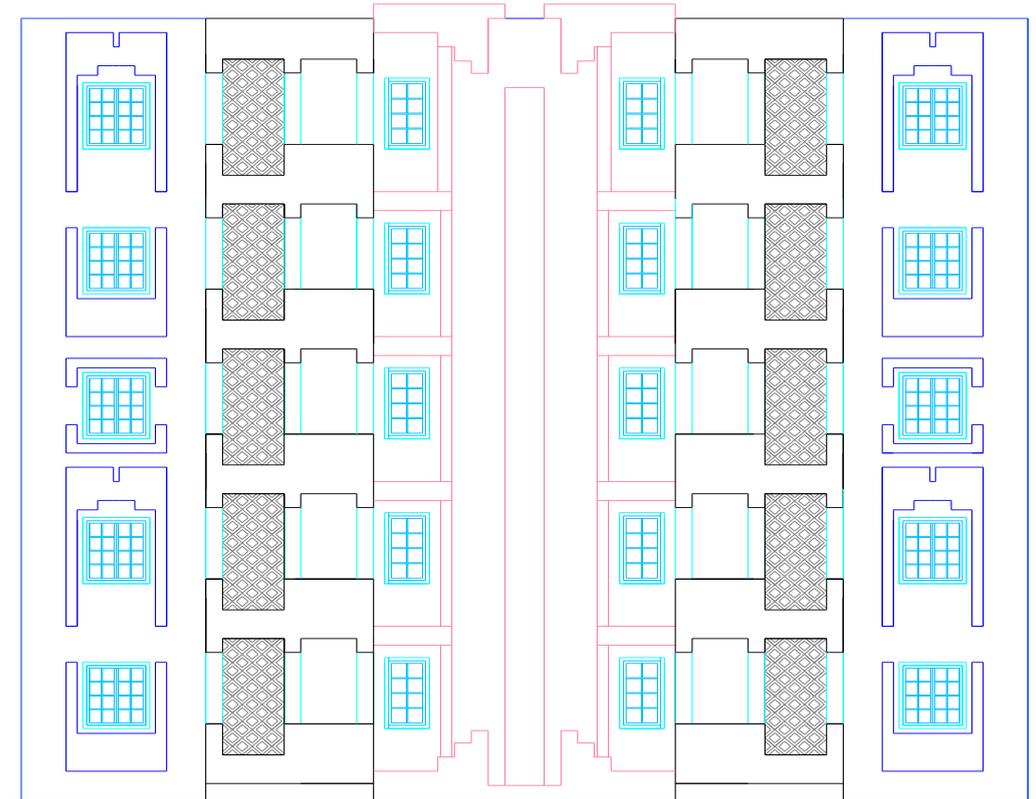
[53] M.Gherdauoi, M. Guenfoud, R. Madi. 2018, "Pushing-behavior of strengthened and repaired RC slabs with CFRP", Construction and Building Materials, Volume 170, 10 Mai 2018 (272-278), ScienceDirect.

[54] Règles parasismiques algériennes, RPA 99. Version 2003.

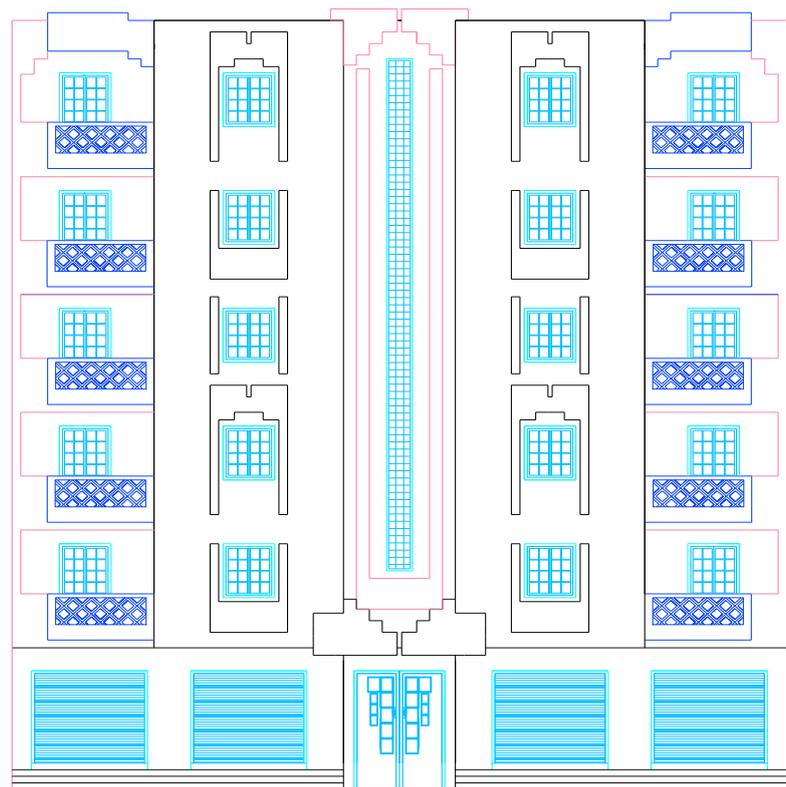
Applied council. 1996, "The seismic Evaluation and Retrofit of concrete buildings", ATC 40, Redwood city, California.

[55] CSI.SAP2000 V-14. 2014, "Integrated finite element analysis and design of structures basic analysis reference manual", Berkeley (CA, USA): Computers and Structures Inc.

