

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 08 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : conception et calcul des constructions

Présenté par : Abdelmelek Nabil

Kahalerras Yehya

Sayad Younes

**Thème : Recherche bibliographique sur la réhabilitation
des voiles et des poutres en béton armé**

Sous la direction de : Dr. Madi Rafik

Juin 2016

SOMMAIRE

Remerciements

Résumé (arabe)

Résumé (français)

Résumé (anglais)

Liste des figures

Liste des tableaux

CHAPITRE I LA REHABILITATION

I.1- Les différents types de réhabilitation	1
I.2- Différence entre réhabilitation, rénovation et restauration	1
I-2-1 Réhabilitation	1
I- 2-2 Rénovation	2
I-2-3 Restauration	3
I.2.4 Réparation	3
I-3- Différents types de réhabilitation	3
I-3-1 Réhabilitation légère	3
I-3-2 Réhabilitation moyenne	4
I-3-3 Réhabilitation lourde	4
I-3-4 Réhabilitation exceptionnelle	4

CHAPITRE II PATHOLOGIE DES BETONS

II.1- Introduction	5
II-2-Dégradation du béton et méthodologie d'un diagnostique.....	5
II-2-1 Introduction	6
II-3- Les différentes origines des dégradations	7
II-3-1 Les dégradations dues aux attaques chimiques	7
II-3-2 Les dégradations d'origine mécanique.....	10

II-3-3 Les dégradations d'origine physique.....	11
II-4- La méthodologie du diagnostic	12
II-4-1 préambules.....	12
II-4-2 Examen visuel ou morphologique.....	12
II-4-3 mesures in –situ	12
II-4-4 L'analyse technique des éléments recueillis	19
II-4-5 La formulation de recommandations directives	19

CHAPITRE III LA REHABILITATION DES POUTRES

III .1- Introduction.....	21
III-.2- Les causes de nécessité d'un renfort.....	21
III-3- Fissuration	22
III-4- Réparation des fissures	23
III-5-Rajout d'armatures complémentaires.....	24
III-5-1 Introduction	24
III-5-2 Mise en place des armatures complémentaires	24
III-5-3 Protection des armatures	24
III-5-4 Réfection des bétons	25
III-6- Béton Projeté	26
III-6-1 Introduction	26
III-6-2 projection d'un béton avec un ajout d'armatures	27
III-6-3 Description des deux méthodes	28
III-6-3-1 Projection par voie sèche	28
III-6-3-2 Projection par voie mouillée	28
III-7- Renforcement par platines métalliques	30
III-7-1 Introduction	30
III-7-2 Les matériaux utilisés	30
III-7-3 La mise en œuvre des plats collés	31
III -7-4 Avantages et inconvénients de Bandes d'acier collées	33

III-7-5 Conclusion	34
III-8- Augmentation des sections par un béton additif.....	34
III-8-1 Introduction	34
III-8-2 Adhérence entre les deux bétons	35
III-9- Adjonction de matériaux composites (Polymères Renforcés en Fibres).....	36
III-9-1 Introduction	36
III-9-2 Définitions et avantages	36
III-9-3 Propriétés du tissu et de la résine de collage	37
III -9-4 Procédures de la mise en œuvre	37
III-9-5 Conclusion	38
III-10- Réparation ou renforcement par précontrainte additionnelle.....	38
III-10-1 Introduction	38
III-10-2 Conception d'une précontrainte additionnelle	38
III-10-3 Les différents tracés de la précontrainte additionnelle	39
III -10-4 Avantages et inconvénients de la précontrainte additionnelle.....	40
III -10-5 Conclusion	41

CHAPITRE IV RÉHABILITATION DES VOILES

IV .1- Introduction	42
IV-.2- Techniques de réparation et de renforcement	42
IV -2-1 - Béton projeté.....	43
IV-2-2 -Adjonction d'armature d'aciens	44
IV-2-2-1 Mise en place des armatures complémentaires	44
IV -2-2-2 Protection des armatures.....	44
IV-2-3- Réfection des bétons	45
IV-2-4- Chemisage des sections de béton	45
IV-2-5- Injection.....	46
IV-2-5-1- Préparation des fissures	46
IV-2-5-2 -Système d'injection pour structure en béton armé.....	47

IV-2-6-Gainage	57
IV-3- Conclusion	58

CHAPITRE V. EXMPLE DE CALCUL

V.1.Présentation de l'ouvrage	59
V.2.modélisation.....	59
V.2.1.Objectifs de l'étude dynamique	63
V.2.2.Modélisation de la structure étudiée	63
V.3.Calcul de la force sismique par la méthode statique équivalente.....	64
V.3.1.Introduction	64
V.3.2. Principe de la méthode	64
V.3.3. Calcul de la force sismique totale.....	65
V.3.4.Les résultats obtenus par le ROBOT	68
V.3.5. Conclusion	77

Conclusion générale

Bibliographie

Remerciements

Tous d'abord, nous tiens à remercier Dieu clément et miséricordieux de notre avoir donné la force et le courage de mener à terme ce modeste travail.

Nous souhaitons également exprimer notre gratitude aux personnes qui nous ont aidés à effectuer ce travail notamment notre encadreur : DR, MADI RAFIK pour son suivi et ses conseils durant toute la période de l'évolution de ce travail.

Nous tenons aussi à remercier tous les étudiants de master génie civil ainsi que tous les autres camarades et notre cher ami MDJELDI OUSSAMA

Enfin, à notre gentille et sympathique promotion et à tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin, notamment à l'ensemble des enseignants du département de Génie Civil et Hydraulique de l'université de Guelma qui n'ont ménagé aucun effort pour la transmission du savoir nécessaire à une entrée pleine et entière dans la vie active et professionnelle.

ملخص

المنشآت الخرسانية تبقى في حالة جيدة أكثر من قرن من الاستغلال . تنقص مدة حياتها بفعل عدة عوامل من بينها أخطاء التصميم , الحمولة الزائدة أو ضرر المواد.

و يتطلب العديد من الخطوات ليكون استخدامها جيد , وأساليب إعادة التأهيل تختلف تبعا لطبيعة المشكلة التي يمكن أن تواجه هذه المنشآت و هناك نسبة كبيرة من الأعمال من اجل القيام بالتعزيز أو الإصلاح لضمان سلامة المستخدمين إلى حد نهاية صلاحيتها .

و يعتبر التشخيص الأولي عنصر أساسي . لاختيار إستراتيجية إصلاح كافية و السماح أكثر من تخفيض نسبة التكاليف . التشخيص هو السعي للحصول على المرض على أساس الأعراض . و يتناول هذا العمل بحث حول تأهيل الروافد و جدران الخرسانة المسلحة مع العديد من تقنيات الإصلاح , و هاته الأخيرة تحتوي على عدة ايجابيات كما لها عيوب لكن إعادة التأهيل هو حل مهم من اجل المحافظة على استمرارية البنيات .

إن كل عملية تعزيز أو إصلاح تتطلب اهتماما خاصا و يتطلب استخدام أساليب و أدوات و تقنيات تتكيف مع الوضع الخاص للمشاكل الموجودة في البنية. و من بين طرق إعادة التأهيل الهيكلي تقنية التغليف بالخرسانة المسلحة و تقنية استعمال المواد المركبة , و أظهرت النتائج المتحصل عليها أن تأهيل الروافد و جدران الخرسانة المسلحة , يزيد بشكل كبير من القدرة على المقاومة و تخفيض نسبة التشوهات و كذلك تخفيض الدور و الانتقال.

Résumé

Les ouvrages en béton armé demeurent en excellent état après plus d'un siècle d'exploitation, leur durée de vie diminue suite à une pathologie structurelle issue des erreurs de conception, des défauts de résistance dus à un chargement excessif ou des dégradations de matériaux. Plusieurs étapes sont nécessaires pour avoir un bon usage de celle-ci, les méthodes de réhabilitation et de renforcement se diffèrent selon la nature du problème que peut rencontrer la structure. Un pourcentage important des ouvrages nécessite un renforcement ou une réparation pour assurer la sécurité des usagers avant d'arriver à leur limite de vie utile.

Un diagnostic préalable de l'ouvrage constitue la base nécessaire pour le choix d'une stratégie de réparation adéquate et pour permettre une évaluation plus précise des coûts. Le diagnostic ou autrement dit, la recherche d'une pathologie à partir des symptômes.

Le présent travail traite d'une part une recherche bibliographique sur la réhabilitation des voiles et des poutres en béton armé, avec plusieurs techniques de réparation et cette dernière consistent des avantages et des inconvénients mais la réhabilitation est la solution évidente pour le béton armé endommagé.

Chaque opération de renforcement ou de réparation requiert une réflexion particulière et nécessite l'utilisation des méthodes, d'instruments et de techniques adaptées à la situation aux problèmes spécifiques de chacune des constructions.

Parmi les méthodes de réhabilitation des structures on peut citer le chemisage en béton et le confinement des éléments par matériaux composites.

Les résultats obtenus, ont montré que le renforcement des poutres et des voiles par le chemisage, augmente considérablement la capacité en résistance et en déformation et diminue la période et les déplacements.

Abstract

The reinforced concrete structures remain in excellent condition after more than a century of operation, their life expectancy decreases following a structural pathology from design errors, due to overloading or degradation of materials resistance defects. Several steps are required to have a good use of it, the rehabilitation and strengthening methods differ depending on the nature of the problem that can meet the structure. A percentage important works requires a strengthening or repairs to ensure the safety of users before reaching their limit of life.

A preliminary diagnosis of the work constitutes the necessary basis for the choice of a proper repair strategy and to allow evaluation more precise costs. The diagnosis or in other words, looking for a pathology from the symptoms.

The present work deals with on the one hand a bibliographic research on the rehabilitation of the sails and beams in reinforced concrete, with several repair techniques and this latest consist advantages and disadvantages but rehabilitation is the obvious solution for damaged reinforced concrete.

Each building or repair operation requires a particular reflection and requires the use of the methods, instruments, and adapted techniques has the specific situation in the problems of each of the construction.

Rehabilitation of structures methods include concrete jacketing and containment of the elements by composite materials.

Results showed that the reinforcement of beams and the sails by jacketing, greatly increases the strength and deformation capacity and decreases period and displacement .

Liste des figures

Figure		Page
Figure II.1 :	Le scléromètre.....	13
Figure II.2 :	Appareil d'auscultation par ultrasons.....	14
Figure II.3 :	Le pachomètre.....	15
Figure II.4 :	Le profomè.....	15
Figure II.5 :	Le corrosimètre.....	16
Figure II.6 :	La carotteuse.....	17
Figure II.7 :	Le fissuromètre.....	17
Figure II.8 :	L'extensomètre.....	18
Figure II.9 :	L'hygromètre.....	18
Figure III.1 :	Un renforcement par adjonction d'armatures d'acier.....	25
Figure III-2 :	Renforcement d'une poutre par adjonction d'armatures.....	26
Figure III-3 :	Principe de la voie sèche.....	28
Figure III-4 :	Principe de la voie mouillée.....	29
Figure III-5 :	Renfort par plaque d'acier [8].....	31
Figure III- 6 :	Application de plats métalliques selon le procédé L'Hermite.....	32
Figure III-7 :	Renforcement d'une poutre par chemisage.....	34
Figure III-8 :	Renforcement d'une poutre avec chemisage en béton armé.....	35
Figure III-9 :	Renfort de poutres par enrobage [3].....	35
Figure III-10 :	Renforcement par le collage de plaques en composites.....	37
Figure III-11 :	Tracé rectiligne des câbles de précontraint.....	40
Figure III-12 :	Tracé polygonal des câbles de précontraint.....	40
Figure IV.1:	Renforcement au moyen de béton projeté.....	43
FigureIV.2 :	Préparation des fissure.....	46
Figure IV.3 :	Etanchéité des joints.....	49
Figure IV.4 :	Etanchéité en surface.....	50
Figure IV.5 :	Imperméabilisation des fissures.....	50
Figure IV.6 :	Réparation des fissures et cavités structurelles.....	51

Figure IV.7 :	Pompe d'injection type EL-1.....	54
Figure IV.8 :	Pompe d'injection type PN-2C	54
Figure IV.9 :	Les injecteurs mécaniques	55
Figure IV.10 :	Injecteur de surface.....	55
Figure IV.11 :	Gainage des voiles.....	57
Figure IV.12 :	Gainage des voiles	57
Figure V.1 :	Façade principale de la structure	59
Figure V.2 :	Structure modélisé par Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2010.....	64

Liste des tableaux

Tableau		page
Tableau III.1 :	Avantages des deux méthodes de béton Projeté.....	29
Tableau III.2 :	Inconvénients des deux méthodes de béton projeté.....	30
Tableau III.3 :	Avantages et inconvénients de Bandes d'acier collées.....	33
Tableau III.4 :	Avantages et inconvénients de la précontrainte additionnelle....	40
Tableau IV.1 :	Avantages des paramètres des matériaux d'injection.....	47
Tableau V.1 :	Masse de structure	69
Tableau V.2 :	Déplacement de structure	69
Tableau V.3 :	Les périodes et la participation des masses	70
Tableau V.4 :	Masse de structure	71
Tableau V.5 :	Déplacement de structure	71
Tableau V.6 :	Les périodes et la participation des masses.....	73
Tableau V.7 :	Masse de structure.....	73
Tableau V.8 :	Déplacement de structure.....	74
Tableau V.9 :	Les périodes et la participation des masses.....	75
Tableau V.10 :	Comparaison entre les masses	76
Tableau V.11 :	Comparaison entre les déplacements.....	76
Tableau V.12 :	Comparaison entre les périodes	77
Tableau V.13 :	Comparaison globale.....	77

Chapitre I: La réhabilitation

I. La réhabilitation

I.1- Les différents types de réhabilitation

Au cours des dernières années, d'importantes études ont été entreprises dans le monde des quartiers anciens. Elles ont conduit à la création de secteurs sauvegardés, à la protection des centres villes et à la réhabilitation du patrimoine bâti qui est devenu un marché important de la construction.

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.

I.2- Différence entre réhabilitation, rénovation et restauration

▪ I.2.1 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.



Photo 1. réhabilitation d'une construction ancienne

▪ I.2.2Rénovation

Rénovation : rebâtir à neuf.

Vérifiez que les règles d'urbanisme l'autorisent. En cas de voisinage proche, un état des lieux préalable par huissier permettra d'évaluer votre part de responsabilité dans d'éventuels dommages constatés postérieurement. [Net.1]

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. [Net.2]



photo 2. une construction ancienne avant la rénovation

▪ I.2.3 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. [Net.1]

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

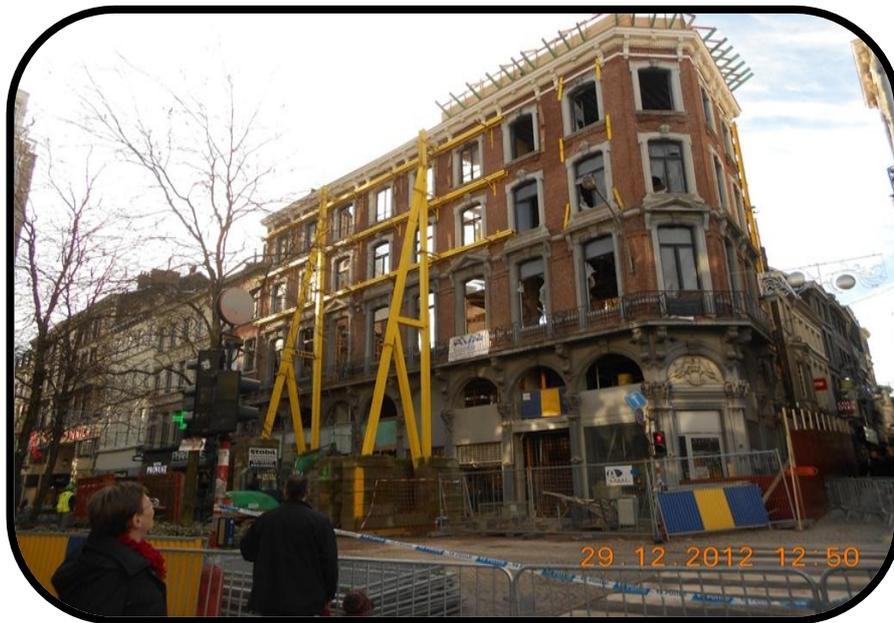


Photo 3. Restauration d'une construction ancienne avec préservation de la façade principale (préservation du patrimoine ancien) Bruxelles.