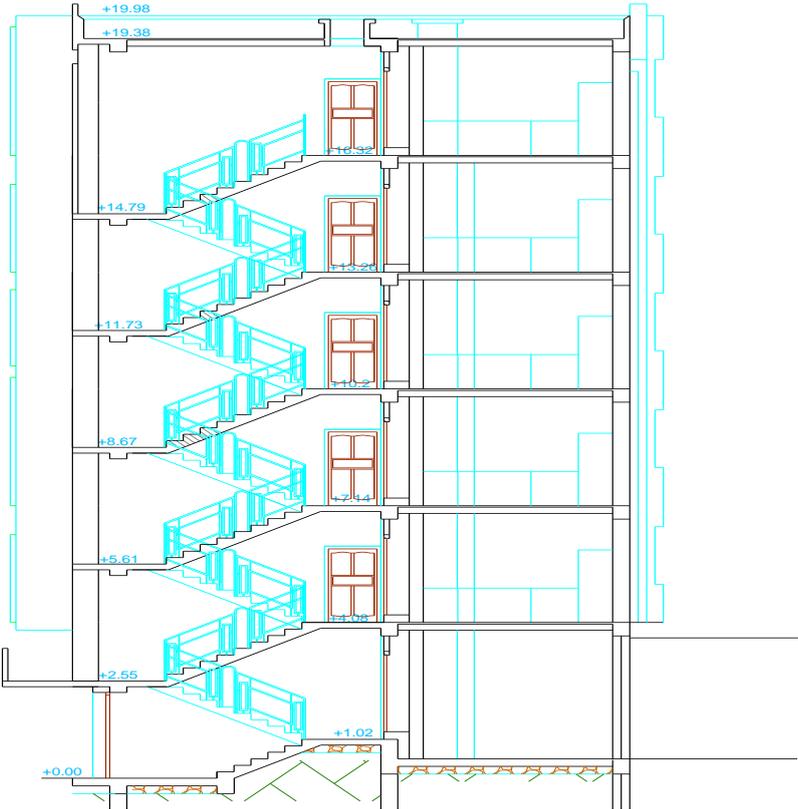
*Annexe*



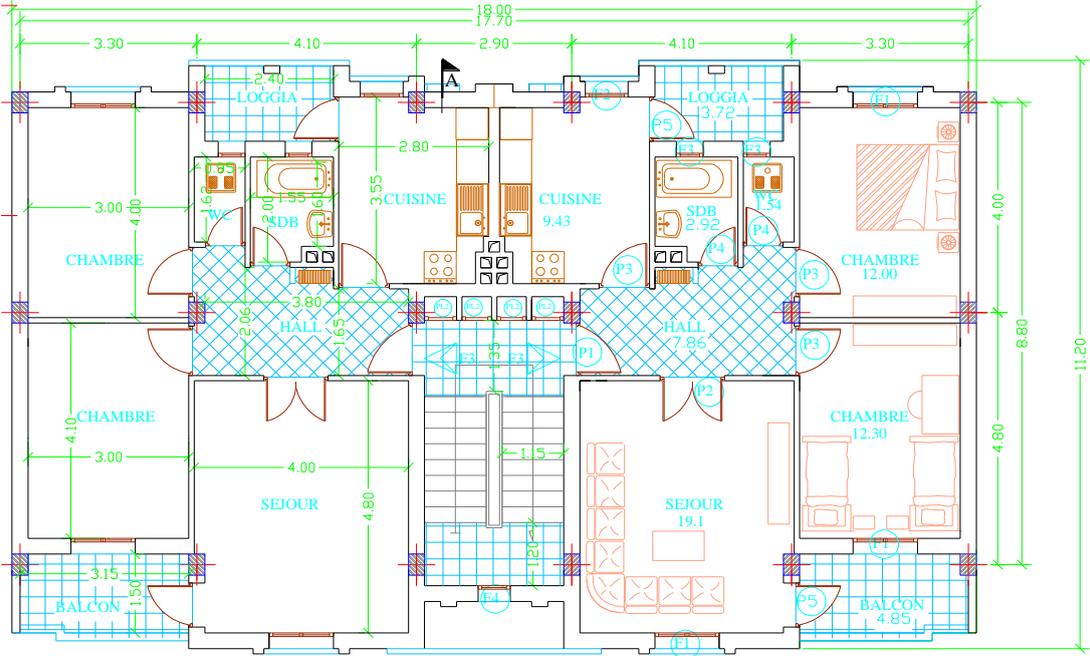
Façade arrière



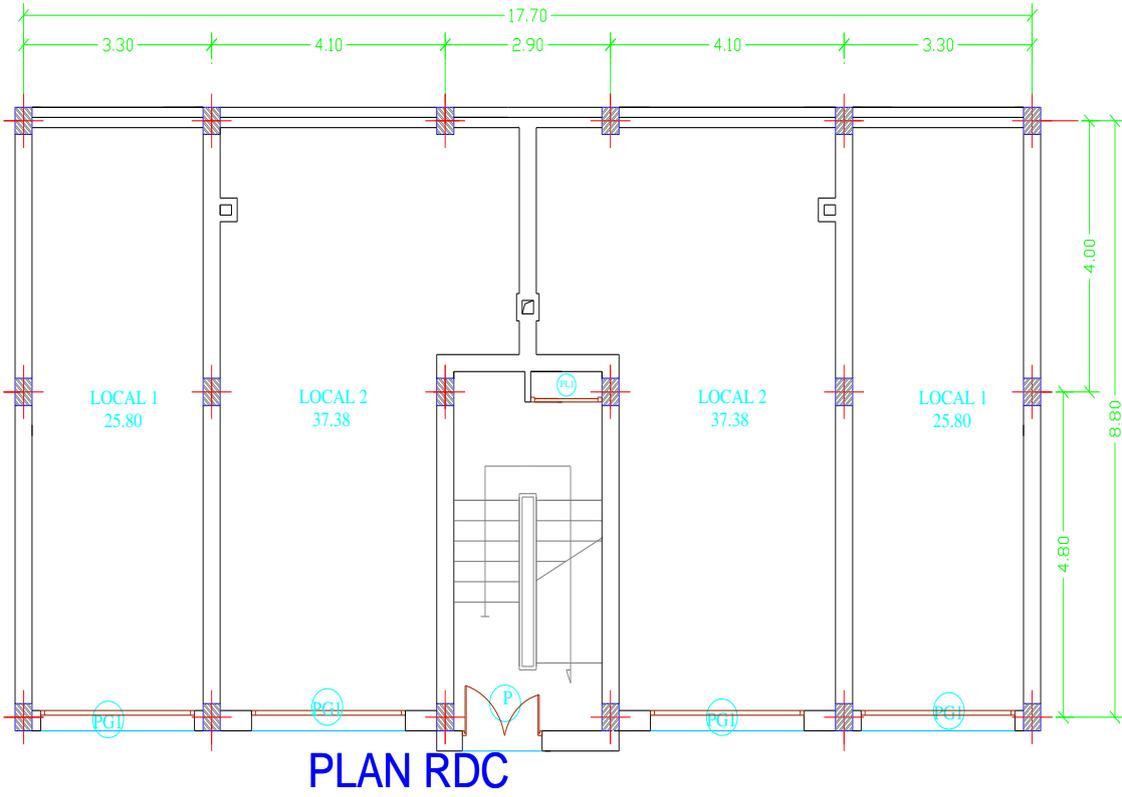
Façade principale



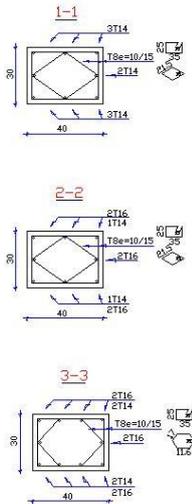
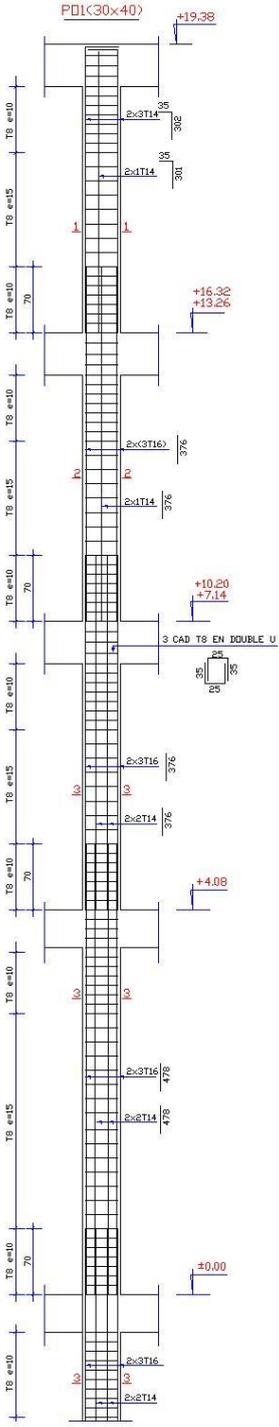
COUPE AA

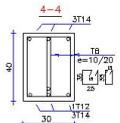
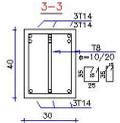
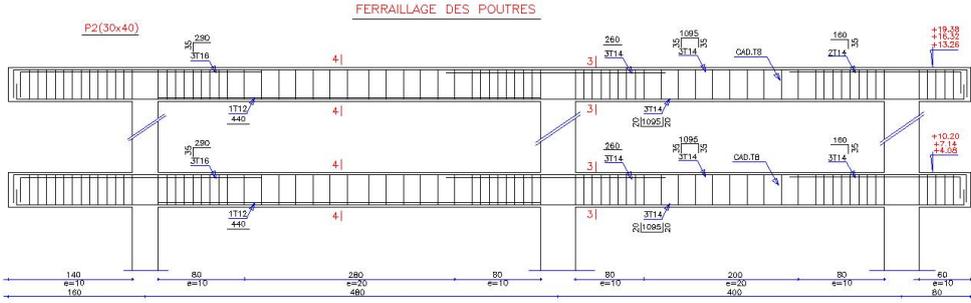