I.2.4 Réparation

La réparation d'une construction est une opération qui consiste à lui restituer par des travaux appropriés, un niveau de service perdu.

I.3- Différents types de réhabilitation

On distingue plusieurs niveaux de réhabilitation :

- **I.3.1 Réhabilitation légère** : sans travaux sur les parties communes.

C'est une intervention sur des habitations assez bien conservées en vue d'en améliorer ou de doter cette dernière de nouveaux équipements, comme l'installation des équipements sanitaire y compris les canalisations, d'électricité, la remise en état des peintures accompagnants, elle ne concerne pas les interventions sur les parties communes de l'habitation ou l'installation du

chauffage centrale. Afin d'éviter le déplacement éventuel des habitants il sera impératif de veiller au bon déroulement du chantier par l'application de disposition particulière dans l'organisation de ce dernier.

- **I.3.2 Réhabilitation moyenne** : des travaux plus complets sur les parties privatives.

C'est une opération s'appliquant sur des habitations dont la structure porteuse ne présente pas de défaillances particulières. Elle vise à la doter de nouveaux équipements et/ou installations s'accompagnant de travaux, comme la réfection des peintures et des systèmes électriques, l'installation de système de climatisation et de chauffage, qui généralement n'induisent pas de grand remaniement à l'intérieur du logement par modification de cloisonnement contrairement à la réhabilitation légère, elle peut comprendre une intervention induisant de légers travaux sur les parties communes de l'habitation tels que la remise à neuf des peintures de la cage d'escalier et le ravalement de la façade sans reprise de toiture.

- **I.3.3 Réhabilitation lourde** : redistribution des pièces, réfection des toitures, travaux touchant les gros œuvres.

C'est une opération qui en plus des travaux cités précédemment comprend une redistribution des logements par étage et/ou des pièces dans le logement ; l'intervention sur les parties communes de l'habitation et plus complète elle comporte en plus du ravalement des façades réfection des toitures. Ce sont des travaux qui touchent le gros œuvre induisant des reprises de maçonnerie, de charpente et parfois de plancher.

- **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 leur remplacement 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.

Chapitre II:

Pathologie du béton

II. Pathologie de béton

II.1 Introduction

Le béton est un matériau employé depuis un grand essor notamment grâce au ciment de Portland et à Louis Vicat. Il aura fallu attendre la fin de ce siècle pour voir apparaître les premières constructions en béton armé. Depuis il est de matériau composite incontournable. Les éléments en béton armé sont très présents dans notre vie.

Que ce soit dans un pont pour traverser une route, dans des activités, ou autres ouvrages en béton armé, bien précis. Ces ouvrages sont nécessaires au bon fonctionnement de notre société, car ce sont des éléments facilitant ou améliorant la vie des usagers. Pour leur permettre de remplir leur rôle, il est nécessaire de s'assurer de leur bonne santé et dans le cas contraire les réparer.

C'est dans cette optique que s'inscrit le diagnostic d'un ouvrage. À partir du moment où une pathologie est apparue, même si cela ne remet pas en cause la stabilité de l'ouvrage de diagnostiquer d'une part d'où vient le problème, mais à quel degré il affecte l'édifice. Dans un second temps, il est nécessaire de supprimer le problème à la source et de réparer l'ouvrage. Le diagnostic est un moment clé lorsqu'il est mal diagnostiqué, les réparations préconisées ne correspondront pas réellement à ce qui est nécessaire et l'ouvrage sera toujours soumis aux mêmes attaques.

Pour effectuer un diagnostic, différents moyens d'investigation sont disponibles. On a d'une part les méthodes destructives, pour les structures pouvant être localement dégradées et les méthodes non destructives pour les ouvrages nécessitant d'être préservés tels que les bâtiments et monuments historiques.

Une fois les causes ainsi que les pathologies diagnostiquées, il est nécessaire de prévoir des travaux de réhabilitation afin de redonner à la structure ses caractéristiques physiques et mécaniques initiales. Afin de retarder ou de limiter de nouvelles pathologies similaires, il est possible de protéger la structure. Il existe un grand nombre de protections, elles sont à choisir selon les différentes pathologies, mais aussi sur la durée de pérennisation espérée. Elles vont de la protection par revêtement, aux traitements électrochimiques.

Ces expertises se développent de plus en plus notamment du fait d'une volonté des pouvoirs politiques de s'inscrire dans un schéma de développement durable, à savoir, pérenniser. Il est aussi possible de ne pas prévoir des travaux, mais seulement s'intéresser à l'évolution des pathologies. C'est le cas par exemple pour des fissures, il peut être utile de vérifier si son ouverture est continue dans le temps, dans ce cas ou bien si l'ouverture de la

fissure dépend de l'évolution de la température, auquel cas il est possible de laisser l'ouvrage en l'état sans craindre une dégradation de l'ouvrage. Le présent document a pour objet d'exposer les principaux procédés de réparation et de renforcement en indiquant pour chaque cas particulier ce qu'il convient de faire et ce qu'il faut éviter de faire. S'il s'agit de réparation, il suppose fondamentalement que les causes des désordres ont été trouvées et expliquées. Cette opération est de ressort du maître d'ouvrage, de maître d'œuvre ou de leurs conseillers. Il conviendra à ce niveau de distinguer les fissures et de désordres non préjudiciables de ceux qui sont dangereux donc inacceptables pour la durabilité de l'ouvrage.

Afin de bien comprendre le 'comment' et le 'pourquoi' des différentes solutions techniques de réparation et de renforcement il est utile de rappeler les causes des désordres que l'on peut rencontrer.

- Causes naturelles résultant de l'ambiance et de l'environnement (température, humidité, vent, agressivité du milieu etc....).
- Causes structurelles résultant d'une anomalie d'utilisation ou de fonctionnement mécanique de l'ouvrage (effet de encastrement, de continuité, de fluage et retrait avec redistribution des moments...).
- Causes accidentelles (feu, choc, séisme, explosion...).
- vieillissement normal dû à l'usage, à l'usure...

La plupart des techniques de réparation s'appliquent également aux travaux de renforcement résultant d'un changement de destination ou de condition d'utilisation, comme de la nécessité d'augmenter la capacité résistante de l'ouvrage vis-à-vis des sollicitations accidentelles telles que le séisme.

II.2 Dégradation du béton et méthodologie d'un diagnostic

II.2.1 Introduction

Avant, pendant et après la prise du béton, de multiples phénomènes interviennent et les conditions de leur déroulement influencent directement la durabilité du béton.

Le système chimique qui caractérise le béton se traduit par un milieu fortement basique dont le pH varie de 12.5 à 13.5. Ce système est en déséquilibre avec le milieu environnant dont le pH est généralement très inférieur. Ce déséquilibre favorise de multiples formes d'agressions chimiques. L'eau est le premier vecteur d'agression : pluie, neige, eaux souterraines, eau de mer. Cette eau chargée de substances chimiques agressives (chlorures,

sulfates, dioxyde de carbone...) pénètre dans le béton par les réseaux de fins capillaires qui le parcourent dans sa masse, ou par des fissures.

Il existe donc un paramètre qui joue de façon majeure sur la durabilité : il s'agit de la Porosité capillaire du béton durci. Plus le béton est poreux, plus il est exposé aux agressions extérieures, synonymes d'altération et donc d'atteinte à la durabilité. Mais le béton possède aussi des mécanismes de défense, par ses couches protectrices, s'il est suffisamment dosé et de forte compacité, les risques d'altération sont relativement faibles.

Il y a plusieurs origines des dégradations :

- Dégradation d'origine chimique.
- Dégradation d'origine mécanique.
- Dégradation d'origine physique.

II-3 Les différentes origines des dégradations

II-3-1 Les dégradations dues aux attaques chimiques

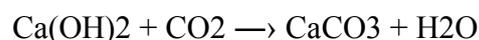
La dégradation peut provenir d'une attaque chimique par un agent se trouvant :

- sous forme de gaz d'origine naturelle ou industrielle.
- sous forme liquide.
- sous forme solide du sol ou résidu industriel.

Elle peut aussi être d'origine interne :

a) carbonatation du béton

Lors de la prise du béton, il se produit une réaction chimique complexe qui se traduit notamment par la formation d'hydroxyde de chaux Ca(OH)_2 . Cette chaux libérée est présente dans toute la masse du béton. De ce fait, le pH initial du béton est de l'ordre de 12.5 ; dans le temps, le béton perd environ 50% de l'eau de gâchage qu'il contenait lors de la prise. Cette perte d'eau crée un réseau capillaire à l'intérieur du béton qui favorise la pénétration du dioxyde de carbone CO_2 présent dans l'air et alimente une réaction chimique appelée : carbonatation



Cette réaction est irréversible précipite l'hydroxyde de calcium sous forme de sel insoluble. Le béton se carbonate et son pH diminue pour atteindre une valeur de 9.

Pour protéger le béton contre la carbonatation il faut le confectionner à faible rapport E/C pour réduire la porosité du béton, et assurer un enrobage suffisant (qui peut être complété par enduit) [13].

b) corrosion des armatures

La corrosion des aciers d'armatures dans le béton est issue d'un processus chimique. Pour que l'acier dans le béton se corrode (formation de rouille), il se trouve dans un milieu favorable :

- un électrolyte avec une forte conductibilité (ionique).
- une zone riche en oxygène.

La vitesse de corrosion des barres d'armatures est plus grande en présence de chlorures (l'eau de mer, sel,...) [5].

Les chlorures ont deux effets dans les mécanismes de corrosion :

- ils diminuent la résistivité de l'électrolyte (le couvert de béton), ce qui facilite le transport des ions d'un site à l'autre.
- ils permettent l'amorçage plus rapide de la corrosion en dé passivant la couche superficielle (dissolution de la couche passive ou migration des chlorures à travers le film d'oxyde).

c) Attaque par les sulfates

Les sulfates sont généralement retrouvés dans :

- les eaux de mer.
- les eaux souterraines.
- les sols.
- les milieux agricoles.
- les eaux usées (domestiques et industrielles).
- Certaines industries.

Les produits les plus sensibles à l'attaque des sulfates sont : l'aluminate et la portlandite il y aura formation de sels expansifs d'ettringite (jusqu'à 400% de pouvoir d'expansion).

Les facteurs influençant l'attaque par le sulfate [5] :

- la teneur en C3A et C4AF (qui peut réagir avec les sulfates).
- la teneur en Ca (OH) 2.
- la nature du ciment.

- la perméabilité du béton.
- la concentration des sulfates.
- la température de l'eau : la chaleur accélère la cinétique des réactions
- la cure.
- la fluctuation de l'attaque.
- la présence de l'eau (qui favorise la formation de solution agressive).
- l'abrasion.

Les moyens préventifs :

- utiliser des ciments avec faible teneur en C3A.
- utiliser un fort dosage en ciment.
- Utiliser la fumée de silice.
- faible rapport E/C.

d) Attaque par des acides

Les acides ($\text{pH} < 7$) attaquant le béton par dissolution de la portlandite en premier et la C-S-H :

- Il y a possibilité d'attaque si $\text{pH} < 6.5$
- Attaque sévère si $\text{pH} < 5.5$.
- Attaque très sévère si $\text{pH} < 4.5$

Il y a deux types des acides agressifs :

- Inorganiques : carbonique, chlorhydrique, fluorhydrique, nitrique, phosphorique, sulfurique
- Organiques : acétique, citrique, formique, humique, lactique, tannique.



Les moyens préventifs contre ces attaques sont :

- Diminuer la teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ du béton par l'utilisation de :
 - Un ciment aux laitiers.
 - Un ciment alumineux ou pouzzolanique.
- Diminuer la perméabilité par :
 - Un mûrissement approprié.
 - La diminution du rapport E/C.
 - L'utilisation de la fumée de silice.

e) Alkali-réaction

L'alkali-réaction est une dégradation interne du béton. L'alkali-réaction est une réaction très lente allant d'un an jusqu'à dix ans (1 à 10 ans).

Il y a trois conditions simultanées pour que l'alkali-réaction apparaisse :

- la présence d'un granulat potentiellement réactif.
- une concentration élevée des alcalins dans le ciment.
- une ambiance présentant une humidité relative $> 80 \%$.
- Donc pour avoir un béton durable il faut que les conditions suivantes soient respectées :
 - un béton le moins perméable possible (une bonne formulation du béton et un faible rapport : E/C).
 - un ciment à faible teneur en C3A et alcalins.
 - limiter ou fixer la portlandite : utiliser la fumée de silice ou des ciments CLK ou CHF (résistent mieux aux milieux acides surtout Si le pH est < 4.5).

II-3-2 Les dégradations d'origine mécanique

a) Erreurs de conception et d'exploitation

Les différentes erreurs de conception peuvent être résumées comme suit :

- Un tassement.
- Une poussée à vide dans les escaliers.
- Une surcharge que la structure ne peut subir.
- Un manque de joints.
- Un manque d'armatures.

b) Défauts d'exécution

Le défaut d'exécution sont dus généralement à :

- Une mauvaise position des armatures d'aciers.
- Une mauvaise mise en œuvre du béton.
- Un mauvais coffrage.
- Une mauvaise formulation du béton.
- Un recouvrement insuffisant des armatures d'aciers.

c) Les chocs

Le phénomène de choc peut provenir de :

- Les chocs des véhicules sur ponts.
- Les chocs de bateaux sur piles.
- La mauvaise manutention d'éléments préfabriqués.

d) L'abrasion

Le phénomène d'abrasion est due généralement à :

- Une circulation intense de l'eau (barrages),
- Les charges mécaniques répétées (chaussées, dallage industriel),
- L'action du courant d'eau sur corps immergés ou flottants (piles de ponts, plate
- Forme, etc.).

e) Les fissures

Les différents types de fissures sont :

- Les fissures mécaniques (due à la compression, à la traction, à la flexion ou au Cisaillement).
- Les fissures dues au retrait (un retrait plastique, un retrait thermique, etc.).
- Les fissures dues au gel.
- Les fissures dues à la corrosion [13].

II-3-3 Les dégradations d'origine physique

a) Séisme

Se référer aux codes de calcul dans les zones sismique, limiter le degré d'endommagement par des mesures constructives.

b) Incendie

Le béton a une résistance au feu convenable en cas d'incendie :

- En 1h la température est de 350°C à une profondeur de 3 cm vis-à-vis de la couche superficielle du béton, et à une profondeur de 7.5 cm elle est de 100°C.
- A 570°C : fissuration des granulats quartzeux.
- A 800°C décarbonatation du CaCO₃.
- La vaporisation brutale de l'eau implique un éclatement du béton.