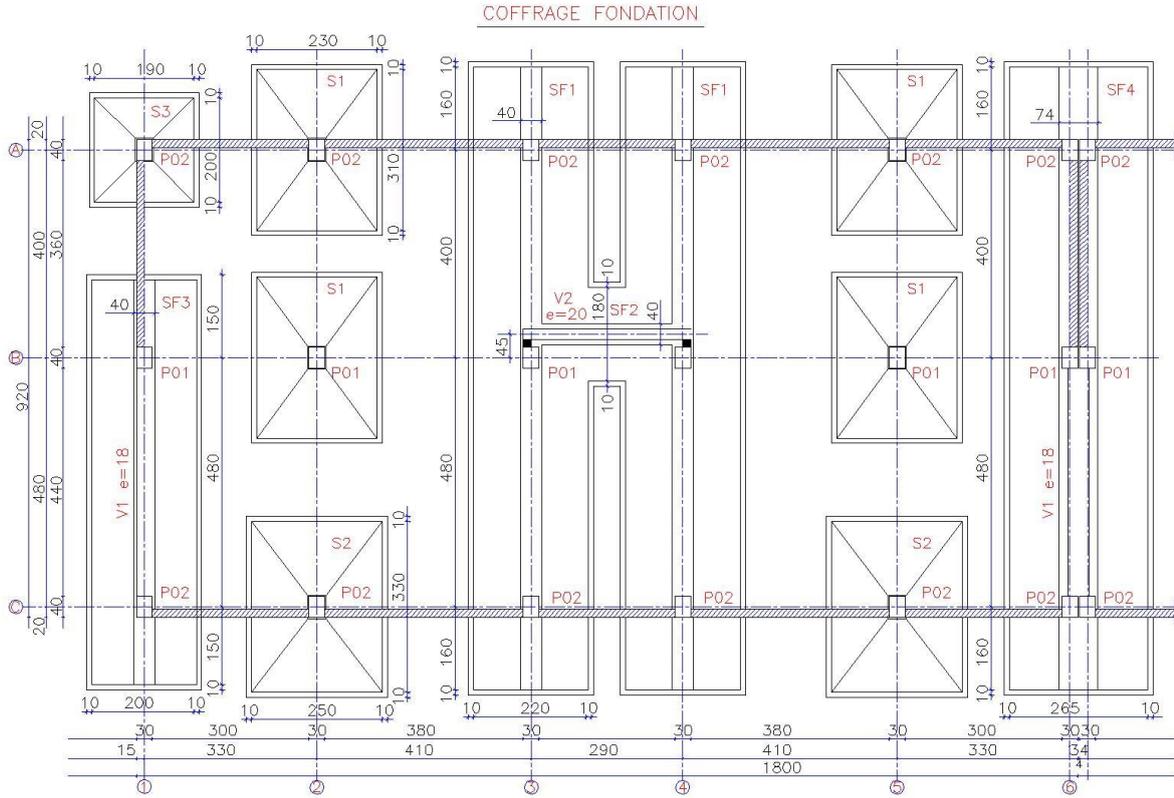
Étage



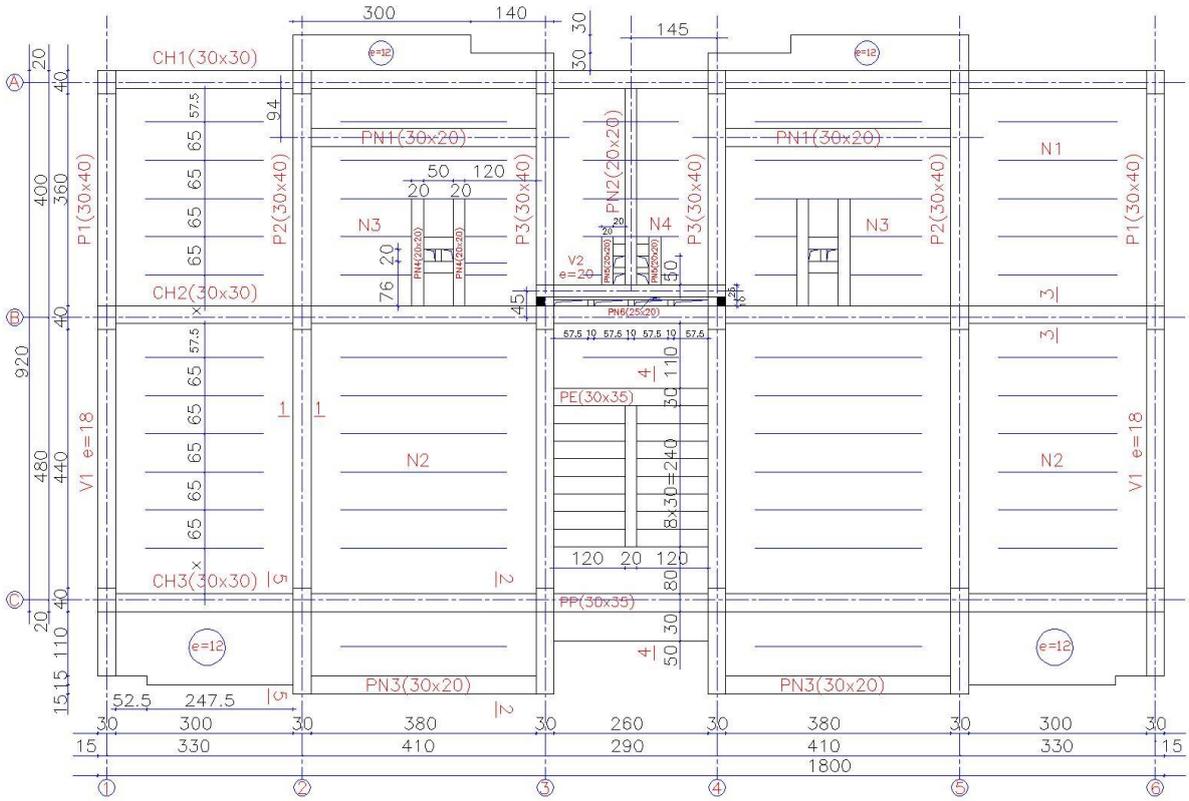
FERRAILLAGE DES POTEAUX

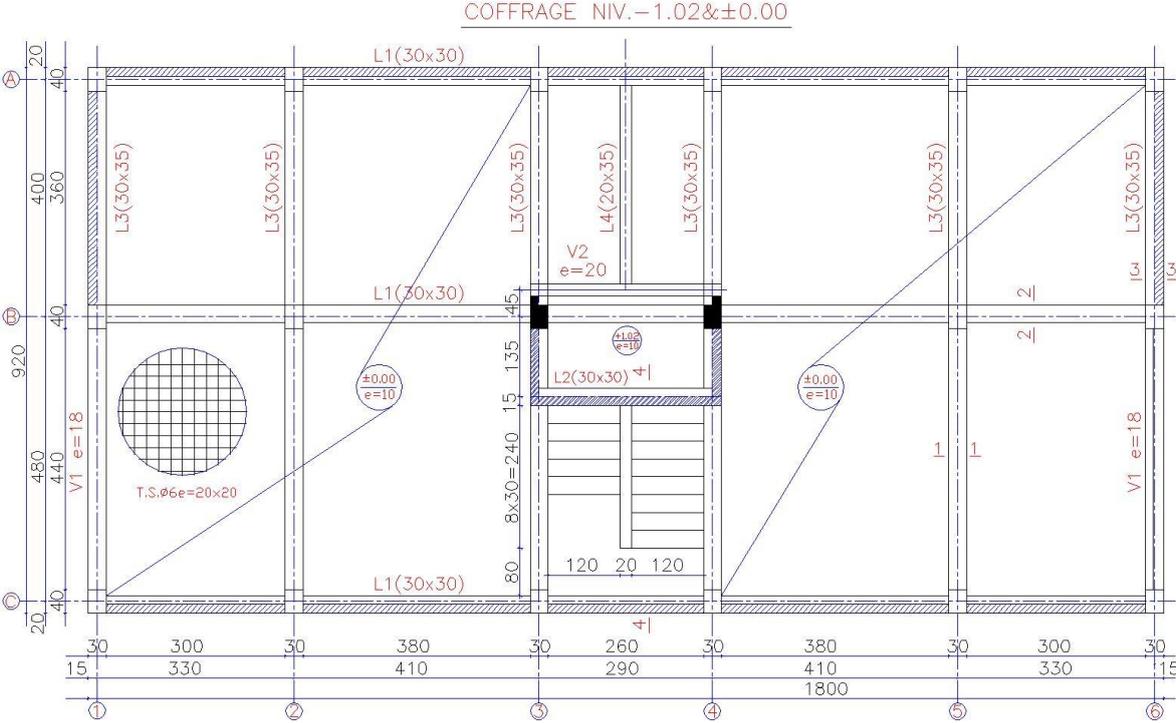




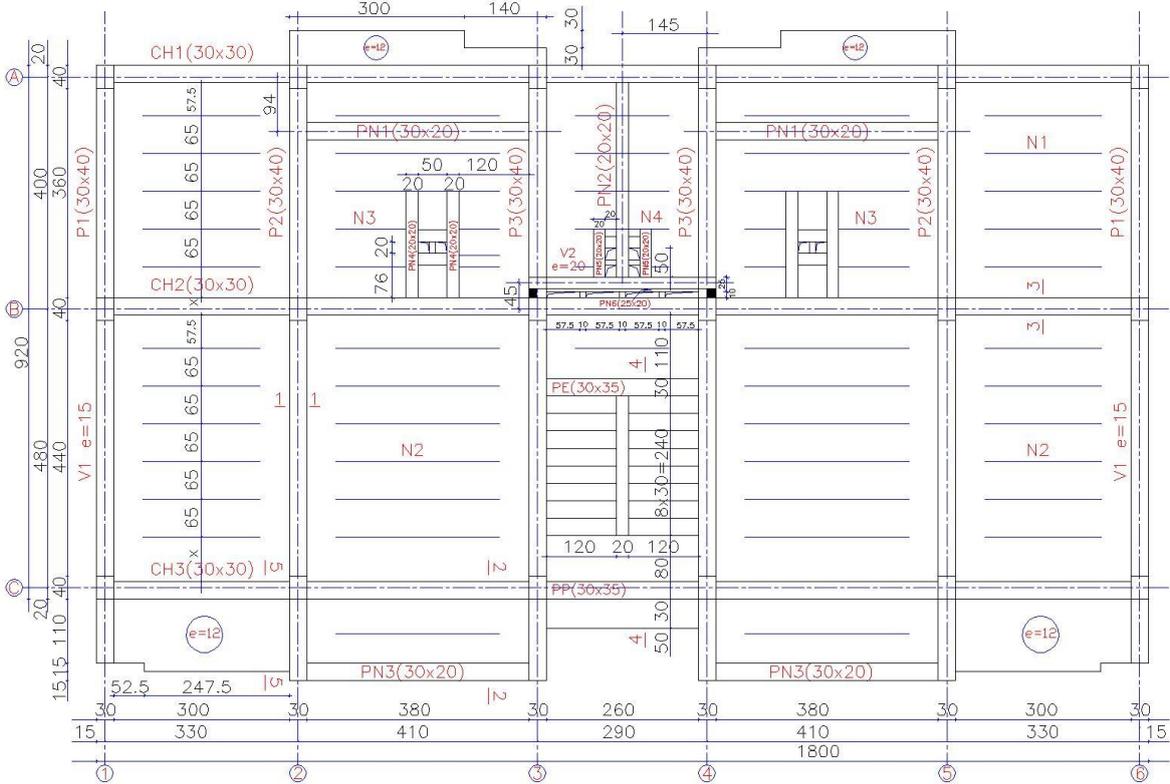


COFFRAGE NIV. +4.08

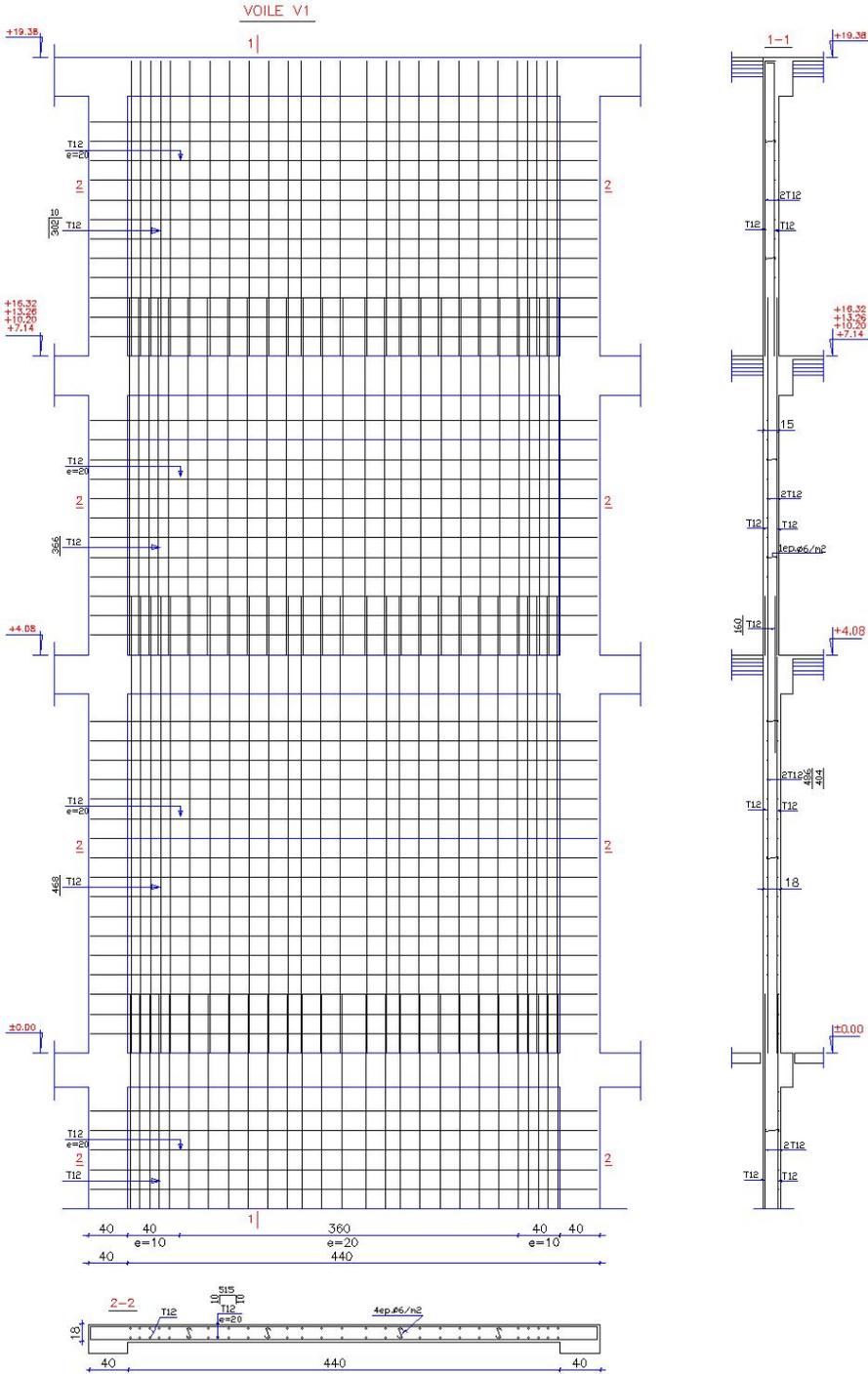




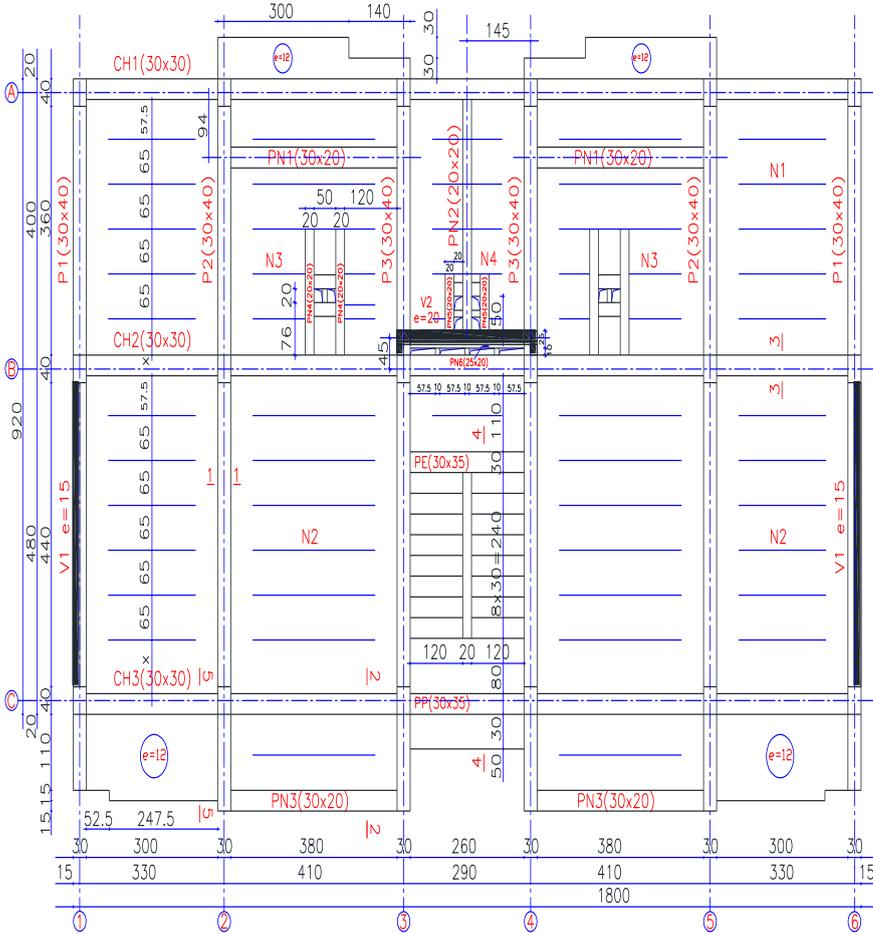