II-4 La méthodologie du diagnostic

II- 4-1 préambules

Le diagnostic est le résultat des investigations effectuées pour se prononcer sur l'état d'une construction et ses conséquences. Il est devenu habituel de désigner par la même appellation de "diagnostic " la réalisation des examens nécessaires à la formulation des conclusions.

Le déroulement du diagnostic comporte quatre volets :

- Un examen visuel ou morphologique
 - Une estimation quantitative de la dégradation.
 - Une estimation qualitative de la dégradation.
 - La détermination des problèmes de structure.
- Des mesures in- situ (Appareillages de détection).
- L'analyse technique des mesures et essais, effectuée en laboratoire des éléments recueillis.
- La formulation des conclusions et recommandations.

Il faut cependant souligner que dans le cas général, un diagnostic reste une approximation plus ou moins précise où il est rarement possible d'obtenir un recueil exhaustif des données.

II-4-2 Examen visuel ou morphologique

L'examen visuel est la forme d'investigation la plus simple et la plus économique. Dans un premier temps, il s'agit d'identifier la constitution des places permettant par ailleurs de définir l'éventuel programme d'investigation complémentaire à envisager pour affiner le diagnostic. Quel que soit leur origine, ces informations doivent être utilisées avec prudence, et surtout pas comme des données de base du diagnostic ; elles sont plutôt à considérer comme des éléments de recoupement des constats faits ultérieurement sur place ou comme des sources d'indication sur la manière d'orienter le diagnostic. Ces informations sont obtenues par :

- une prise de photos.
- une identification et localisation des zones fortement sollicitées.
- une observation des zones critiques telles : joints, appuis, etc...
- la localisation des fissures.

II-4-3 mesures in –situ

La détermination des caractéristiques : un niveau d'existence, de position et de la section des armatures dans le béton, la dureté et la résistance du béton, le degré de corrosion

et d'oxydation des armatures. À l'issue d'un tour d'horizon général, on peut déjà conclure sur [5] :

- L'homogénéité de l'état des lieux ou au contraire sur l'existence de plusieurs cas de figure bien distincts.
- La nature et la localisation des manifestations.
- Des désordres vétustes, la non-conformité réglementaire, des anomalies de fonctionnement.
- La nature et la localisation des sondages, une auscultation ou des prélèvements à effectuer.
- les points dont l'état apparent est suffisamment explicite pour pouvoir se prononcer d'emblée, sans avoir à envisager d'autres investigations
- L'ouverture des fissures dans le béton.

Les différentes mesures in-situ sont :

a) Le scléromètre

Cet instrument relativement simple à l'origine, permet d'estimer la résistance du béton, mesure la dureté superficielle du béton par rebondissement d'une masselotte.

Il est nécessaire de procéder à une quinzaine d'essais sur chaque zone testée pour déduire une valeur moyenne représentative.

Le scléromètre est un instrument particulièrement performant pour préciser l'homogénéité de la résistance du béton aux différents points d'une structure, mais l'information sur le béton reste imprécise par cette méthode. (**Fig. II.1**)



Figure II.1 : *le scléromètre*

b) L'auscultation par ultrasons

Cette méthode permet d'estimer la résistance d'un béton ou de détecter la présence de microfissures internes. C'est une corrélation entre la résistance, la vitesse du son VL, la compression Rc, et le module d'élasticité. (**Fig. II.2**)



Figure II.2 : appareil d'auscultation par ultrasons

c) Les détecteurs d'armatures

Ils fonctionnent par effets magnétiques ou électromagnétiques mais la profondeur d'investigation reste limitée à une dizaine de centimètres.

Il y a trois types de détecteurs :

- **Le pachomètre**

Sert à déterminer la position des armatures dans le béton (**fig. II.3**)



Figure II.3 : le pachomètre

- Le profomètre

Utilisé pour la détermination précise de la position et du diamètre des armatures dans le béton. (**Fig. II.4**)



Figure II.4 : le profomètre

- Le corrosimètre:

Employé dans le but de détecter la corrosion des armatures, d'ouvrages en béton avant l'apparition des dommages visibles, en mesurant le potentiel de surface du béton. (**Fig. II.5**)



Figure II.5 : le corrosimètre

d) La radiographie

Ce procédé permet de réaliser des clichés radiographiques du béton, son coût est relativement élevé compte tenu du matériel nécessaire (source radioactive) et surtout des mesures de protection à mettre en place (évacuation du site, périmètre de sécurité, autorisation administratives...), utilisables pour des éléments dont l'épaisseur ne dépasse pas 60 à 80 cm. La gammagraphie fournit des informations multiples et très précises sur les armatures et les défauts internes du béton :

L'analyse de la radiographie obtenue à travers les rayons traversant le béton est interprétée comme suit :

- trace claire => corps plus dense que le béton.
- trace noire => présence de vide.

e) Carottage :

Le prélèvement de carotte a comme but de faire des analyses en laboratoire. Ces examens peuvent être demandés en vue de : **(fig. II.6)**

- examen pétrographique pour identification des agrégats, détériorations des agrégats, homogénéité du béton, profondeur de carbonations, répartition des fissures.
- analyse chimique
- Essais physico – mécanique : densité, résistance à la compression, module d'élasticité.



Figure II.6 : la Carotteuse

f) Détecteur des fissures

-Fissuromètre

Suivi de l'évolution d'une fissure sur un plan ou dans un angle. (**Fig II.7**)



Figure II.7 : le fissuromètre

-Extensomètre

Mesure de la déformation linéaire d'un élément de structure. (**Fig. II.8**)



Figure II.8 : l'extensomètre

c) Hygromètre

Pour l'évaluation de l'humidité, en surface et en profondeur, de parois de construction .cet humidimètre permet de mesurer le taux d'humidité en profondeur de façon non destructive

Par une méthode basée sur la radiofréquence. (Fig. II.9)



Figure II.9 : l'hygromètre

II-4-4 L'analyse technique des éléments recueillis

L'analyse des informations et les données collectées, doit permettre d'interpréter les constats effectués en vue de formuler des conclusions. Pour faciliter ce travail, on peut reporter les données de manière à modéliser les phénomènes observés et les constats effectués [13].

Les modes d'analyse font appel à plusieurs types d'opérations :

a) Le calcul

Il permet notamment de déterminer la capacité portante des structures ainsi que les zones critiques au niveau des éléments structuraux.

b) Le recoupement

C'est la recherche de la cohérence ou au contraire de l'incompatibilité entre les données ou Les informations portant sur un même aspect, mais provenant de sources différentes. Cela Permet de consolider la validité de certaines hypothèses et d'en écarter d'autres.

c) La comparaison

Il s'agit de repérer les ressemblances et les écarts permettant souvent, d'extrapoler ou d'exclure des résultats de données ou d'informations. Cela permet de hiérarchiser les différentes constatations.

d) L'évaluation

C'est une estimation quantitative ou qualitative elle comporte une part d'approximations par rapport à un calcul scientifique. L'évaluation peut par ailleurs s'appuyer sur des comparaisons, des recoupements ou des calculs.

On peut conduire une opération d'évaluation par :

- Un examen du dossier d'ouvrage : des plans d'exécution et les notes de calcul.
- Un état actuel de l'ouvrage : une exploitation des données et des informations pris en compte antérieurement.

e) La vérification

L'objectif est de détecter les éventuels écarts par rapport aux exigences des référentiels Techniques et réglementaires pris en compte.

II-4-5 La formulation de recommandations directives

Les conclusions correspondent à des avis argumentés, fondés sur les constats et les analyses effectuées. Il s'agit là d'une véritable prise de position du diagnostic sur l'état de la

structure ou des éléments structuraux, accompagnée le cas échéant des marges d'incertitudes n'ayant pu être levées.

Les recommandations se déduisent des conclusions en les replaçant dans la perspective de La commande du diagnostic [13].

Les recommandations doivent donc tenir compte des enjeux économiques et de la faisabilité technique des travaux préconisés en matière de :

- réparation, renforcement des structures.
- traitement des causes et des effets de désordres constatés lors du diagnostic.

Conclusion :

Dans cette partie nous avons vu l'importance du diagnostic dans l'opération de réhabilitation d'un élément ainsi que des différents moyens disponibles pour le réaliser. C'est l'étape clé qui permet de déterminer les types de pathologies dont souffre l'élément ainsi que leur ampleur. Cela permet aussi de faire des prévisions quant à l'évolution de ces troubles. Mais c'est avant toute chose, l'étape qui va permettre de mettre en œuvre la méthode de réparation la plus adaptée. Cela permet aussi d'évaluer la cause de ces problèmes. Cette cause peut être tout simplement le vieillissement naturel de la structure, mais cela peut aussi être à cause de l'environnement alentours. Afin de rendre les réparations pérennes, il est nécessaire de mettre en œuvre des travaux de réparation et de protection adaptées, mais aussi de travailler sur l'origine du problème afin d'éviter l'apparition rapide de nouvelles pathologies semblables.

Chapitre III:

La réhabilitation des poutres

III. La réhabilitation des poutres

III.1 Introduction :

Avant de s'engager dans une réparation ou un renforcement de structures ou d'élément de structure, présentant des dégradations de béton ou d'armatures, il est indispensable de procéder à un diagnostic déjà cité précédemment et à la détermination des causes. Le choix de la méthode de réparation ou de renforcement, et des matériaux à mettre en œuvre est défini en fonction de la nature et de l'importance des désordres constatés, et en tenant compte des critères économiques de matériaux de construction et des techniques choisies. Dans la grande majorité des cas, les structures en béton présentent une excellente durabilité, elles méritent donc en général d'être conservées, même si la destination ou les exigences fonctionnelles des ouvrages sont appelées à évoluer avec le temps. De plus, et bien qu'elles soient souvent massives, les constructions en béton présentent des aptitudes indéniables à la transformation et les solutions de renforcement sont nombreuses. Le renforcement des structures, liées à un état futur projeté, sont appelées à supporter des sollicitations plus élevées que celles prévues à l'origine. Les procédés utilisables pour le renforcement sont également applicables aux travaux de réparation ou de consolidation.

III.2 Les causes de nécessité d'un renfort

Les causes de désordre affectant les structures sont nombreuses, dont les principales sont :

- **Dégradation des matériaux**

Les propriétés physiques et, plus particulièrement, le comportement mécanique du béton et des aciers sont susceptibles de se dégrader en fonction des conditions d'environnement définies par la localisation géographique de l'ouvrage. Les principales causes de vieillissement sont liées aux phénomènes suivants :

- érosion, abrasion, chocs
- action des cycles de gel-dégel
- altération physico-chimique du béton
- retrait du béton
- corrosion des armatures métalliques

- **Erreurs de conception ou d'exécution**

Les erreurs d'exécution qui sont susceptibles de justifier une intervention au niveau de l'ouvrage portent sur :

- les imperfections de coffrage.
- les défauts de bétonnage.

- les incohérences du ferrailage ou sur les conditions non satisfaisantes de décoffrage.
- mauvais matériaux.
- un mauvais dimensionnement des sections et d'une disposition non satisfaisante des armatures qui se traduisent par des localisations de fissures ou des ruptures non acceptables.
 - **Accroissement des charges qui sollicitent la structure :**
 - changement d'usage de la structure (ex : bâtiment d'habitation réhabilité en centre commercial).
 - augmentation du niveau d'activité dans la structure (ex : anciens ponts soumis au trafic actuel).
 - installation de machinerie lourde dans les bâtiments industriels
 - **Rénovation des structures anciennes :**
 - prise en compte de renforts par des sollicitations non considérées au moment du projet ou de la construction (vibration, actions sismiques et autres).
 - connaissance des insuffisances de la méthode de calcul utilisée lors de la conception, ainsi que des limitations montrées par des structures calculées durant une époque ou période.
 - vieillissement des matériaux avec perte des caractéristiques initiales.
 - **Changement de la forme de la structure**
 - suppression de poteaux, piliers, murs porteurs, élargissement de portées de calcul,
 - ouverture de passages en dalles pour escaliers ou ascenseurs.

III.3 Fissuration

La fissuration représente le premier type d'endommagement qui se développe lorsque la structure se trouve chargée mécaniquement. Les fissures peuvent alors s'étendre de la microfissuration à la lézarde.

Ces fissures représentent certainement la forme d'altération la plus fréquente [14].

La fissuration du béton peut avoir deux origines distinctes et indépendantes l'une de l'autre:

- La fissuration liée à la mise en œuvre et à la qualité du matériau: fissuration accidentelle
- Les fissurations liées au fonctionnement de l'ouvrage : fissuration fonctionnelle

❖ Les différents types de fissures

- fissure de compression
- fissure de traction pure
- fissure de flexion
- fissure de cisaillement
- fissure de retrait
- fissure d'origine thermique ou hygrométrique
- fissure due au gel
- fissure sous l'effet de la corrosion des armatures.

III.4 Réparation des fissures

Les fissures fonctionnelles ne nécessitent aucun traitement dans la mesure où les sollicitations restent dans les limites prise en compte dans les calculs et que le fonctionnement réel des ouvrages est cohérent avec la modélisation initialement retenue. Si tel n'est pas le cas, il faut d'abord consolider ou modifier les éléments concernés de façon à obtenir un fonctionnement correct [8]

Les fissures accidentelles doivent en général être traitées, surtout si leur ouverture dépasse les limites indiquées précédemment. Les choix du procédé de traitement dépend principalement de l'objectif recherché, éviter la corrosion des armatures, empêcher l'eau de traverser une paroi, corriger un défaut d'aspect extérieur, etc.....

Les principales solutions envisageables sont :

- Pontage ou revêtement protecteur en surface : Il s'agit de supprimer le défaut de protection des armatures par un revêtement, partiel ou global, imperméable ou étanche. Ces types de revêtement sont principalement des produits à base de résines plastiques appliquées en couches minces

Rebouchage des fissures:

Cette solution peut être retenue pour des fissures très ouvertes. Il est cependant nécessaire de les élargir pour assurer la pénétration des produits de calfeutrement. Les fissures sont élargies par repiquage ou meulage. Un dépoussiérage soigné doit être effectué, en abondance d'eau. Le rebouchage doit être réalisé avec une pâte de ciment additionné de résines ou avec des mastics adéquats.

- Injection des fissures :

Cette opération nécessite le nettoyage préalable des fissures au moyen d'un jet d'eau sous pression éventuellement additionné d'un détergent, selon le produit injecté, coulis de ciment ou résines synthétiques , les fissures doivent être humidifiées ou au contraire parfaitement sèches.

III-5 Rajout d'armatures complémentaires

III-5-1 Introduction

Il s'agit là d'enlever le béton dans les zones où les aciers sont corrodés. Les armatures existantes conservées doivent être bien soignées afin d'éviter une continuité de leurs dégradations. Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration et contribuer à la résistance des sections ainsi renforcées. La liaison s'effectue par soudure ou bien par scellement tout en respectant les longueurs de recouvrement et d'ancrage. La géométrie d'origine doit être régénérée avec des mortiers riches pour augmenter l'adhérence et la résistance mécanique de sections finales.