COFFRAGE NIV. +7.14&+10.02&+13.26&+16.32, +19.38

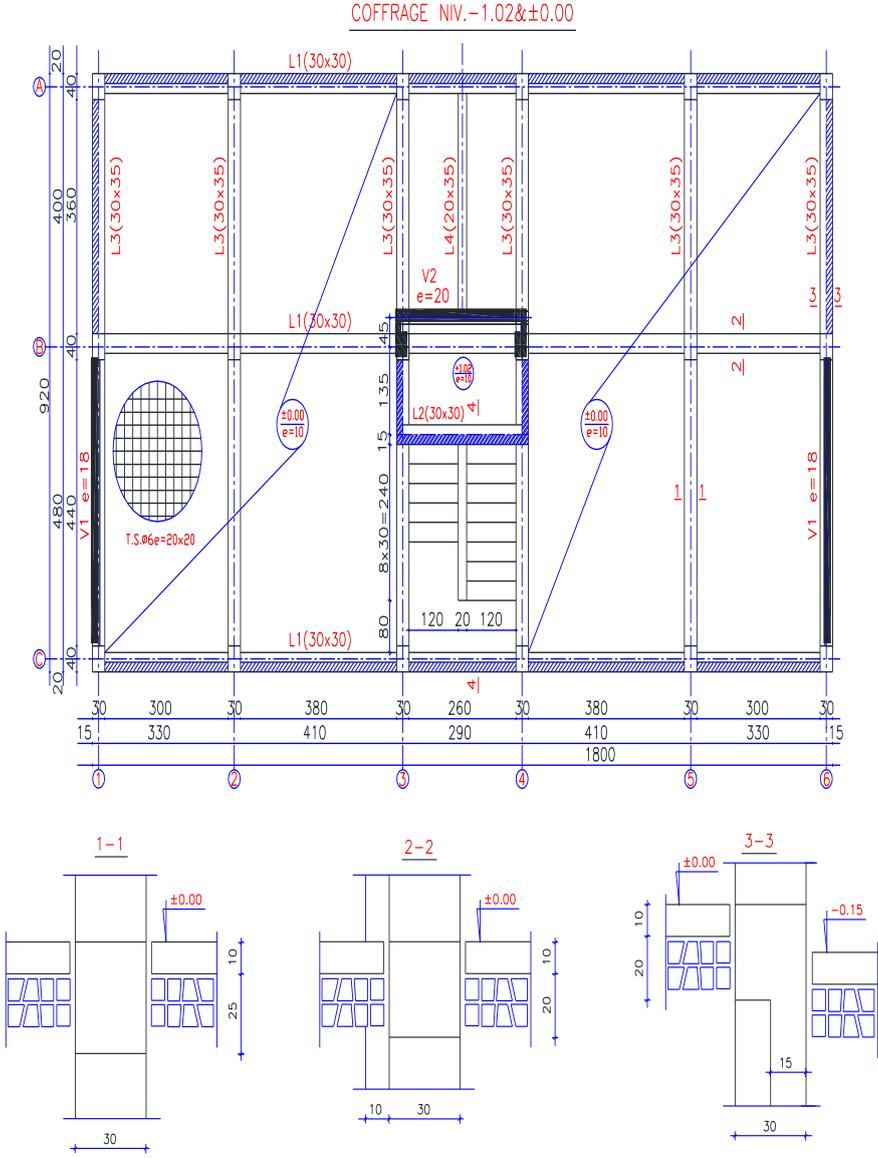


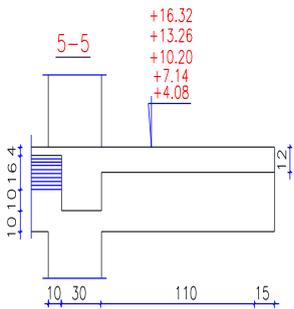
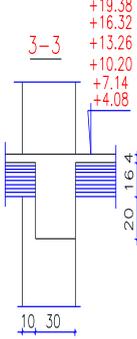
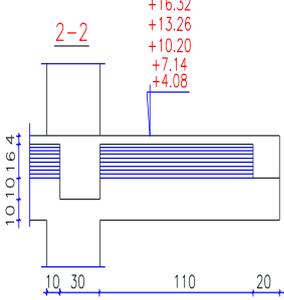
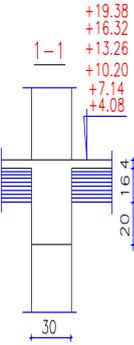
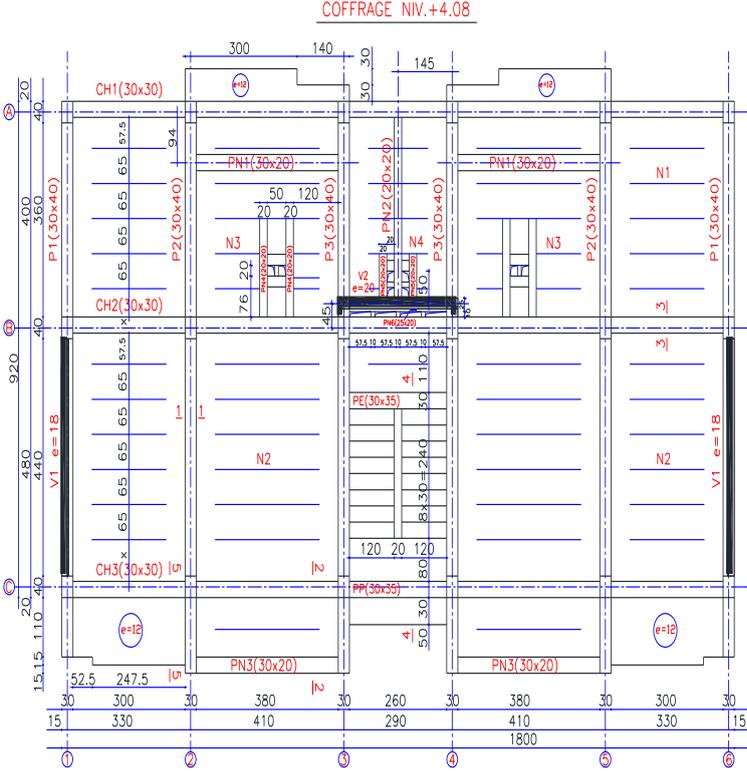
FERRAILLAGE DES VOILES