III-5-2 Mise en place des armatures complémentaires

A cette étape des travaux, un contrôle du diamètre résiduel des armatures les plus fortement attaquées sera effectué (à l'aide d'un pied à coulisse par exemple). Les armatures supplémentaires de même nature seront mises en place, par scellement, soudure, ou des systèmes explicite de fixation (cheville, tiges collées, boulonnage), afin de restituer la section initiale, avec une tolérance de 5%, en tenant compte des longueurs d'ancrage et de recouvrement, et des armatures de couture. Dans le cas soudure, celles-ci devront être effectuées, selon les normes en vigueur, après que la soudabilité de l'acier ait été vérifiée.

III-5-3 Protection des armatures

La protection des armatures consiste à appliquer sur toute la surface de celles qui sont dégagées, un produit assurant une protection vis-à-vis de la corrosion. Ce traitement n'est réellement nécessaire que si, pour des raisons techniques, l'enrobage final ne peut pas avoir la valeur prévue dans les règlements, pour un environnement donné. Il est également fonction de la nature du produit de reconstitution du parement.

On devra également s'assurer de la compatibilité avec les traitements ultérieurs (électriques notamment). Cette application doit suivre immédiatement le décapage, car l'oxydation des armatures risque de s'amorcer et de compromettre la bonne tenue de la réparation [7].

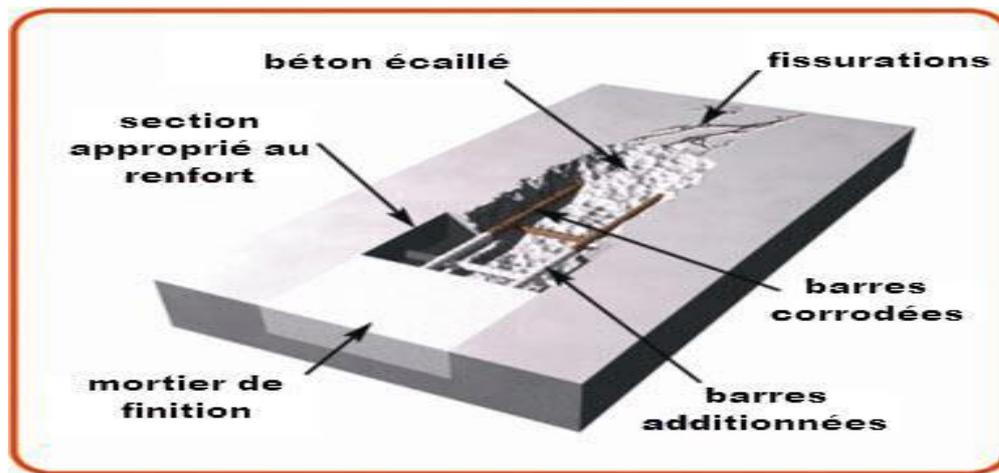


Figure III-1 : Un renforcement par adjonction d'armatures d'acier.

III-5-4 Réfection des bétons

La réfection des bétons consiste à rétablir l'enrobage des armatures par la mise en œuvre d'un mortier riche. Ce dernier doit respecter les critères :

- De la tenue d'aplomb de l'élément.
- D'une résistance mécanique supérieure ou égale au béton support.
- D'adhérence supérieure ou égale à la cohésion du support,
- D'imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs,
- D'un coefficient de dilatation thermique équivalent au béton support.
- D'une bonne protection d'aciers.

Ces critères sont assurés par l'utilisation de mortiers à base de résine pour améliorer les propriétés de l'apport, surtout lorsqu'il réagit dans la partie de l'interface où il y a plusieurs phénomènes tels que : l'influence du retrait en terme de glissement sur l'interface du béton initial et le béton nouveau.

Ce type de réparation demande généralement, pour être efficace, une augmentation non négligeable des dimensions des éléments de structure et l'emploi d'un volume relativement important de matériaux, ce qui n'est plaisant ni sous l'aspect économique, ni sous l'aspect esthétique, dans le cas de structures de façades [9] [1].



Figure III-2 : Renforcement d'une poutre par adjonction d'armatures additionnelles en sa partie Inférieure.

III-6 Béton Projeté

III-6-1 Introduction

La technique de projection du béton a d'abord été utilisée pour réparer des structures endommagées et conforter des tunnels.

Cette technique a ensuite bénéficié de nombreuses évolutions pour être actuellement utilisée de façon courante en réparation et renforcement d'ouvrages, afin de mettre en place des matériaux lorsque les moyen traditionnels de mise en œuvre s'avèrent moins adaptés ou plus coûteux.

Il existe deux techniques principales de projection du béton, dont la différence principale réside dans la chronologie des opérations élémentaires : une projection par voie sèche (avec ou sans pré mouillage) et une projection par voie mouillée (à flux dilué ou à flux dense). La plupart des adjuvants et additions utilisés dans la fabrication des bétons mis en place par coulage peuvent être incorporés dans le béton projeté.

La nature de ces ajouts est à adapter au mode de projection utilisé. En fait, la plupart des matériaux employés, pour fabriquer des bétons spéciaux mis en œuvre par coulage sont utilisables pour élaborer des bétons projetés particuliers :

- Les bétons projetés léger à base de granulats légers (argiles ou schiste expansé)
- Les bétons projetés de fibres à base de fibres métalliques, mais aussi à base de fibres de verre.
- Les bétons projetés avec incorporation de fumé de silice.

Il y'a lieu de faire une distinction entre le béton et le mortier projeté utilisés en réparation de structure. La dimension maximale des granulats utilisés permet de différencier le mortier du béton . Le mortier à des granulats dont la dimension est inférieur ou égale à 5mm. Le béton contient des granulats dont la dimension peut aller jusqu'à 16mm en voie sèche

et 12mm en voie mouillée, ces valeurs sont celles actuellement compatibles avec le matériel couramment utilisé et correspondant à celle du mélange avant projection. Le terme "béton projeté" peut alors paraître exagérée, quand la valeur de dimension des granulats du béton est de l'ordre de 6 à 8mm, car il s'agit en fait d'un "micro-béton".

III-6-2 projection d'un béton avec un ajout d'armatures

Lorsqu'il s'agit de réparation ou de renforcement structural, l'étude doit comporter une étude de fonctionnement de la structure et des conditions dans lesquelles sont repris les efforts tant à vide que sous charges d'exploitation, pendant et après les travaux. Dans les cas d'un renforcement avec un ajout d'armatures, il convient de préciser les conditions de mise en charge de l'élément à renforcer soit sous l'effet des charges d'exploitation seules, soit sous l'effet des charges permanentes. Si nous prenons l'exemple d'un poteau dégradé qui nécessite un renforcement, il peut être intéressant de faire participer le béton projeté à la reprise des charges permanentes, pour cela, il est nécessaire de procéder à un étaielement du poteau accompagné d'un vérinage actif, de placer les aciers de renfort, de projeter le béton, puis de décroître.

Pour reconstituer des sections précises de béton ou pour dresser des arrêtes, il est souvent nécessaire d'utiliser des coffrages, ceux-ci constituent cependant des obstacles qui gênent la projection et qui peuvent provoquer la formation de zones mal compactées, en raison d'un piégeage de rebonds dans les angles. Il est donc préférable de procéder d'abord à l'enrobage des aciers, puis de ne mettre en place les coffrages que pour la projection de la couche de finition. Il a été vérifié que lorsque les règles de l'art relatives à l'exécution du béton projeté sont respectées, le plan de liaison entre béton projeté et béton support ne constitue pas systématiquement un plan de faiblesse. Dans la grande majorité des cas, la rupture se produit soit dans le béton support, soit dans le béton projeté. Cet essai permet de définir les conditions d'acceptation d'une réparation par béton projeté du point de vue de son adhérence sur le support, cette adhérence est ainsi jugée satisfaisante [9].

III-6-3 Description des deux méthodes

III-6-3-1 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 fines, mais sur laquelle les gros granulats commencent par rebondir, au fur et à mesure de son épaissement, cette couche est « martelée » par les gros granulats qu'elle finit par retenir, ce qui donne:

- 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. Toutefois les normes préconisent un dosage pas moins de 280 kg/m³ de ciment ayant une résistance à la compression supérieure à 25 MPa.

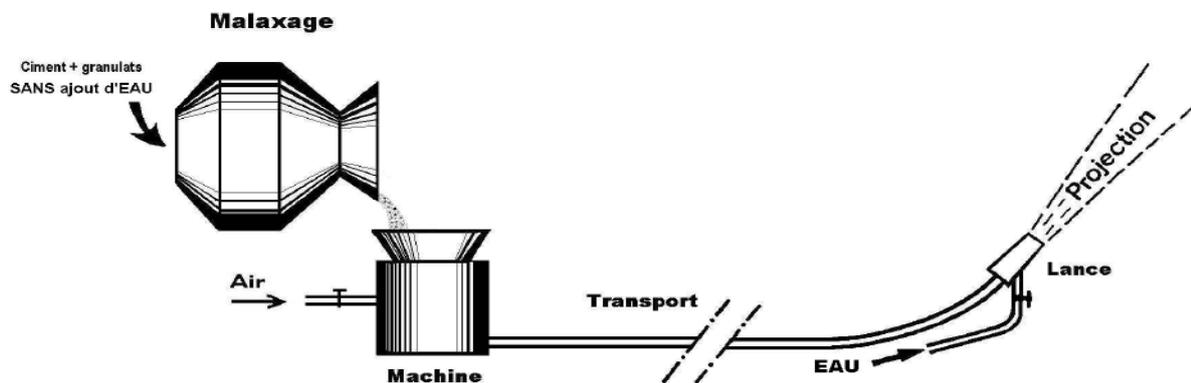


Figure III-3 : Principe de la voie sèche

III-6-3-2 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

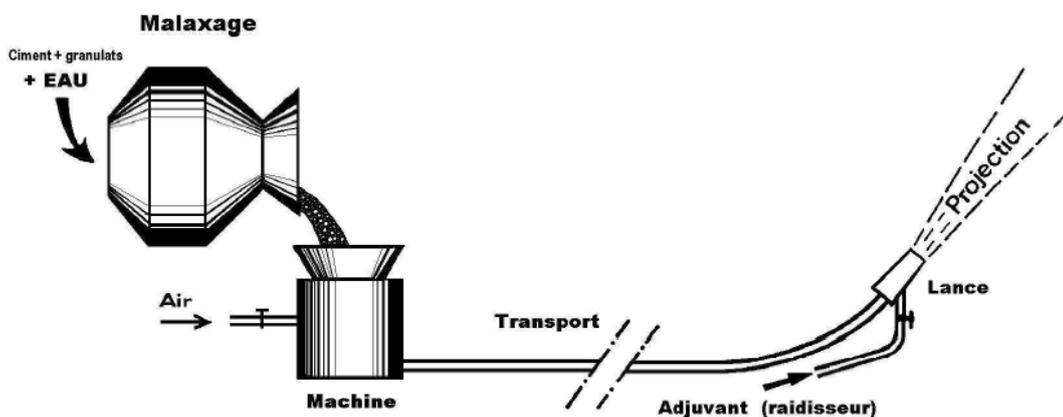


Figure III-4 : Principe de la voie mouillée

Tableau III-1 : Avantages des deux méthodes de béton Projeté

Méthode	Avantages
Voie sèche	<ul style="list-style-type: none">- possibilité d'utiliser des granulats de ronde dimension (15 à 20 mm)- Un dosage relativement faible en ciment.- Un faible rapport E/C.- Un compactage énergique, d'où la réduction du retrait.- Une bonne adhérence sur le support.- Une pénétration en grande profondeur dans les pores.- Une éventuelle projection en plafond sans accélérateur de prise ou durcisseur.
Voie mouillée	<ul style="list-style-type: none">- Composition uniforme de la couche projetée- Pas de rebondissement violent.- Pas de production de poussières.

Tableau III-2 : Inconvénients des deux méthodes de béton projeté

Méthode	Inconvénients
Voie sèche	<ul style="list-style-type: none">- Pertes de volume du béton projeté importantes par rebondissement.- Production de poussières.
Voie mouillée	<ul style="list-style-type: none">- Dosage en eau et en ciment plus élevé pour assurer une plasticité nécessaire.- Compactage faible.- Nécessité d'accélérateurs de prise

III-7 Renforcement par platines métalliques

III-7-1 Introduction

Ce type de renforcement consiste à pallier les insuffisances locales ou globales des structures en béton par des tôles d'acier, collées en surface du béton. Cette surface de béton doit subir avant tout, une préparation soignée ayant pour objet d'éliminer de la surface toutes les parties peu adhérentes et de supprimer les imperfections locales afin de la rendre la plus plane possible.

III-7-2 Les matériaux utilisés

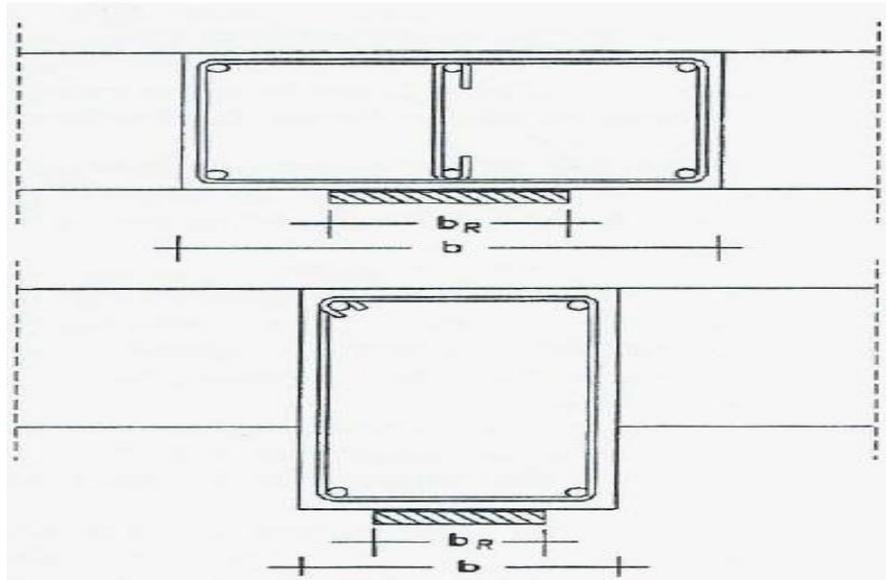
- a) La colle : c'est une résine époxy choisie pour ses propriétés d'adhérence sur l'acier ainsi que sur le béton. Le film résiduel de la colle doit être de faible épaisseur et d'une rigidité suffisante pour transmettre intégralement par adhérence les efforts à la tôle. Cette rigidité étant réduite par 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 doit transmettre les efforts.

- b) La tôle : les tôles d'acier 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) [1].

De nombreuses expériences ont démontré que ce système permet des accroissements de résistance en flexion entre 30 et 50% [3]

Le schéma suivant présente de manière simple les détails du renfort :



- Augmentation de la capacité de flexion maximale recommandée du 50-70%
- traitement avec appropriée (de préférence sablé).
- utiliser des adhésifs époxy spécifiques avec une épaisseur réduite (maximum 1 mm).
- épaisseur maximale de la bande de renforcement en acier entre 5 et 6 mm.
- limiter la largeur maximale de la bande de renfort ($b_R < 0,5b$)

Figure III-5 : renfort par plaque d'acier [8]

III-7-3 La mise en œuvre des plats collés

- Pour parvenir à des fins de mise en œuvre correcte, il est impérativement souhaitable à procéder à un sablage, permettant une préparation d'une grande surface de collage, sans attaquer en profondeur les parements.

- Un mortier de ragréage est destiné à pallier, dans certains endroits, le manque d'enrobage des armatures internes ou bien à replanir les surfaces, sans pour autant dépasser les 20% des surfaces destinées au collage.

- La colle est général une résine époxy choisi pour ses propriétés d'adhérence à l'acier et au béton. Une attention particulière doit être accordée aux conditions atmosphériques environnant le site lors de la mise en œuvre des tôles.

- La colle n'apporte pas de résistance mécanique, mais transmet fortement les efforts

Les tôles ou platines de renfort, constituées, dans la plupart des cas, de tôles en acier. Ces tôles possède une épaisseur de 3 à 5mm et doivent subir toute leur préparation en usine (découpage- préassemblage si besoin, abattage des arrêtes ainsi qu'un éventuel sablage) pour avoir une bonne tenue de l'adhérence entre l'acier et la colle.

- Les tôles doivent être protégées en utilisant une pellicule, de même nature que celle qui doit être appliquée avant encollage.

- La protection des aciers contre la corrosion sur leur face visible doit être assurée. En fin des travaux les aciers doivent être protégés contre la corrosion.

- Après l'enlèvement de vernis de protection ou de primaire de protection, la colle est étalée sur tôle et sur la surface du béton l'épaisseur minimale mise en œuvre sur chaque face est de l'ordre du millimètre.

- Le dispositif de serrage peut, suivant le cas, être constitué de serre-joints, de barres filetées transvasant l'élément à renforcer, doit permettre d'appliquer sur toute la tôle une pression voisine de 4 N/mm² durant toute la durée de polymérisation de la colle.

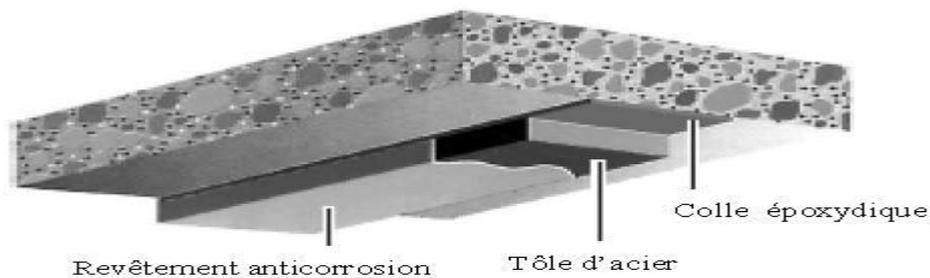


Figure III-6 : Application de plats métalliques selon le procédé L'Hermitte [2]

Il est important de souligner que cette technique augmente le poids propre de l'élément et il est nécessaire de vérifier que le renfort n'affecte l'élément par apport d'effort tranchant et aplatissement au niveau des appuis. Pour une élévation significative d'effort tranchant il est recommandé d'ajouter des barres en partie supérieure de la poutre. On note également des risques de tensions tangentielles importantes au niveau de l'interface bandes/béton pouvant décoller les bandes (notamment au niveau des extrémités).

Il est recommandé de ne pas dépasser des épaisseurs de bandes de 6 mm, leur largeur ne doit également pas dépasser 50% de la largeur de la poutre.

Enfin, dans le cas d'un incendie ou de très fortes températures, la résine de collage pourra se dégrader et provoquer le décollement des bandes de renfort.

III.7.4. Avantages et inconvénients de Bandes d'acier collées

Tableau III.3 : Avantages et inconvénients de Bandes d'acier collées

Avantages	Inconvénients
	<p>- Impossibilité de généraliser cette technique à des surfaces importantes (masse manipulées</p>

<ul style="list-style-type: none"> - Il n'exige que des interventions mineures sur la structure. - Les renforts sont peu encombrants. - Il est d'un emploi souple 	<p>trop importantes), ce qui limite d'autant les possibilités de réparation.</p> <ul style="list-style-type: none"> -la durabilité vis-à-vis de la corrosion et la fatigue pose problème. - Nécessité d'une préparation spécifique de la surface à traiter (la raideur des tôles nécessite une surface parfaitement plane pour assurer l'uniformité de l'épaisseur de l'adhésif). -les longueurs sont limitées. -le transport n'est pas toujours aisé.
--	--

III-7-5 Conclusion

la technique des tôles collées, qui fut utilisée d'abord dans le domaine du bâtiment industriel, s'est très vite répandue dans le domaine du génie civil où dans bien des cas, elle a permis soit d'accroître la capacité portante d'une structure, présentant des insuffisances de résistance .

L'utilisation de ce type de renforcement devrait voir son emploi augmenté avec des recherches menés sur d'autres matériaux nouveaux pour remplacer l'acier

III-8 Augmentation des sections par un béton additif

III-8-1 Introduction

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 sur tout 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. Ces décaissés seront remplis en béton avant le séchage des résines.

S'il s'agit d'un renforcement avec armatures, il faudra mettre cette armature en place et réaliser le bétonnage par coulage ou pompage. Le béton devra être traité avec des adjuvants pour éviter la vibration et le compactage. 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.

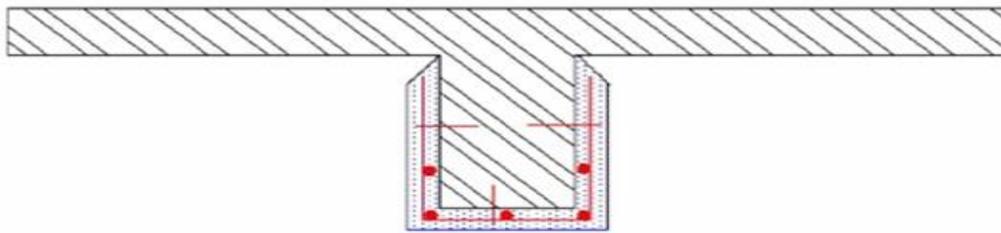


Figure III.7 : renforcement d'une poutre par chemisage

III-8-2 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 des valeurs de glissement d'environ 0,01 à 0,02 mm et est maintenue pratiquement constante jusqu'à des valeurs de glissement de l'ordre de 0,05mm [12].



Figure III-8 : Renforcement d'une poutre avec chemisage en béton armé

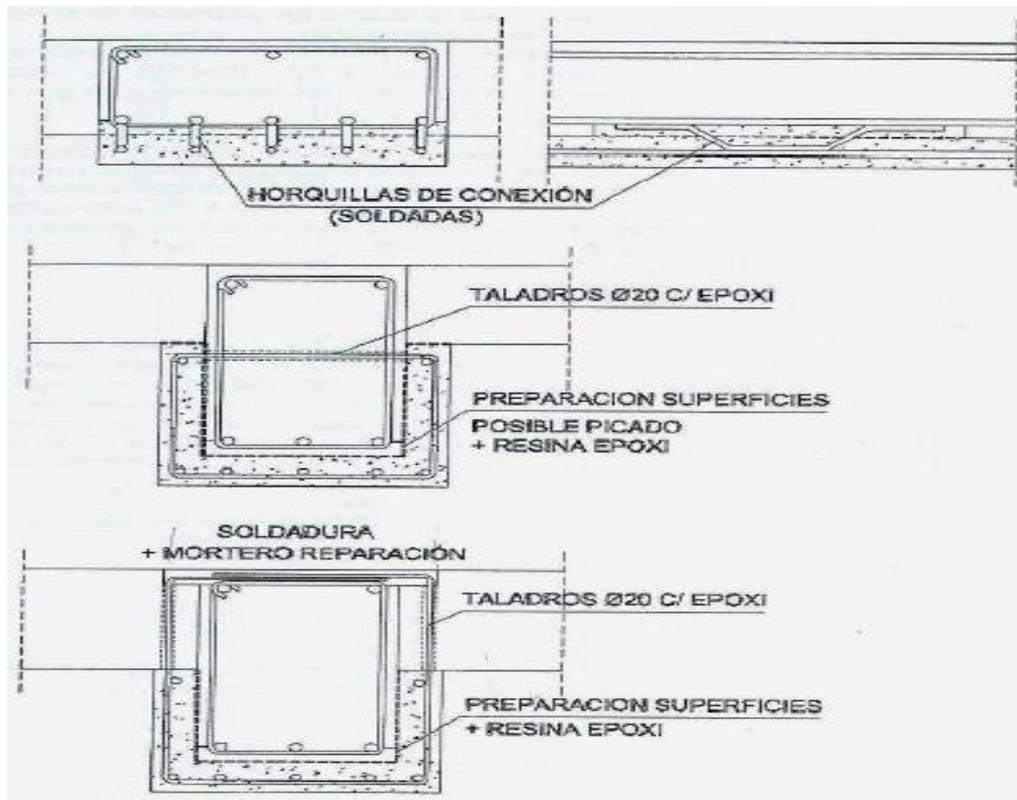


Figure III-9 : Renfort de poutres par enrobage [3]

Le principal problème est que les dimensions augmentent de manière considérable, ce pourquoi dans quelque élément il sera impossible de l'effectuer. En outre ce qui est encombré du béton dans la chemise est complexe non seulement par la technique mais aussi par la composition de ce dernier, parce qu'il doit garantir un bon attachement avec le béton de la poutre. Parfois on effectue un certain traitement préalable pour faciliter la création d'une assemblée optimale. Ce système permet un accroissement de jusqu'à 60% de la capacité de flexion.

III-9 Adjonction de matériaux composites (Polymères Renforcés en Fibres)

III-9-1 Introduction

Le renforcement des structures par collage de tôle d'acier, resté favori dans le bâtiment, n'a connu qu'un développement limité dans le domaine du génie civil. Afin d'affranchir de ce type de renfort, les groupe de recherches ont entrepris d'autres actions en utilisant d'autres matériaux appelés : matériaux composites. Cette voie est plus prometteuse, et consiste à développer une technique permettant le renforcement des structures en béton, en acier par imprégnation et collage d'un tissu sec à base de fibres. (Un polymère renforcé en fibre de carbone PRFC).

III-9-2 Définitions et avantages

Les fibres utilisées généralement dans le domaine du génie civil sont les fibres de carbone. Ces fibres sont obtenues par pyrolyse de fibres organiques, réticulées et orientées en atmosphère contrôlée.

Atmosphère contrôlée. Elles s'utilisent essentiellement sous forme de matériaux composites pour conférer aux produits finis le meilleur des propriétés physiques, statiques et dynamiques. Ces matériaux présentent une contrainte de rupture très élevée pour une densité cinq fois moindre que celle de l'acier.

Les composites issus de fibres de carbone bénéficient sans équivalent et de propriétés physiques très étendues.

- Grande résistance en traction (avec haut module d'élasticité)
- Grande résistance à la fatigue.
- Légèreté.
- Grande résistance à l'usure.
- Absorption des vibrations.
- Grande résistance à la corrosion

III-9-3 Propriétés du tissu et de la résine de collage

D'un transport et d'une manutention faciles, le tissu ne pèse que 0.8 Kg/m², le tissu en fibre de carbone peut être aisément découpé sur place à la forme désirée, sa mise en œuvre n'exige qu'un échafaudage léger.

A l'inverse des tôles d'acier, le TFC (tissu de fibre de carbone) ne nécessite aucune pression de contact pendant le durcissement de la résine. Sa faible épaisseur, de l'ordre de 1mm, permet son entraînement en traction par la résine durcie, sans flexion parasite.

La résine est utilisée à double fin, elle réalise à la fois l'imprégnation du tissu et son collage au support. Il en résulte, d'une part, une grande simplicité de mise en œuvre et, d'autre part, un fonctionnement mécanique amélioré, le renfort ne comportant qu'une seule surface de contact. La résine peut être appliquée sur un support humide, après mélange de deux composants, sa durée de prise et de durcissement est de quelques heures ; cette durée varie faiblement en fonction de la température [9].

III-9-4 Procédures de la mise en œuvre

Dans le cas du béton, il convient d'effectuer un sablage à sec en vue d'obtenir un état de surface rugueux et uniforme en tous points avec des reliefs d'impact compris entre 0.5 et 1 mm, les dépôts de poussière et les particules non adhérentes sont éliminés par un brossage, ainsi qu'un chanfreinage des arêtes vives.

. L'application de la couche de résine s'effectue au moyen d'un rouleau à poils de façon à atteindre un dépôt moyen de 0.7 Kg/m², le tissu est ensuite appliqué, si nécessaire, il est possible de juxtaposer plusieurs bandes bord à bord. Puis une couche d'imprégnation de même résine. Si nécessaire, cette opération peut être renouvelée avec une deuxième couche de TFC.

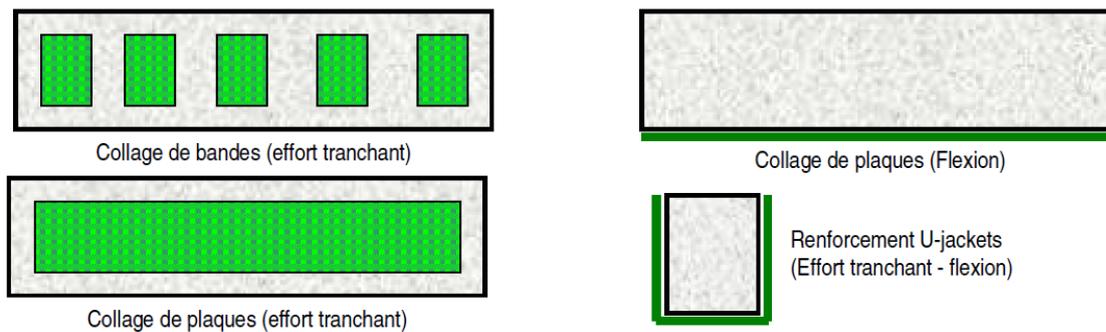


Figure III-10 : Les différentes méthodes de renforcement par le collage de plaques en composites [14]

III-9-5 Conclusion

L'analyse du renforcement à l'aide de TFC, à montrer que le cout des matériaux, supérieur à celui de la tôle d'acier, est largement compensé par l'économie réalisée sur les temps de main d'œuvre et la mobilisation du matériel.

III-10 Réparation ou renforcement par précontrainte additionnelle

III-10-1 Introduction

La précontrainte additionnelle s'est imposé dans le renforcement ou la réparation, tant des ouvrages d'art que des bâtiments, mieux même, les progrès technologiques accomplis dans le domaine de la réparation ont fait évoluer la conception du câblage puisque ils sont conçus, de nos jours, avec une précontraintes partiellement ou totalement extérieur.

Sur le plan mécanique, la précontraintes additionnelle extérieure se caractérise par de faibles pertes de tension par frottements, la possibilité d'ajuster assez facilement le tracé des câbles en fonction des effets recherchés. Sur le plan pratique, elle offre une assez grande facilité d'installation et la possibilité d'un contrôle efficace de l'exécution, en au droit des raccordements de conduits de précontrainte, c'est particulièrement vrai pour l'incorporation des câble qui, lorsque elle est préconisée, est simplifiée puisque l'on dispose, d'un accès facile aux points hauts et bas du tracé.

Compte tenu de son efficacité et de sa souplesse de mise en œuvre, la précontrainte additionnelle peut être employée pour renforcer et/ ou répare une grande variété d'ouvrage (ponts, barrages, réservoir, silos...) ou éléments structuraux tels : dalles de plancher ou poutres.