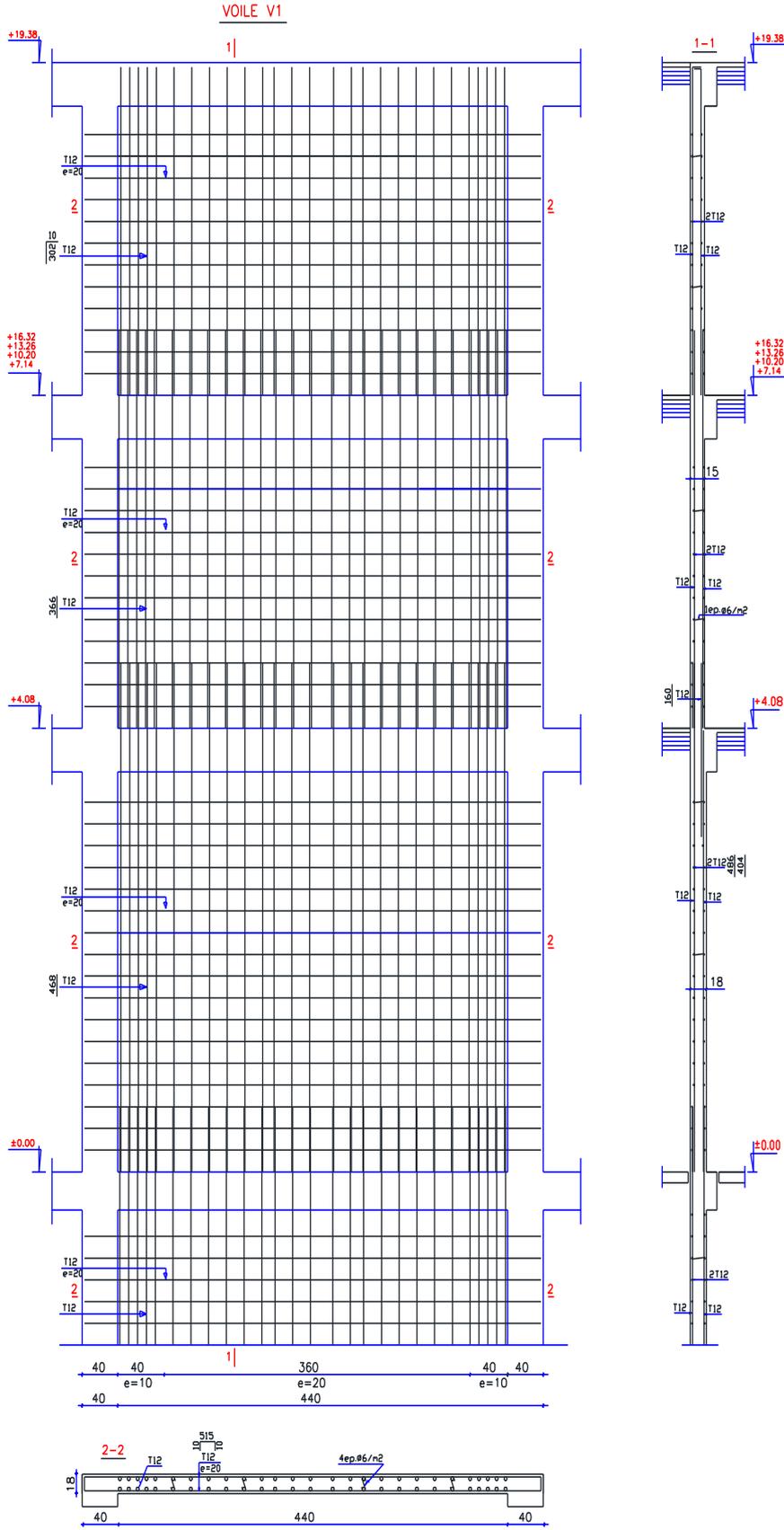
COFFRAGE NIV.+7.14&+10.02&+13.26&+16.32, +19.38







FERRAILLAGE DES VOILES



Modèle Structure fc28 =18 sans renforcement :

Déplacement :

Ex :

| Cas/Etage   | UX [cm] | UY [cm] | dr UX [cm] | dr UY [cm] | d UX | d UY  | Max UX [cm] | Max UY [cm] | Min UX [cm] | Min UY [cm] |
|-------------|---------|---------|------------|------------|------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 8 (C) (CQC) | 5,377   | 0,661   | 5,377      | 0,661      | 0,01 | 0,00  | 5,893       | 1,382       | 0,0         | 0,0         |
| 8 (C) (CQC) | 8,596   | 1,036   | 3,218      | 0,376      | 0,01 | 0,00  | 9,418       | 2,177       | 5,006       | 0,005       |
| 8 (C) (CQC) | 11,377  | 1,338   | 2,781      | 0,302      | 0,01 | 0,00  | 12,454      | 2,833       | 8,015       | -0,026      |
| 8 (C) (CQC) | 13,641  | 1,567   | 2,264      | 0,229      | 0,01 | 0,00  | 14,925      | 3,350       | 10,624      | -0,062      |
| 8 (C) (CQC) | 15,309  | 1,709   | 1,668      | 0,142      | 0,01 | 0,00  | 16,734      | 3,698       | 12,747      | -0,094      |
| 8 (C) (CQC) | 16,383  | 1,651   | 1,075      | -0,058     | 0,00 | -0,00 | 17,880      | 3,830       | 14,325      | -0,084      |

| Cas/Etage   | UX [cm] | UY [cm] | dr UX [cm] | dr UY [cm] | d UX  | d UY  | Max UX [cm] | Max UY [cm] | Min UX [cm] | Min UY [cm] |
|-------------|---------|---------|------------|------------|-------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 9 (C) (CQC) | -5,361  | -0,690  | -5,361     | -0,690     | -0,01 | -0,00 | 0,0         | 0,0         | -5,878      | -1,411      |
| 9 (C) (CQC) | -8,581  | -1,139  | -3,220     | -0,450     | -0,01 | -0,00 | -4,993      | -0,088      | -9,402      | -2,277      |
| 9 (C) (CQC) | -11,363 | -1,533  | -2,782     | -0,393     | -0,01 | -0,00 | -8,005      | -0,150      | -12,437     | -3,021      |
| 9 (C) (CQC) | -13,627 | -1,865  | -2,264     | -0,332     | -0,01 | -0,00 | -10,616     | -0,217      | -14,907     | -3,640      |
| 9 (C) (CQC) | -15,296 | -2,120  | -1,668     | -0,255     | -0,01 | -0,00 | -12,739     | -0,279      | -16,715     | -4,101      |
| 9 (C) (CQC) | -16,367 | -2,191  | -1,072     | -0,071     | -0,00 | -0,00 | -14,316     | -0,457      | -17,858     | -4,361      |

Ey :

| Cas/Etage    | UX [cm] | UY [cm] | dr UX [cm] | dr UY [cm] | d UX | d UY | Max UX [cm] | Max UY [cm] | Min UX [cm] | Min UY [cm] |
|--------------|---------|---------|------------|------------|------|------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 10 (C) (CQC) | 0,155   | 4,078   | 0,155      | 4,078      | 0,00 | 0,01 | 0,669       | 4,141       | 0,0         | 0,0         |
| 10 (C) (CQC) | 0,208   | 6,745   | 0,053      | 2,667      | 0,00 | 0,01 | 0,283       | 6,808       | 0,129       | 4,036       |
| 10 (C) (CQC) | 0,278   | 9,076   | 0,070      | 2,332      | 0,00 | 0,01 | 0,360       | 9,132       | 0,188       | 6,700       |
| 10 (C) (CQC) | 0,345   | 11,011  | 0,067      | 1,934      | 0,00 | 0,01 | 0,437       | 11,061      | 0,255       | 9,036       |
| 10 (C) (CQC) | 0,400   | 12,468  | 0,055      | 1,458      | 0,00 | 0,00 | 0,506       | 12,523      | 0,320       | 10,977      |
| 10 (C) (CQC) | 0,436   | 13,460  | 0,035      | 0,991      | 0,00 | 0,00 | 0,540       | 13,500      | 0,372       | 12,447      |

| Cas/Etage    | UX [cm] | UY [cm] | dr UX [cm] | dr UY [cm] | d UX  | d UY  | Max UX [cm] | Max UY [cm] | Min UX [cm] | Min UY [cm] |
|--------------|---------|---------|------------|------------|-------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 11 (C) (CQC) | -0,138  | -4,107  | -0,138     | -4,107     | -0,00 | -0,01 | 0,0         | 0,0         | -0,632      | -4,166      |
| 11 (C) (CQC) | -0,193  | -6,848  | -0,055     | -2,741     | -0,00 | -0,01 | -0,114      | -4,066      | -0,267      | -6,911      |
| 11 (C) (CQC) | -0,264  | -9,271  | -0,071     | -2,423     | -0,00 | -0,01 | -0,172      | -6,800      | -0,352      | -9,331      |
| 11 (C) (CQC) | -0,332  | -11,308 | -0,067     | -2,037     | -0,00 | -0,01 | -0,240      | -9,225      | -0,432      | -11,365     |
| 11 (C) (CQC) | -0,387  | -12,879 | -0,055     | -1,571     | -0,00 | -0,01 | -0,305      | -11,268     | -0,499      | -12,943     |
| 11 (C) (CQC) | -0,420  | -14,000 | -0,032     | -1,120     | -0,00 | -0,00 | -0,357      | -12,849     | -0,530      | -14,048     |

Effort tranchant :