III-10-2 Conception d'une précontrainte additionnelle

a) Aspect général

La conception d'un câblage additionnelle, lorsque des dispositions spéciales n'ont pas été prévues au moment du projet initial, doit être étudiée en intégrant, dans la flexion de l'étude trois aspects essentiels :

- L'injection et l'obturation des fissures.
- Prise en compte du changement éventuel du schéma statique de la structure ou l'élément structural concerné.
- Préconisation de la démontrabilité de la précontrainte.

b) L'injection des fissures

Les ouvrages à répare présentent généralement des fissures d'ouverture variable. Il convient donc, dans tous les cas, d'injecter préalablement les fissures, même si cette opération est longue, pour amoindrir les effets de la non-linéarité et reconstituer, dans la mesure du possible, un solide élastique et homogène.

La précontrainte ne peut, à elle seule, refermer les fissures car, d'une part, les grains de béton ont pu se détacher au moment de l'ouverture des fissures et modifier la conjugaison des lèvres. Ces grains, sous l'effet de la précontrainte additionnelle, peuvent créer des points durs et perturber le passage des efforts en l'absence d'injection préalable des fissures.

c) Changement du schéma statique

Il est rare que l'on cherche à modifier le schéma statique initial théorique d'une structure, en le renforçant ou en le réparant, indépendamment de l'évolution du schéma statique réel due à la fissuration.

d) Démontage de la précontrainte

Dans tous les cas, la précontrainte additionnelle doit être démontable pour pouvoir être facilement remplacée en cas de défaillance. Il peut arriver qu'on la souhaite réglable pour contrôler, dans le temps, l'effort de précontrainte additionnelle appliquée et optimiser l'efficacité de la réparation.

La démontrabilité soit possible et pratique, tous les points singuliers du câblage additionnelle, doivent être étudiés dans cette optique tels les zones d'ancrages, les traversés d'entretoises, les bossages ainsi que les déviateurs de câbles ...etc. [8]

III-10-3 Les différents tracés de la précontrainte additionnelle

Le tracé des armatures de précontrainte additionnelle peut être rectiligne ou polygonal.

- **Tracé rectiligne** : facile à mettre en œuvre (pas de déviateur intermédiaire), peu de pertes (pas de déviation) mais mauvais rendement (pas d'excentricité) , plutôt réservé aux ponts de hauteur variable car le câble se retrouve « excentré » par rapport à la fibre moyenne [10]

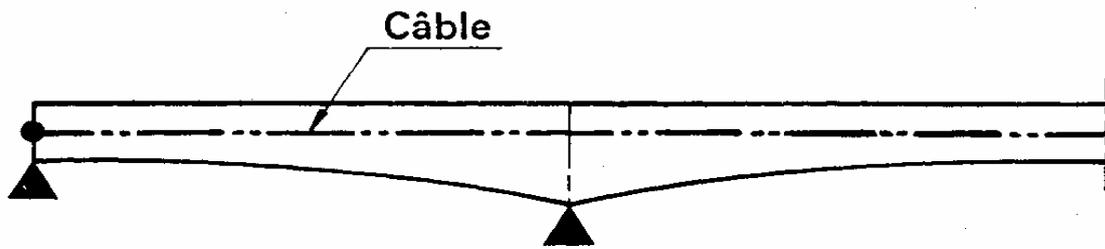


Figure III-11 : Tracé rectiligne des câbles de précontraint

- **Tracé polygonal** : meilleur rendement mais mise en œuvre plus compliquée (réalisation de déviateurs), poids supplémentaire des déviateurs, un peu plus de perte de précontrainte mais réduction d'effort tranchant grâce à l'inclinaison des câbles. Il s'agit de la conception la plus courante [10]

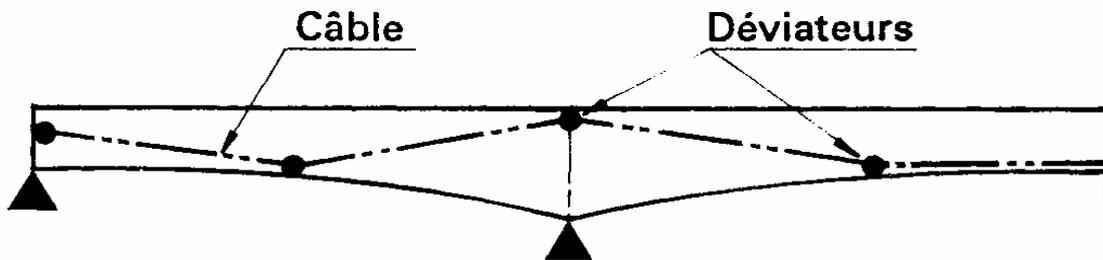


Figure III-12 : Tracé polygonal des câbles de précontraint

III.10.4. Avantages et inconvénients de la précontrainte additionnelle :

Tableau III.4 : Avantages et inconvénients de la précontrainte additionnelle

Avantages	inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> -Une compensation partielle ou complète des actions des charges. -Une économie appréciable des matériaux. - Les grands portés sont réparables. -Une réduction des risques de corrosion. 	<ul style="list-style-type: none"> -La nécessité de matériaux spécifiques (comme les vérins). -La nécessité de main d'œuvre qualifié. -La nécessité d'équipements particuliers. -Risque de rupture à vide par excès de compression. -Un calcul relativement complexe.

III-10-5 Conclusion :

Vus que les matériaux composites aient une grande flexibilité en s'adaptant aux formes géométriques les plus complexes des éléments renforcés, et pour leur légèreté par rapport aux aciers, leur facilités de manutention, de transport et de mise en œuvre sur site, ainsi que leurs résistance mécanique assez importante que les autres moyens de renforcements.

Ces multiples avantages, mécanique et physico-chimique permet l'utilisation des matériaux composites comme méthode de renforcement et de réhabilitation des structures en béton armé, l'application de tissus ou lamelles en PRFC (polymère renforcé en fibre de carbone) est une alternative intéressante aux méthodes de réparation conventionnelle.

C'est pour cette raison que Le choix de renforcement à l'aide de matériaux composites (Polymère Renforcé en Fibre de Carbone) de l'élément à renforcer dont a fait l'objet de cette étude est jugé favorable.

Chapitre IV :

Réhabilitation des

voiles

IV. Réhabilitation des voiles

IV. 1. Introduction

Les murs en béton armé, à cause de leur rigidité et leur grande résistance aux efforts tranchants, résistent très bien aux forces sismiques induites dans le bâtiment. Donc, un mur endommagé ou mal dimensionné peut être réparé et / ou rigidifié suivant qu'on veut améliorer ou pas la capacité résistante de la structure aux efforts sismique. [6]

Clarté de l'approche mécanique et structurelle Dans les travaux de réhabilitation structurelle des bâtiments, il convient de spécifier clairement l'objectif technique visé par l'intervention proposée. Trois approches sont possibles :

1. La restauration de la capacité portante initiale de l'élément à réhabiliter. Il s'agit, de fait, de ce que nous interprétons habituellement comme étant la réparation de l'élément endommagé ;
2. L'augmentation de la capacité portante de l'élément sur lequel nous intervenons, qui équivaut généralement au renfort de l'élément endommagé ;
3. Le remplacement fonctionnel de l'élément par un nouvel élément assumant entièrement la capacité portante requise, sans retirer nécessairement l'élément à réhabiliter.

Bien sûr, le choix de l'approche dépendra des exigences mécaniques requises ainsi que de la capacité à les satisfaire de l'objet de l'intervention.

L'examen de quelques cas et d'exemples aidera à mieux comprendre ce processus et à choisir le traitement adéquat. [4]

IV. 2. Techniques de réparation et de renforcement

Le choix d'une ou des méthodes de réparation et de renforcement est défini en relation étroite avec la nature et le degré d'importance des désordres constatés lors d'un diagnostic.

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

On peut être amené donc à procéder :

- ✓ 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 ou les sections sont trop sollicitées et défailantes, par contre le renforcement des éléments consiste à améliorer leurs

caractéristiques mécanique de manière à ce qu'elles offrent une meilleure solidité aussi bien en état de service qu'en état de résistance ultime.

IV.2.1. Béton projeté

La réparation à l'aide de béton projeté consiste à piquer les zones dégradées et à projeter sur l'ensemble de l'ouvrage du béton. Il existe deux méthodes d'application du béton projeté : soit par voie humide, soit par voie sèche. La seule différence entre ces deux méthodes réside dans le moment où l'on ajoute l'eau. Pour le béton projeté par voie sèche, l'eau est ajoutée au dernier moment au niveau de la lance alors que par voie humide, l'eau est introduite lors du malaxage du béton.

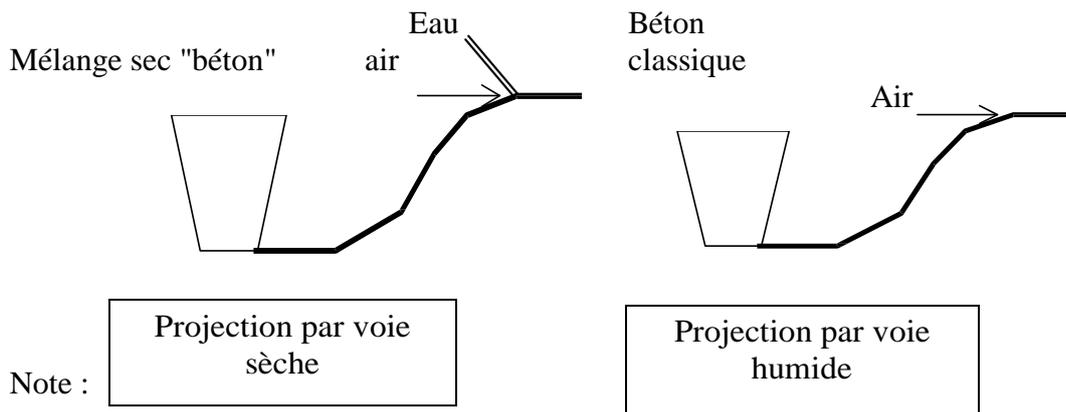
Les étapes préalables à la projection du béton sont identiques à celles du ragréage.



Figure IV.1 : Renforcement au moyen de béton projeté.

Il faut distinguer deux techniques de projection, suivant le moment d'introduction de l'eau dans la chaîne : [1]

- ✓ par voie sèche avec ou sans pré-mouillage : l'eau est introduite au niveau de la lance.
- ✓ par voie mouillée : l'eau est introduite au malaxage du béton.



Les avantages et les inconvénients sont mentionnés dans le chapitre précédent.

IV.2.2. Adjonction d'armature d'aciers

Il s'agit là d'enlever le béton dans les zones où les aciers sont corrodés

- _ Les armatures existantes, conservées doivent être bien soignées, afin éviter une continuité de leurs dégradations.
- _ Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration et contribuer à la résistance des sections ainsi renforcées.
- _ La liaison s'effectue par scellement tout en respectant les longueurs de recouvrement et d'ancrage.
- _ La géométrie d'origine doit être régénérée avec des mortiers riches pour augmenter l'adhérence et la résistance mécanique de sections finales.

IV.2.2.1. Mise en place des armatures complémentaires

A cette étape des travaux, un contrôle du diamètre résiduel des armatures les plus fortement attaquées sera effectué (à l'aide d'un pied à coulisse par exemple). [1]

Les armatures supplémentaires de même nature seront mises en place, par scellement, ou des systèmes explicites de fixation (cheville, tiges collées), afin de restituer la section initiale, avec une tolérance de 5%, en tenant compte des longueurs d'ancrage et de recouvrement, et des armatures de couture. Dans le cas de soudure, celle-ci devra être effectuée, selon les normes en vigueur, après que la soudabilité de l'acier ait été vérifiée.

IV.2.2.2. Protection des armatures

La protection des armatures consiste à appliquer sur toute la surface de celles qui sont dégagées : un produit assurant une protection vis-à-vis de la corrosion. Ce traitement n'est réellement nécessaire que si, pour des raisons techniques, l'enrobage final ne peut pas avoir la valeur prévue dans les règlements, pour un environnement donné. Il est également fonction de la nature du produit de reconstitution du parement.

On devra également s'assurer de la compatibilité avec les traitements ultérieurs (électriques notamment). Cette application doit suivre immédiatement le décapage, car l'oxydation des armatures risque de s'amorcer et de compromettre la bonne tenue de la réparation.

IV.2.3. Réfection des bétons

La réfection des bétons consiste à rétablir l'enrobage des armatures par la mise en œuvre d'un mortier riche. Ce dernier doit respecter les critères :

- ✓ De la tenue d'aplomb de l'élément.
- ✓ D'une résistance mécanique supérieure ou égale au béton support.
- ✓ D'adhérence supérieure ou égale à la cohésion du support.
- ✓ D'imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs.
- ✓ D'un coefficient de dilatation thermique équivalent au béton support.
- ✓ D'une bonne protection d'aciers.

Ces critères sont assurés par l'utilisation de mortiers à base de résine pour améliorer les propriétés de l'apport, surtout lorsqu'il réagit dans la partie de l'interface où il y a plusieurs phénomènes tels que : l'influence du retrait en terme de glissement sur l'interface du béton initial et le béton nouveau.

Ce type de réparation demande généralement, pour être efficace, une augmentation assez importante des dimensions des voiles et l'emploi d'un volume relativement consistant de matériaux, ce qui n'est pas plaisant ni sous l'aspect économique, ni sous l'aspect esthétique.

IV.2.4. Chemisage des sections de 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 sur tout 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. [1]

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.

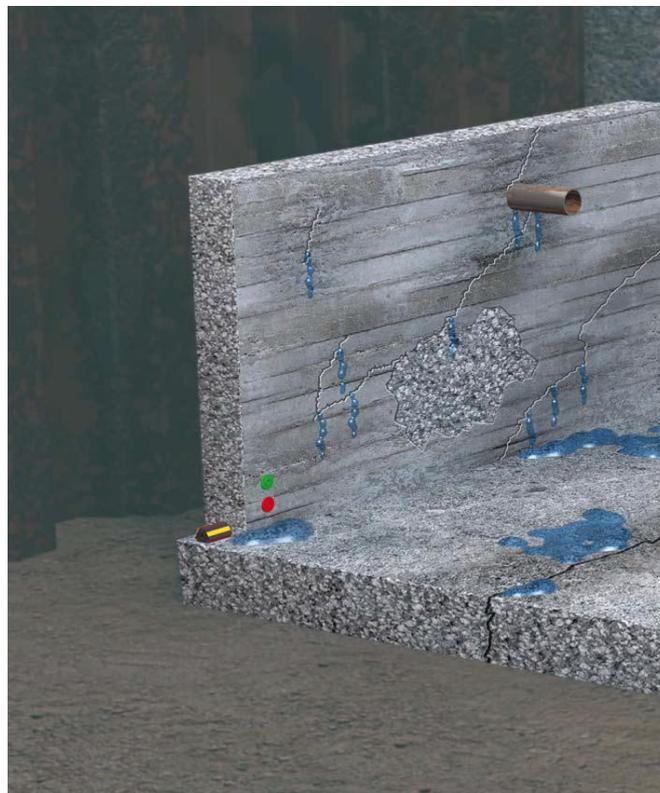
IV.2.5. Injection

L'injection des fissures avec de la résine époxy est devenue la technique la plus utilisée pour la réparation des murs pendant cette dernière décade. Si le béton n'est ni disloqué ni écrasé, la résine époxy peut restituer au mur ses résistances initiales à la flexion et à l'effort tranchant. Cependant le mur réparé n'aura jamais la rigidité initiale.

Ceci est dû au fait que les fissures très petites ne peuvent être remplies de résine.