Ex :

| Cas/Etage | G (x,y,z) [m]    | FX [T] | FY [T] | MZ [Tm] | FX sur les poteaux [T] | FX sur les voiles [T] | FY sur les poteaux [T] | FY sur les voiles [T] |
|-----------|------------------|--------|--------|---------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| 4/ 1      | 846 3,983 3,798  | 187,77 | 4,82   | 215,00  | 140,00                 | 47,77                 | 5,11                   | -0,29                 |
| 4/ 2      | 850 4,031 6,993  | 170,79 | 4,40   | 194,26  | 139,20                 | 31,59                 | 4,70                   | -0,30                 |
| 4/ 3      | 850 4,008 10,054 | 148,74 | 3,86   | 169,50  | 122,61                 | 26,13                 | 4,10                   | -0,24                 |
| 4/ 4      | 850 4,031 13,113 | 122,23 | 3,22   | 134,60  | 101,17                 | 21,06                 | 3,26                   | -0,05                 |
| 4/ 5      | 850 4,031 16,173 | 89,98  | 2,44   | 93,63   | 74,52                  | 15,47                 | 2,73                   | -0,29                 |
| 4/ 6      | 850 4,004 19,279 | 49,54  | 1,40   | 46,25   | 49,54                  | 0,00                  | 1,40                   | -0,00                 |

Ey

| Cas/Etage | G (x,y,z) [m]    | FX [T] | FY [T] | MZ [Tm] | FX sur les poteaux [T] | FX sur les voiles [T] | FY sur les poteaux [T] | FY sur les voiles [T] |
|-----------|------------------|--------|--------|---------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| 5/ 1      | 846 3,983 3,798  | 4,82   | 208,15 | 25,91   | 5,80                   | -0,98                 | 190,43                 | 17,72                 |
| 5/ 2      | 850 4,031 6,993  | 4,67   | 190,39 | 23,71   | 7,17                   | -2,50                 | 152,38                 | 38,01                 |
| 5/ 3      | 850 4,008 10,054 | 4,20   | 166,26 | 20,58   | 5,90                   | -1,70                 | 133,33                 | 32,93                 |
| 5/ 4      | 850 4,031 13,113 | 3,53   | 136,66 | 16,92   | 5,02                   | -1,49                 | 109,87                 | 26,79                 |
| 5/ 5      | 850 4,031 16,173 | 2,74   | 100,49 | 12,38   | 4,15                   | -1,41                 | 80,97                  | 19,52                 |
| 5/ 6      | 850 4,004 19,279 | 1,72   | 55,20  | 6,49    | 1,72                   | 0,00                  | 55,20                  | 0,00                  |

## Période T

| Cas/Mode | Fréquence [Hz] | Période [sec] | Masses<br>Cumulées UX<br>[%] | Masses<br>Cumulées UY<br>[%] | Masses<br>Cumulées UZ<br>[%] | Masse Modale<br>UX [%] | Masse Modale<br>UY [%] | Masse Modale<br>UZ [%] | Tot.mas UX [kg] | Tot.mas UY [kg] | Tot.mas UZ [kg] |
|----------|----------------|---------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 3/ 1     | 0,67           | 1,48          | 86,12                        | 0,05                         | 0,0                          | 86,12                  | 0,05                   | 0,0                    | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 2     | 0,77           | 1,30          | 88,82                        | 1,30                         | 0,0                          | 2,70                   | 1,25                   | 0,0                    | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 3     | 0,79           | 1,27          | 88,97                        | 87,78                        | 0,0                          | 0,15                   | 86,48                  | 0,0                    | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 4     | 2,02           | 0,49          | 96,60                        | 87,78                        | 0,0                          | 7,63                   | 0,00                   | 0,0                    | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 5     | 2,36           | 0,42          | 96,64                        | 88,76                        | 0,0                          | 0,04                   | 0,98                   | 0,0                    | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 6     | 2,38           | 0,42          | 96,66                        | 96,38                        | 0,0                          | 0,02                   | 7,62                   | 0,0                    | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 7     | 3,39           | 0,29          | 98,39                        | 96,39                        | 0,0                          | 1,74                   | 0,00                   | 0,0                    | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 8     | 4,11           | 0,24          | 98,39                        | 97,85                        | 0,0                          | 0,00                   | 1,47                   | 0,0                    | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 9     | 4,12           | 0,24          | 98,39                        | 98,30                        | 0,0                          | 0,00                   | 0,44                   | 0,0                    | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 10    | 4,78           | 0,21          | 98,93                        | 98,31                        | 0,0                          | 0,53                   | 0,01                   | 0,0                    | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 11    | 5,92           | 0,17          | 98,94                        | 98,83                        | 0,0                          | 0,01                   | 0,53                   | 0,0                    | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 12    | 5,96           | 0,17          | 98,95                        | 98,90                        | 0,0                          | 0,01                   | 0,07                   | 0,0                    | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 13    | 6,12           | 0,16          | 99,09                        | 98,93                        | 0,0                          | 0,14                   | 0,02                   | 0,0                    | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 14    | 7,08           | 0,14          | 99,12                        | 98,93                        | 0,0                          | 0,03                   | 0,00                   | 0,0                    | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 15    | 7,79           | 0,13          | 99,12                        | 99,11                        | 0,0                          | 0,00                   | 0,19                   | 0,0                    | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 16    | 7,81           | 0,13          | 99,12                        | 99,12                        | 0,0                          | 0,00                   | 0,01                   | 0,0                    | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 17    | 9,22           | 0,11          | 99,12                        | 99,12                        | 0,0                          | 0,00                   | 0,00                   | 0,0                    | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 18    | 9,26           | 0,11          | 99,12                        | 99,16                        | 0,0                          | 0,00                   | 0,04                   | 0,0                    | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 19    | 13,79          | 0,07          | 99,12                        | 99,16                        | 0,0                          | 0,00                   | 0,00                   | 0,0                    | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 20    | 13,97          | 0,07          | 99,12                        | 99,17                        | 0,0                          | 0,00                   | 0,00                   | 0,0                    | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |

## Modèle structures fc28=25 sans renforcement

Déplacement :

Ex

| Cas/Etage   | UX [cm] | UY [cm] | dr UX [cm] | dr UY [cm] | d UX | d UY  | Max UX [cm] | Max UY [cm] | Min UX [cm] | Min UY [cm] |
|-------------|---------|---------|------------|------------|------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 8 (C) (CQC) | 5,359   | 0,643   | 5,359      | 0,643      | 0,01 | 0,00  | 5,866       | 1,353       | 0,0         | 0,0         |
| 8 (C) (CQC) | 8,468   | 0,993   | 3,109      | 0,350      | 0,01 | 0,00  | 9,266       | 2,101       | 4,994       | 0,012       |
| 8 (C) (CQC) | 11,152  | 1,275   | 2,685      | 0,282      | 0,01 | 0,00  | 12,195      | 2,718       | 7,902       | -0,015      |
| 8 (C) (CQC) | 13,334  | 1,488   | 2,182      | 0,214      | 0,01 | 0,00  | 14,576      | 3,207       | 10,421      | -0,048      |
| 8 (C) (CQC) | 14,937  | 1,621   | 1,602      | 0,132      | 0,01 | 0,00  | 16,315      | 3,536       | 12,467      | -0,080      |
| 8 (C) (CQC) | 15,969  | 1,565   | 1,032      | -0,056     | 0,00 | -0,00 | 17,417      | 3,659       | 13,981      | -0,055      |

| Cas/Etage   | UX [cm] | UY [cm] | dr UX [cm] | dr UY [cm] | d UX  | d UY  | Max UX [cm] | Max UY [cm] | Min UX [cm] | Min UY [cm] |
|-------------|---------|---------|------------|------------|-------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 9 (C) (CQC) | -5,342  | -0,670  | -5,342     | -0,670     | -0,01 | -0,00 | 0,0         | 0,0         | -5,850      | -1,381      |
| 9 (C) (CQC) | -8,453  | -1,090  | -3,111     | -0,420     | -0,01 | -0,00 | -4,980      | -0,093      | -9,250      | -2,196      |
| 9 (C) (CQC) | -11,139 | -1,459  | -2,686     | -0,369     | -0,01 | -0,00 | -7,891      | -0,142      | -12,179     | -2,897      |
| 9 (C) (CQC) | -13,322 | -1,771  | -2,182     | -0,312     | -0,01 | -0,00 | -10,413     | -0,199      | -14,559     | -3,482      |
| 9 (C) (CQC) | -14,925 | -2,012  | -1,603     | -0,241     | -0,01 | -0,00 | -12,459     | -0,254      | -16,298     | -3,920      |
| 9 (C) (CQC) | -15,955 | -2,079  | -1,030     | -0,067     | -0,00 | -0,00 | -13,973     | -0,432      | -17,398     | -4,165      |

Ey

| Cas/Etage   | UX [cm] | UY [cm] | dr UX [cm] | dr UY [cm] | d UX | d UY | Max UX [cm] | Max UY [cm] | Min UX [cm] | Min UY [cm] |
|-------------|---------|---------|------------|------------|------|------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 10 (C) (CQ) | 0,158   | 4,044   | 0,158      | 4,044      | 0,00 | 0,01 | 0,668       | 4,106       | 0,0         | 0,0         |
| 10 (C) (CQ) | 0,215   | 6,598   | 0,057      | 2,554      | 0,00 | 0,01 | 0,284       | 6,660       | 0,135       | 4,001       |
| 10 (C) (CQ) | 0,287   | 8,832   | 0,072      | 2,234      | 0,00 | 0,01 | 0,363       | 8,888       | 0,197       | 6,551       |
| 10 (C) (CQ) | 0,356   | 10,686  | 0,068      | 1,854      | 0,00 | 0,01 | 0,440       | 10,738      | 0,266       | 8,789       |
| 10 (C) (CQ) | 0,411   | 12,083  | 0,055      | 1,397      | 0,00 | 0,00 | 0,507       | 12,138      | 0,331       | 10,648      |
| 10 (C) (CQ) | 0,446   | 13,033  | 0,035      | 0,950      | 0,00 | 0,00 | 0,541       | 13,078      | 0,384       | 12,055      |

| Cas/Etage   | UX [cm] | UY [cm] | dr UX [cm] | dr UY [cm] | d UX  | d UY  | Max UX [cm] | Max UY [cm] | Min UX [cm] | Min UY [cm] |
|-------------|---------|---------|------------|------------|-------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 11 (C) (CQ) | -0,141  | -4,072  | -0,141     | -4,072     | -0,00 | -0,01 | 0,0         | 0,0         | -0,633      | -4,129      |
| 11 (C) (CQ) | -0,200  | -6,695  | -0,059     | -2,624     | -0,00 | -0,01 | -0,119      | -4,030      | -0,269      | -6,756      |
| 11 (C) (CQ) | -0,274  | -9,016  | -0,074     | -2,321     | -0,00 | -0,01 | -0,182      | -6,646      | -0,355      | -9,076      |
| 11 (C) (CQ) | -0,343  | -10,969 | -0,069     | -1,952     | -0,00 | -0,01 | -0,252      | -8,968      | -0,434      | -11,027     |
| 11 (C) (CQ) | -0,399  | -12,474 | -0,056     | -1,505     | -0,00 | -0,00 | -0,318      | -10,924     | -0,500      | -12,537     |
| 11 (C) (CQ) | -0,432  | -13,547 | -0,033     | -1,073     | -0,00 | -0,00 | -0,371      | -12,438     | -0,533      | -13,599     |

Effort tranchant :

Ex

| Cas/Etage | G (x,y,z) [m]    | FX [T] | FY [T] | MZ [Tm] | FX sur les poteaux [T] | FX sur les voiles [T] | FY sur les poteaux [T] | FY sur les voiles [T] |
|-----------|------------------|--------|--------|---------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| 4/ 1      | ,846 3,983 3,798 | 190,55 | 5,20   | 213,69  | 142,41                 | 48,14                 | 5,29                   | -0,09                 |
| 4/ 2      | ,850 4,031 6,993 | 173,21 | 4,75   | 192,61  | 141,52                 | 31,70                 | 4,99                   | -0,24                 |
| 4/ 3      | 850 4,008 10,054 | 150,73 | 4,15   | 167,93  | 124,49                 | 26,24                 | 4,37                   | -0,21                 |
| 4/ 4      | 850 4,031 13,113 | 123,63 | 3,44   | 133,14  | 102,45                 | 21,18                 | 3,48                   | -0,04                 |
| 4/ 5      | 850 4,031 16,173 | 90,73  | 2,58   | 92,48   | 75,14                  | 15,59                 | 2,90                   | -0,32                 |
| 4/ 6      | 850 4,004 19,279 | 49,74  | 1,46   | 45,63   | 49,74                  | 0,00                  | 1,46                   | -0,00                 |

Ey

| Cas/Etage | G (x,y,z) [m]    | FX [T] | FY [T] | MZ [Tm] | FX sur les poteaux [T] | FX sur les voiles [T] | FY sur les poteaux [T] | FY sur les voiles [T] |
|-----------|------------------|--------|--------|---------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| 5/ 1      | ,846 3,983 3,798 | 5,20   | 211,86 | 27,12   | 6,05                   | -0,84                 | 194,27                 | 17,58                 |
| 5/ 2      | ,850 4,031 6,993 | 5,03   | 193,64 | 24,81   | 7,35                   | -2,33                 | 156,62                 | 37,02                 |
| 5/ 3      | 850 4,008 10,054 | 4,52   | 168,96 | 21,50   | 6,06                   | -1,54                 | 137,01                 | 31,96                 |
| 5/ 4      | 850 4,031 13,113 | 3,77   | 138,66 | 17,56   | 5,14                   | -1,36                 | 112,65                 | 26,01                 |
| 5/ 5      | 850 4,031 16,173 | 2,89   | 101,67 | 12,72   | 4,20                   | -1,31                 | 82,71                  | 18,96                 |
| 5/ 6      | 850 4,004 19,279 | 1,77   | 55,58  | 6,60    | 1,77                   | 0,00                  | 55,58                  | 0,00                  |

Période T

| Cas/Mode | Fréquence [Hz] | Période [sec] | Masses Cumulées UX [%] | Masses Cumulées UY [%] | Masses Cumulées UZ [%] | Masse Modale UX [%] | Masse Modale UY [%] | Masse Modale UZ [%] | Tot.mas UX [kg] | Tot.mas UY [kg] | Tot.mas UZ [kg] |
|----------|----------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 3/ 1     | 0,69           | 1,46          | 86,66                  | 0,05                   | 0,0                    | 86,66               | 0,05                | 0,0                 | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 2     | 0,79           | 1,26          | 89,09                  | 1,60                   | 0,0                    | 2,43                | 1,55                | 0,0                 | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 3     | 0,80           | 1,24          | 89,26                  | 88,08                  | 0,0                    | 0,17                | 86,48               | 0,0                 | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 4     | 2,06           | 0,49          | 96,73                  | 88,08                  | 0,0                    | 7,47                | 0,00                | 0,0                 | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 5     | 2,42           | 0,41          | 96,76                  | 89,43                  | 0,0                    | 0,03                | 1,35                | 0,0                 | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 6     | 2,43           | 0,41          | 96,78                  | 96,55                  | 0,0                    | 0,02                | 7,12                | 0,0                 | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 7     | 3,45           | 0,29          | 98,44                  | 96,56                  | 0,0                    | 1,66                | 0,00                | 0,0                 | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 8     | 4,20           | 0,24          | 98,44                  | 97,77                  | 0,0                    | 0,00                | 1,22                | 0,0                 | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 9     | 4,21           | 0,24          | 98,44                  | 98,37                  | 0,0                    | 0,00                | 0,60                | 0,0                 | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 10    | 4,84           | 0,21          | 98,94                  | 98,38                  | 0,0                    | 0,50                | 0,01                | 0,0                 | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 11    | 6,01           | 0,17          | 98,97                  | 98,76                  | 0,0                    | 0,02                | 0,39                | 0,0                 | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 12    | 6,05           | 0,17          | 98,98                  | 98,92                  | 0,0                    | 0,01                | 0,16                | 0,0                 | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 13    | 6,18           | 0,16          | 99,09                  | 98,95                  | 0,0                    | 0,12                | 0,03                | 0,0                 | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 14    | 7,10           | 0,14          | 99,12                  | 98,95                  | 0,0                    | 0,03                | 0,00                | 0,0                 | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 15    | 7,87           | 0,13          | 99,12                  | 99,12                  | 0,0                    | 0,00                | 0,17                | 0,0                 | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 16    | 7,88           | 0,13          | 99,12                  | 99,13                  | 0,0                    | 0,00                | 0,01                | 0,0                 | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 17    | 9,26           | 0,11          | 99,12                  | 99,13                  | 0,0                    | 0,00                | 0,00                | 0,0                 | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 18    | 9,31           | 0,11          | 99,12                  | 99,17                  | 0,0                    | 0,00                | 0,04                | 0,0                 | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 19    | 15,07          | 0,07          | 99,12                  | 99,17                  | 0,0                    | 0,00                | 0,00                | 0,0                 | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |
| 3/ 20    | 15,22          | 0,07          | 99,12                  | 99,17                  | 0,0                    | 0,00                | 0,00                | 0,0                 | 3060213,68      | 3060213,68      | 0,0             |

Modèle Structure  $f_{c28}=25$  avec renforcement :

Déplacement :

Ex

| Cas/Etage   | UX [cm] | UY [cm] | dr UX [cm] | dr UY [cm] | d UX | d UY  | Max UX [cm] | Max UY [cm] | Min UX [cm] | Min UY [cm] |
|-------------|---------|---------|------------|------------|------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 8 (C) (CQC) | 1,227   | 0,045   | 1,227      | 0,045      | 0,00 | 0,00  | 1,294       | 0,098       | 0,0         | -0,019      |
| 8 (C) (CQC) | 2,695   | 0,087   | 1,468      | 0,042      | 0,00 | 0,00  | 2,835       | 0,194       | 1,179       | -0,027      |
| 8 (C) (CQC) | 4,289   | 0,124   | 1,594      | 0,037      | 0,01 | 0,00  | 4,494       | 0,290       | 2,590       | -0,051      |
| 8 (C) (CQC) | 5,834   | 0,150   | 1,545      | 0,026      | 0,01 | 0,00  | 6,097       | 0,370       | 4,132       | -0,086      |
| 8 (C) (CQC) | 7,237   | 0,163   | 1,403      | 0,013      | 0,00 | 0,00  | 7,544       | 0,432       | 5,630       | -0,126      |
| 8 (C) (CQC) | 8,497   | 0,158   | 1,260      | -0,005     | 0,00 | -0,00 | 8,837       | 0,487       | 6,992       | -0,160      |

| Cas/Etage   | UX [cm] | UY [cm] | dr UX [cm] | dr UY [cm] | d UX  | d UY  | Max UX [cm] | Max UY [cm] | Min UX [cm] | Min UY [cm] |
|-------------|---------|---------|------------|------------|-------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 9 (C) (CQC) | -1,226  | -0,067  | -1,226     | -0,067     | -0,00 | -0,00 | 0,0         | 0,010       | -1,290      | -0,116      |
| 9 (C) (CQC) | -2,694  | -0,152  | -1,468     | -0,086     | -0,00 | -0,00 | -1,177      | -0,024      | -2,831      | -0,257      |
| 9 (C) (CQC) | -4,290  | -0,248  | -1,596     | -0,096     | -0,01 | -0,00 | -2,590      | -0,059      | -4,493      | -0,412      |
| 9 (C) (CQC) | -5,836  | -0,344  | -1,546     | -0,097     | -0,01 | -0,00 | -4,132      | -0,107      | -6,099      | -0,562      |
| 9 (C) (CQC) | -7,240  | -0,436  | -1,404     | -0,092     | -0,00 | -0,00 | -5,630      | -0,146      | -7,547      | -0,706      |
| 9 (C) (CQC) | -8,501  | -0,515  | -1,261     | -0,078     | -0,00 | -0,00 | -6,994      | -0,197      | -8,842      | -0,844      |