IV.2.5.1. Préparation des fissures

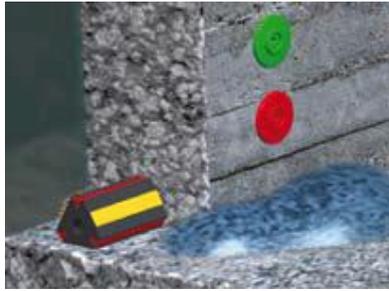
On ignore souvent l'état interne des fissures. Pour cela il est absolument nécessaire de procéder à leur nettoyage, avant toute injection, à l'air comprimé ou à l'eau sous pression. S'il y a des traces de graisses ou d'huile, on peut utiliser des détergents à la condition d'effectuer par la suite une neutralisation.



figureIV.2 : Préparation des fissures.

IV.2.5.2. Système d'injection pour structure en béton armé

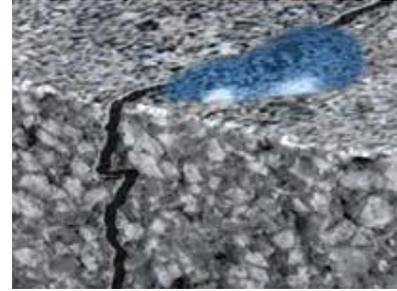
Problèmes courants des murs en béton :



Imperméabilisation des joints de construction



étanchéité en surface de structure en béton ayant des fuites



imperméabilisation des fissures



Réparation des fissures et cavités structurales



imperméabilisation des membranes endommagées



imperméabilisation des puits de fondations

a) La technologie d'injection

Tableau IV.1 : avantages des paramètres des matériaux d'injection

Paramètre des matériaux à injection	Avantages	Exigence du système d'injection
Viscosité	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Meilleure pénétration dans les fissures en raison de la faible viscosité. ▪ Réduction de la force nécessaire d'injection en raison de la faible viscosité. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Résines d'injection de différentes viscosités pour des largeurs distinctes de fissures. ▪ Faible taille des particules pour les interstices fins.
Expansion	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Meilleure étanchéité dû à l'effet d'auto injection par expansion. ▪ Remplissage complet des fissures et cavités. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Expansion rapide. ▪ Facteur de moussage élevé. ▪ Expansion stable sans rétrécissement ultérieur.

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Faible consommation de matériau grâce à l'augmentation du volume après expansion. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Etanchéité provisoire due au facteur de moussage élevé.
Temps de réaction	<ul style="list-style-type: none"> ▪ De faibles temps de réaction empêchent l'eau sous pression d'emporter la résine. ▪ Faible attente au cours des travaux ▪ La réaction ne se produit que si nécessaire 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Temps de réaction variables. ▪ Pas de réaction tant que la résine n'est pas en contact avec l'eau ou l'humidité
Vie en pot ou durée de vie du produit	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La Durée Pratique d'Utilisation permet une pompabilité égale à celle d'un système mono-composant. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ DPU variable pour des exigences différentes (voir tableau 3).
Flexibilité	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Capacité à s'adapter à un mouvement limité. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flexibilité à long terme après durcissement. ▪ Etanchéité permanente.
Adhérence/liaison	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Liaison structurelle des fissures. ▪ Meilleure étanchéité grâce à une bonne adhérence. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Excellente adhérence. ▪ Liaison complète aux surfaces de contact. ▪ Absence de contraction ou retrait.
Durabilité/étanchéité permanente	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Haute durabilité de la structure réparée. ▪ Faible usure. ▪ Réparation permanente. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Absence de retrait avec l'usure. ▪ Flexibilité à long terme. ▪ Etanchéité à long terme.
Resistance	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Haute résistance aux produits chimiques agressifs 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Systèmes d'injection à haute résistance chimique.

Risques pour l'environnement/toxicité	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Permet une injection dans des environnements écologiquement sensibles. ▪ Non-toxique et non dangereux à appliquer. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Systèmes sans solvants. ▪ Matières premières ne nuisant pas à l'environnement. ▪ Systèmes ayant subis des tests de contact avec l'eau souterraine.
--	---	--

b) Les systèmes d'injection pour les différentes applications

Étanchéité des joints de construction sur des structures en béton

- ❖ Résine d'injection polyacrylate à faible viscosité, souple et sans solvant, dotée d'une teneur élevée en produits solides.
- ❖ Résine d'injection polyuréthane à faible viscosité, souple et sans solvant pour une étanchéité permanente des fissures et joints de construction. Au contact de l'eau, il se forme une structure uniforme, fermée et donc étanche.



Figure IV.3 :

joints

étanchéité des

Étanchéité en surface de structures en béton ayant des fuites

Étanchéité de surface par injection en rideau dans les imperfections des éléments souterrains

Gel d'injection polyacrylate à très faible viscosité, souple et à durcissement rapide pour l'étanchéité à l'eau permanente des surfaces présentant des fuites. Le matériau durcit en un gel imperméable, souple mais solide qui possède une bonne adhérence aux substrats secs et humides. [Net.3]



Figure IV.4 : étanchéité en surface

Imperméabilisation des fissures

Rebouchage et étanchéité souple des fissures avec fuites sur des structures neuves et existantes.

- ❖ Mousse d'injection de polyuréthane à moussage rapide, faible viscosité et sans solvant, réagissant au contact de l'eau pour empêcher l'eau de passer provisoirement. Le matériau durcit en une mousse dure et élastique très dense, dotée d'une structure cellulaire très fine.
- ❖ Résine d'injection de polyuréthane à faible viscosité, souple et sans solvant pour l'étanchéité permanente des fissures et des joints de construction. Au contact de l'eau, il se forme une structure uniforme, fermée et donc étanche. [Net.3]



Figure IV.5 : Imperméabilisation des fissures

Réparation des fissures et cavités structurelles

Recouvrement et rebouchage des fissures et cavités qui nécessitent un renforcement structurel :

- ❖ Résine époxydique d'injection haute résistance, faible viscosité et sans solvant pour la liaison structurelle des fissures et cavités dans des structures en béton sèches et humides.
- ❖ Résine époxydique haute résistance, très faible viscosité et sans solvant pour la liaison structurelle des fissures et cavités dans des structures sèches et humides.



Figure IV.6 : Réparation des fissures et cavités structurelles

c) Application des systèmes d'injection

Injection dans les fissures au moyen d'injecteurs



1. Percez des trous à un angle De 45° sur la surface en béton Et placer les injecteurs tel que montré sur la figure. Diamètre du trou = diamètre du tube + 2 mm.



2. Installez les injecteurs. Serrez-les de façon qu'ils puissent résister à une pression d'injection maximale.



3. Fixez le clapet de non-retour sur le premier tube injecteur puis commencez l'opération d'injection.

Injection dans les fissures au moyen d'injecteurs



1. Préparez le support en le nettoyant par pression d'air, ou mécaniquement par meulage ou autre, puis nettoyez à la brosse ou à l'aspirateur.



2. Placez un clou en acier dans le tube d'injection jusqu'à l'introduire dans la fissure pour empêcher le blocage du canal d'injection par la colle puis installez les injecteurs de surface tel qu'indiqué sur la figure.



3. Comblez la surface de la fissure au moyen de sikadur 30 colle. Assurez vous que le tube et la fissure en surface sont entièrement recouverts par le produit de collage.

Injection en rideau :



1. Percez comme indiqué sur la figure, à des intervalles de 30 à 50 cm, des trous dans le support présentant des fuites pour y placer les injecteurs.



3. Fixez le raccord sur le premier tube d'injection et commencez l'opération d'injection par la rangée inférieure des trous.

2 Installez les injecteurs. Serrez-les de façon qu'ils puissent résister a une pression d'injection maximale.



4. Lorsque du matériau produit d'injection ressort du second tube d'injection injecteurs pendant l'injection, fixez y le raccord anti-retour.

d) **Pompes d'injection et tubes d'injection**

- ❖ Matériel nécessaire à l'injection des résines d'injection et des particules microfines de ciment en suspension
- ❖ Pompes à composant unique pour les résines de polyuréthane, de polyacrylate et époxydes

Les pompes d'injection à composant unique sont des dispositifs d'injection universels qui conviennent pour une vaste gamme d'applications. Elles sont conçues pour une utilisation professionnelle. Les pompes d'injection EL-1, EL-2, Hand-1 et Hand-2 peuvent être utilisées avec les résines polyuréthane, polyacrilique et époxy.



Figure IV.7 : pompe d'injection type EL-1

Pompes à deux composants pour les gels de polyacrylate

La pompe d'injection PN-2C est spécialement conçue pour l'injection en rideau. Une pompe à deux composants est indispensable pour les gels de polyacrylate à réaction rapide. Les composants individuels s'introduisent séparément dans la tête de mélange. Le mélange à proprement parler a lieu dans un mixeur statique situé dans la tête d'injection. [Net.3]



Figure IV.8 : pompe d'injection type PN-2C

Produits d'injection

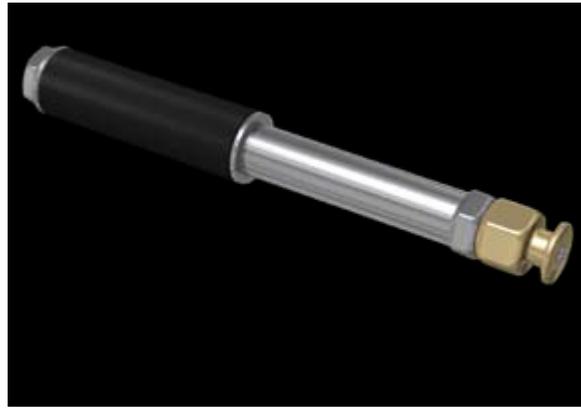
Les injecteurs sont des pièces de raccordement entre la pompe d'injection et la structure. Fournit une gamme complète d'injecteurs. Il existe deux types d'injecteurs:

Injecteurs mécaniques

Pour injection haute et basse pression quand il est possible de percer des trous.



Type MPS



Type MPR

Figure IV.9 : les injecteurs mécaniques

Injecteurs de surface

Pour injection basse pression, quand il n'est pas possible de percer des trous. [Net.3]



Figure IV.10 : Injecteur de surface

IV.2.6.Gainage

L'augmentation de l'épaisseur du mur en le gainant avec du béton armé peut être réalisée si sa résistance est insuffisante.

Il existe plusieurs types de gainages pour augmenter la résistance d'un mur (Fig. IV.11).

Le béton projeté est la technique la plus utilisée pour gainer un mur.

Si les deux contraintes de flexion et de cisaillement doivent être augmentées, il faut renforcer dans ce cas, en plus de l'âme du mur, ses deux extrémités. Les deux solutions de renforcement, gainage sur une face ou sur deux faces, sont possibles. La rigidification par

les deux faces, donne un meilleur comportement, cependant elle coûte plus chère et exige l'accès aux deux parties du mur (Fig. IV.12).

La gaine du mur doit être conforme aux critères suivants :

- Les caractéristiques mécaniques des nouveaux matériaux ne doivent pas être inférieures à celles des matériaux existants.
- L'épaisseur de la gaine doit être au moins égale à 5 cm dans la partie courante et 10 cm aux extrémités.
- Les sections d'aciers vertical et horizontal ne doivent pas être inférieures à 0.0025 fois la section de béton de mur.
- La section d'acier vertical concentrée aux extrémités ne doit pas être inférieure à 0.0025 fois la section de béton ajoutée.
- Le diamètre des aciers transversaux des potelets d'extrémités ne doit pas être inférieur à 8 mm, L'espacement de ces cadres ne doit pas être supérieur à l'épaisseur du mur et 15 cm.
- Le nouveau béton doit adhérer à l'ancien en rendant la surface du mur existant rugueuse et en réalisant des trous tous les 60 cm au maximum dans chaque direction. [6]

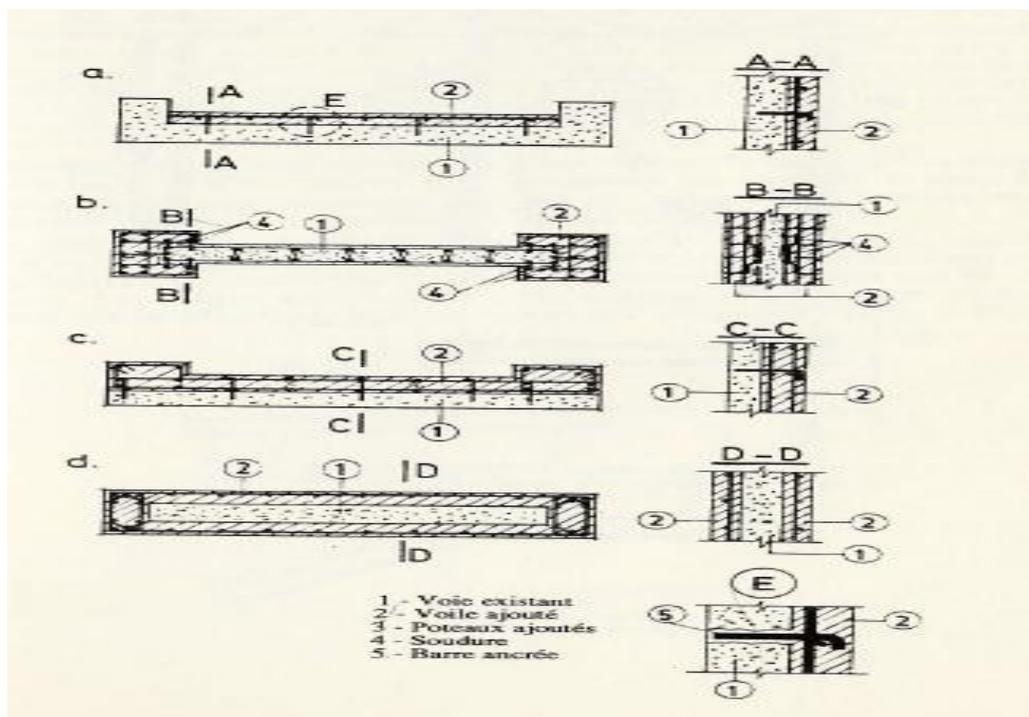


Figure IV.11 : Gainage des voiles

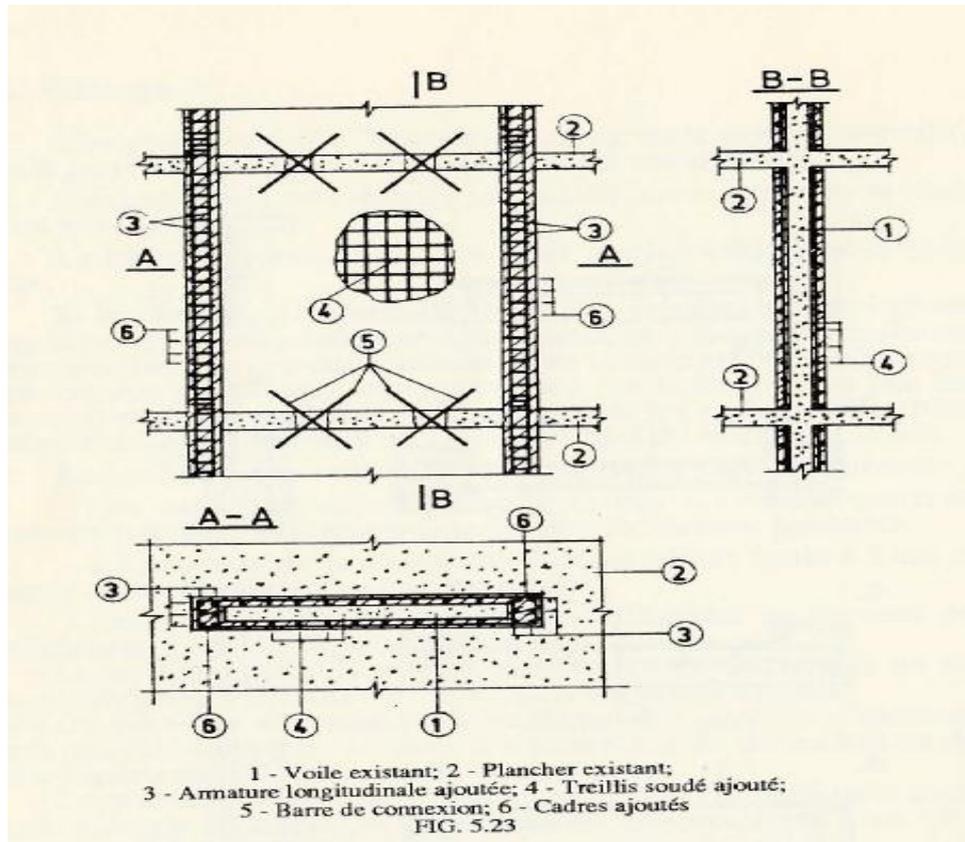


Figure IV.12 : Gainage des voiles [6]

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu les différentes méthodes de réparation et de renforcement d'un mur en béton armé. Quelle que soit la méthode, le principe est de rendre les sections d'acier et de béton initial ou de combler le manque de section par ajout d'un autre matériau.