## Ey

| Cas/Etage   | UX [cm] | UY [cm] | dr UX [cm] | dr UY [cm] | d UX  | d UY | Max UX [cm] | Max UY [cm] | Min UX [cm] | Min UY [cm] |
|-------------|---------|---------|------------|------------|-------|------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 10 (C) (CQ) | 0,030   | 1,085   | 0,030      | 1,085      | 0,00  | 0,00 | 0,192       | 1,129       | -0,000      | 0,0         |
| 10 (C) (CQ) | 0,021   | 2,374   | -0,009     | 1,288      | -0,00 | 0,00 | 0,068       | 2,403       | -0,003      | 1,031       |
| 10 (C) (CQ) | 0,019   | 3,793   | -0,002     | 1,420      | -0,00 | 0,00 | 0,065       | 3,820       | -0,001      | 2,341       |
| 10 (C) (CQ) | 0,019   | 5,162   | 0,000      | 1,369      | 0,00  | 0,00 | 0,059       | 5,190       | -0,001      | 3,761       |
| 10 (C) (CQ) | 0,017   | 6,383   | -0,002     | 1,221      | -0,00 | 0,00 | 0,056       | 6,397       | 0,001       | 5,126       |
| 10 (C) (CQ) | 0,014   | 7,451   | -0,003     | 1,068      | -0,00 | 0,00 | 0,031       | 7,464       | 0,008       | 6,351       |

| Cas/Etage   | UX [cm] | UY [cm] | dr UX [cm] | dr UY [cm] | d UX  | d UY  | Max UX [cm] | Max UY [cm] | Min UX [cm] | Min UY [cm] |
|-------------|---------|---------|------------|------------|-------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 11 (C) (CQ) | -0,029  | -1,107  | -0,029     | -1,107     | -0,00 | -0,00 | 0,002       | 0,0         | -0,173      | -1,152      |
| 11 (C) (CQ) | -0,021  | -2,439  | 0,008      | -1,332     | 0,00  | -0,00 | -0,002      | -1,052      | -0,071      | -2,468      |
| 11 (C) (CQ) | -0,020  | -3,917  | 0,001      | -1,478     | 0,00  | -0,00 | -0,004      | -2,404      | -0,075      | -3,944      |
| 11 (C) (CQ) | -0,022  | -5,357  | -0,002     | -1,440     | -0,00 | -0,00 | -0,007      | -3,883      | -0,071      | -5,383      |
| 11 (C) (CQ) | -0,020  | -6,657  | 0,001      | -1,300     | 0,00  | -0,00 | -0,010      | -5,317      | -0,068      | -6,671      |
| 11 (C) (CQ) | -0,018  | -7,808  | 0,002      | -1,151     | 0,00  | -0,00 | -0,013      | -6,621      | -0,040      | -7,821      |

## Effort tranchant :

## Ex

| Cas/Etage | G (x,y,z) [m]    | FX [T] | FY [T] | MZ [Tm] | FX sur les poteaux [T] | FX sur les voiles [T] | FY sur les poteaux [T] | FY sur les voiles [T] |
|-----------|------------------|--------|--------|---------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| 4/ 1      | ,846 4,041 3,673 | 262,97 | 0,51   | 123,21  | 38,06                  | 224,92                | 2,04                   | -1,53                 |
| 4/ 2      | ,850 4,075 6,915 | 246,51 | 0,46   | 118,52  | 71,10                  | 175,41                | 3,41                   | -2,95                 |
| 4/ 3      | ,850 4,053 9,976 | 220,21 | 0,39   | 101,98  | 73,04                  | 147,17                | 3,77                   | -3,38                 |
| 4/ 4      | 850 4,075 13,035 | 184,89 | 0,40   | 89,40   | 68,98                  | 115,92                | 3,93                   | -3,53                 |
| 4/ 5      | 850 4,075 16,095 | 139,99 | 0,46   | 70,87   | 59,96                  | 80,03                 | 5,24                   | -4,78                 |
| 4/ 6      | 850 4,050 19,197 | 80,78  | 0,47   | 44,36   | 51,67                  | 29,11                 | 0,22                   | 0,25                  |

## Ey

| Cas/Etage | G (x,y,z) [m]    | FX [T] | FY [T] | MZ [Tm] | FX sur les poteaux [T] | FX sur les voiles [T] | FY sur les poteaux [T] | FY sur les voiles [T] |
|-----------|------------------|--------|--------|---------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| 5/ 1      | ,846 4,041 3,673 | 0,51   | 276,64 | 5,33    | 1,91                   | -1,40                 | 51,88                  | 224,76                |
| 5/ 2      | ,850 4,075 6,915 | 0,48   | 259,91 | 4,62    | 1,24                   | -0,75                 | 87,40                  | 172,51                |
| 5/ 3      | ,850 4,053 9,976 | 0,41   | 232,60 | 4,04    | 1,37                   | -0,96                 | 88,78                  | 143,83                |
| 5/ 4      | 850 4,075 13,035 | 0,44   | 195,06 | 3,42    | 1,37                   | -0,93                 | 81,83                  | 113,23                |
| 5/ 5      | 850 4,075 16,095 | 0,50   | 147,10 | 2,57    | 1,28                   | -0,78                 | 68,34                  | 78,76                 |
| 5/ 6      | 850 4,050 19,197 | 0,46   | 83,75  | 1,66    | 0,17                   | 0,29                  | 59,94                  | 23,81                 |

## Période T

| Cas/Mode | Fréquence [Hz] | Période [sec] | Masses Cumulées UX [%] | Masses Cumulées UY [%] | Masses Cumulées UZ [%] | Masse Modale UX [%] | Masse Modale UY [%] | Masse Modale UZ [%] | Tot.mas UX [kg] | Tot.mas UY [kg] | Tot.mas UZ [kg] |
|----------|----------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 3/ 1     | 1,19           | 0,84          | 77,45                  | 0,00                   | 0,0                    | 77,45               | 0,00                | 0,0                 | 3254119,41      | 3254119,41      | 0,0             |
| 3/ 2     | 1,29           | 0,78          | 77,45                  | 77,56                  | 0,0                    | 0,00                | 77,56               | 0,0                 | 3254119,41      | 3254119,41      | 0,0             |
| 3/ 3     | 1,62           | 0,62          | 77,65                  | 77,56                  | 0,0                    | 0,19                | 0,00                | 0,0                 | 3254119,41      | 3254119,41      | 0,0             |
| 3/ 4     | 4,15           | 0,24          | 92,32                  | 77,56                  | 0,0                    | 14,68               | 0,00                | 0,0                 | 3254119,41      | 3254119,41      | 0,0             |
| 3/ 5     | 4,51           | 0,22          | 92,32                  | 92,28                  | 0,0                    | 0,00                | 14,72               | 0,0                 | 3254119,41      | 3254119,41      | 0,0             |
| 3/ 6     | 6,01           | 0,17          | 92,43                  | 92,28                  | 0,0                    | 0,11                | 0,00                | 0,0                 | 3254119,41      | 3254119,41      | 0,0             |
| 3/ 7     | 8,46           | 0,12          | 96,80                  | 92,28                  | 0,0                    | 4,37                | 0,00                | 0,0                 | 3254119,41      | 3254119,41      | 0,0             |
| 3/ 8     | 8,62           | 0,12          | 96,80                  | 96,47                  | 0,0                    | 0,00                | 4,19                | 0,0                 | 3254119,41      | 3254119,41      | 0,0             |
| 3/ 9     | 11,35          | 0,09          | 96,80                  | 97,38                  | 0,0                    | 0,00                | 0,91                | 0,0                 | 3254119,41      | 3254119,41      | 0,0             |
| 3/ 10    | 12,86          | 0,08          | 96,82                  | 97,38                  | 0,0                    | 0,02                | 0,00                | 0,0                 | 3254119,41      | 3254119,41      | 0,0             |
| 3/ 11    | 12,96          | 0,08          | 97,64                  | 97,46                  | 0,0                    | 0,81                | 0,08                | 0,0                 | 3254119,41      | 3254119,41      | 0,0             |
| 3/ 12    | 13,03          | 0,08          | 98,27                  | 97,56                  | 0,0                    | 0,64                | 0,10                | 0,0                 | 3254119,41      | 3254119,41      | 0,0             |
| 3/ 13    | 14,17          | 0,07          | 98,27                  | 97,59                  | 0,0                    | 0,00                | 0,03                | 0,0                 | 3254119,41      | 3254119,41      | 0,0             |
| 3/ 14    | 15,09          | 0,07          | 98,27                  | 97,63                  | 0,0                    | 0,00                | 0,04                | 0,0                 | 3254119,41      | 3254119,41      | 0,0             |
| 3/ 15    | 16,53          | 0,06          | 98,53                  | 97,63                  | 0,0                    | 0,26                | 0,00                | 0,0                 | 3254119,41      | 3254119,41      | 0,0             |
| 3/ 16    | 17,01          | 0,06          | 98,53                  | 97,99                  | 0,0                    | 0,00                | 0,36                | 0,0                 | 3254119,41      | 3254119,41      | 0,0             |
| 3/ 17    | 17,67          | 0,06          | 98,64                  | 97,99                  | 0,0                    | 0,11                | 0,01                | 0,0                 | 3254119,41      | 3254119,41      | 0,0             |
| 3/ 18    | 19,62          | 0,05          | 98,72                  | 98,00                  | 0,0                    | 0,08                | 0,00                | 0,0                 | 3254119,41      | 3254119,41      | 0,0             |
| 3/ 19    | 20,69          | 0,05          | 98,73                  | 98,00                  | 0,0                    | 0,01                | 0,00                | 0,0                 | 3254119,41      | 3254119,41      | 0,0             |
| 3/ 20    | 21,58          | 0,05          | 98,73                  | 98,47                  | 0,0                    | 0,00                | 0,48                | 0,0                 | 3254119,41      | 3254119,41      | 0,0             |