Chapitre V:

Exemple de calcul

V. Exemple de calcul

V.1.Présentation de l'ouvrage

L'ouvrage à étudier est un bâtiment d'habitation. Il est composé d'un rez-de-chaussée, et de 05 niveaux. Il est implanté dans la **wilaya de Guelma**.

La structure de l'ouvrage est mixte en portiques et voiles avec interaction qui assure un contreventement mixte.

Caractéristiques de la structure

Les caractéristiques de la structure sont:

Largeur en plan 7.05m.

Longueur en plan 22.20m.

Hauteur totale du bâtiment (sans acrotère) 19.20m.

Hauteur du RDC 3,20m.

Hauteur d'étage courant 3,20m.

Données du site :

Le bâtiment est implanté dans une zone classée par le RPA 99/version 2003 comme zone de moyenne sismicité (zone IIa).

L'ouvrage appartient au groupe d'usage 2.

Le site est considéré comme ferme (S3).

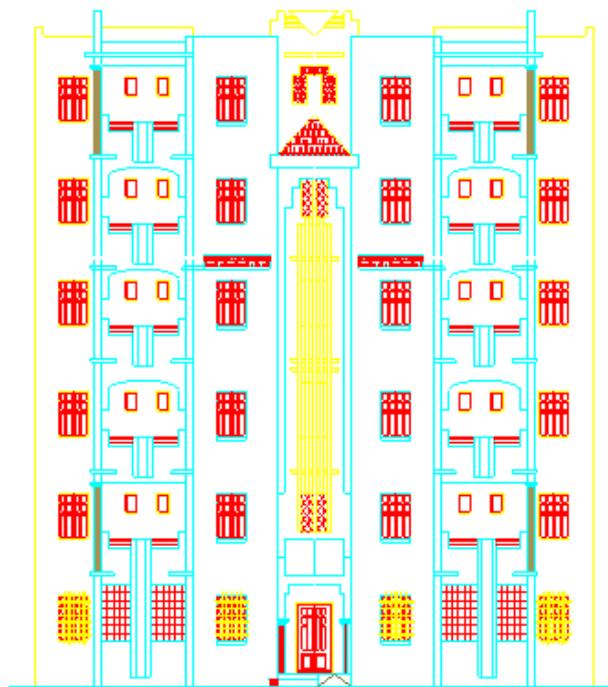
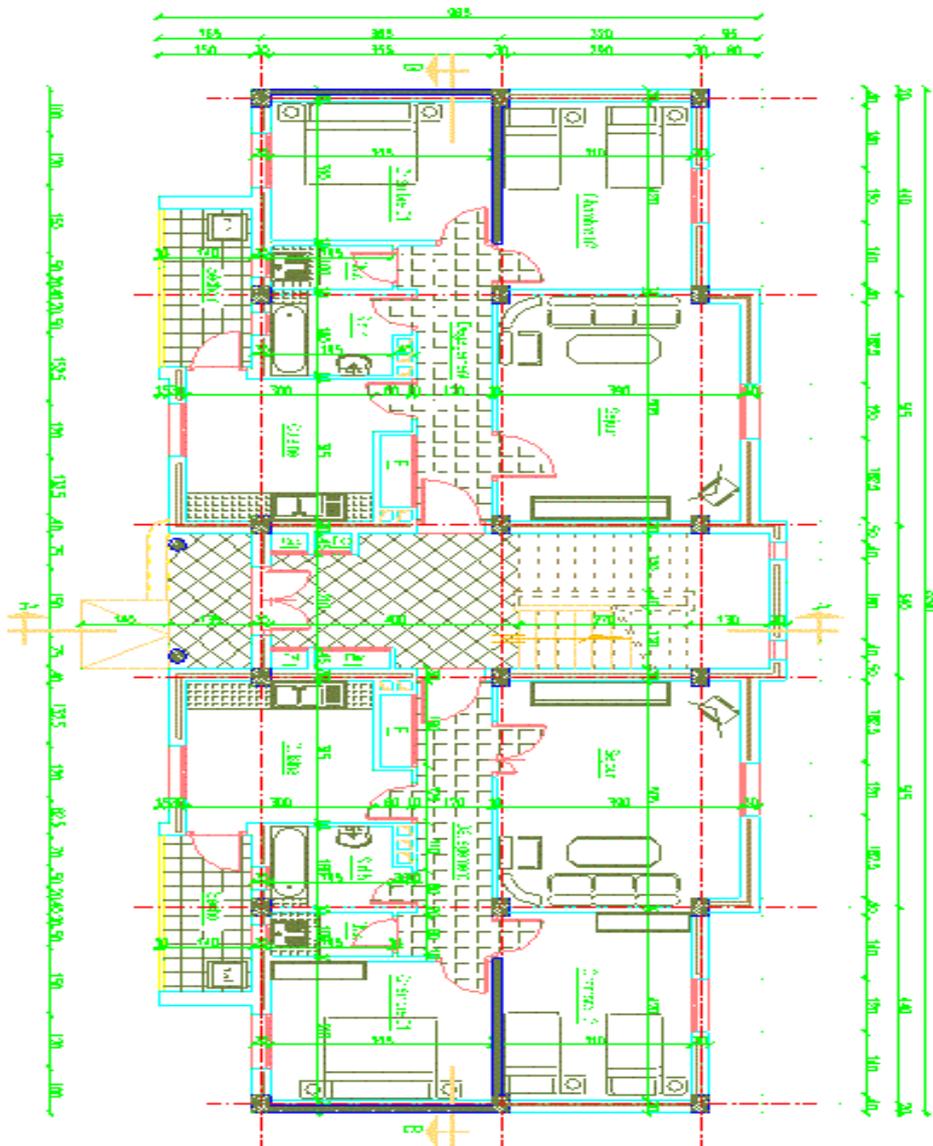
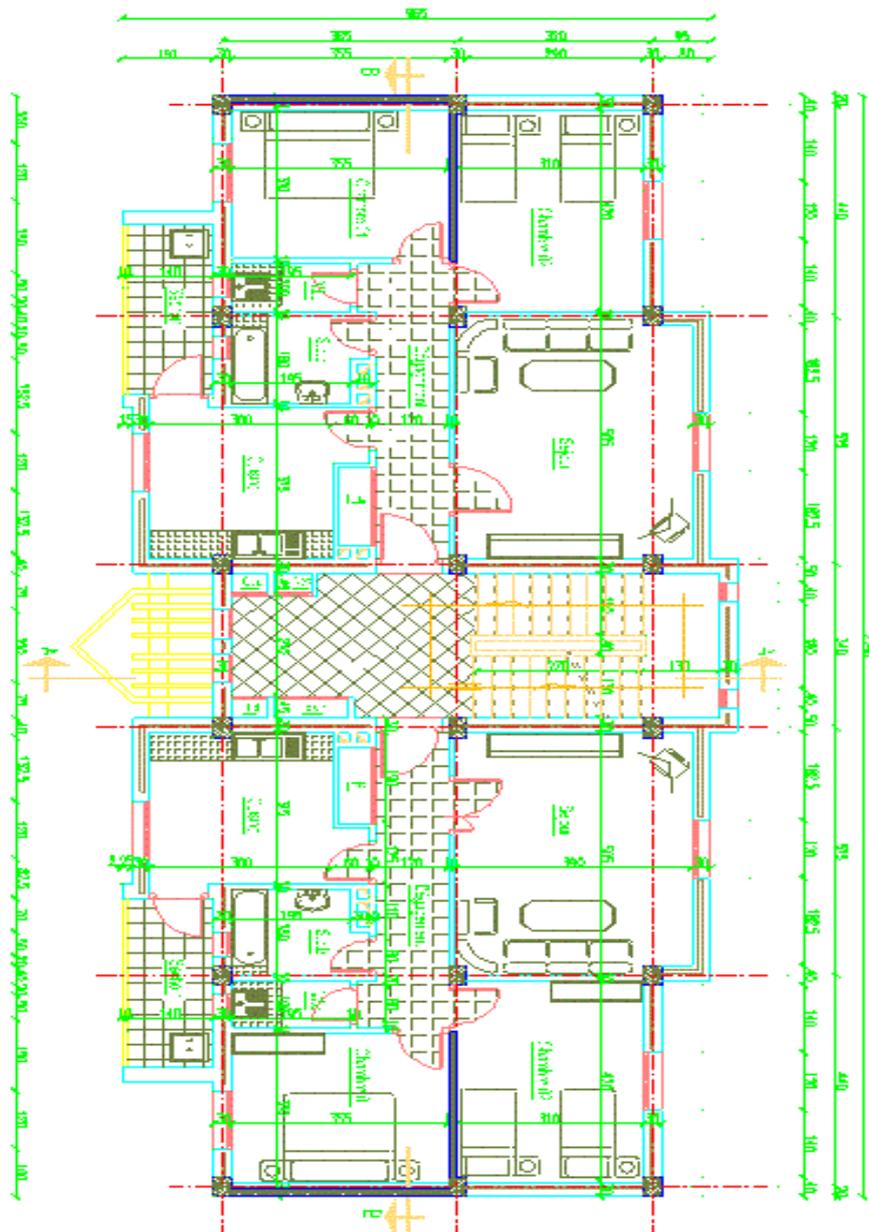


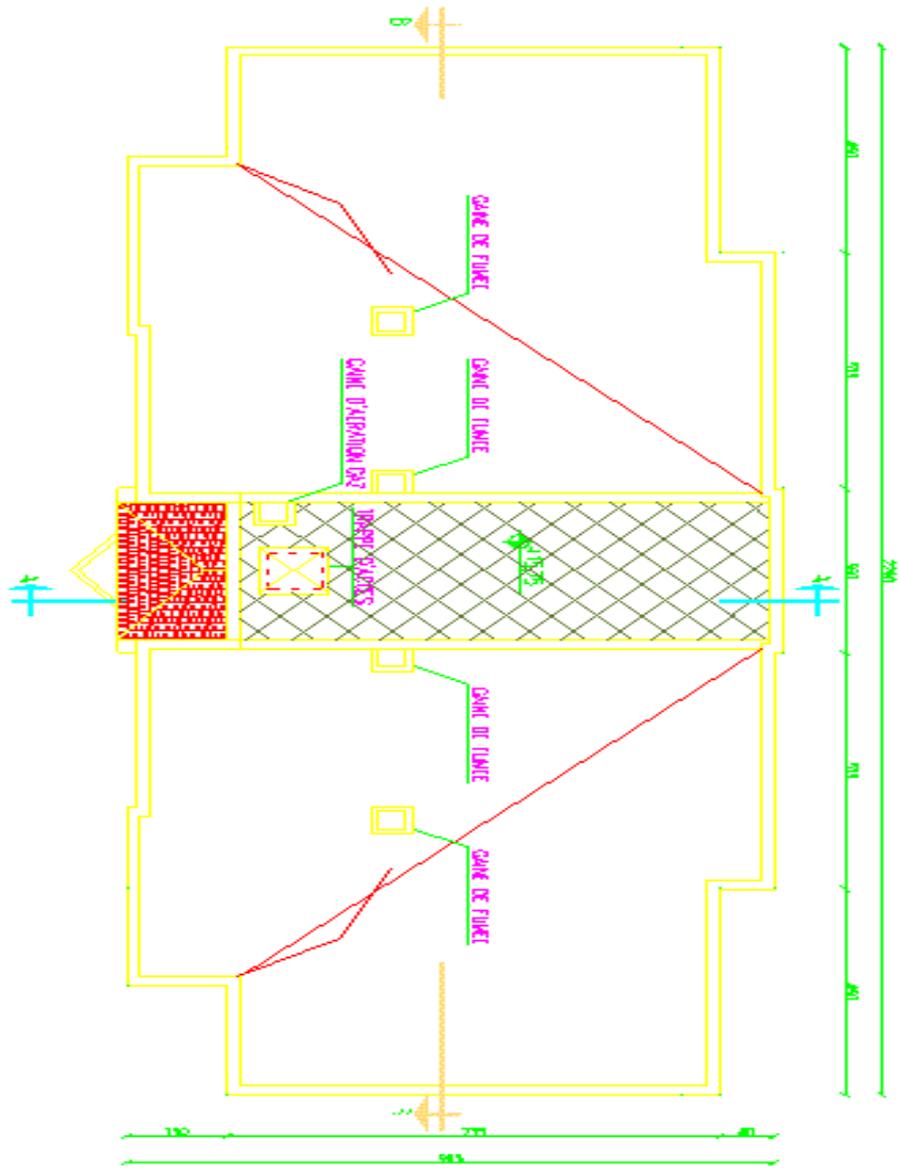
Figure V.1 : façade principale de la structure



Plan R.D.C



Plan étage courant



Plan de terrasse

Caractéristiques géométriques de la structure

Le centre gravite des masses est le barycentre des masses, et le point d'application de la résultante des forces horizontales extérieures (vent, séisme,...etc.)

Les éléments suivants seront pris en considération :

- Les planchers (dalles).
- Les voiles.
- Les poutres.
- Les poteaux.
- Les balcons.
- Les escaliers.

V.2.modélisation

V.2.1.Objectifs de l'étude dynamique

L'objectif initial de l'étude dynamique d'une structure est la détermination de ses caractéristiques dynamiques propres. Cela nous permet de calculer les efforts et les déplacements maximums lors d'un séisme.

L'étude dynamique d'une structure telle qu'elle se présente réellement, est souvent très complexe et demande un calcul très fastidieux voir impossible. C'est pour cette raison qu'on fait souvent appel à des modélisations qui permettent de simplifier suffisamment le problème pour pouvoir l'analyser.

V.2.2.Modélisation de la structure étudiée

Etant donné la difficulté et la complexité d'un calcul manuel des efforts internes (Moments, efforts normaux....etc.), dans les éléments structuraux, le code de calcul par éléments finis Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2010 est utilisé.

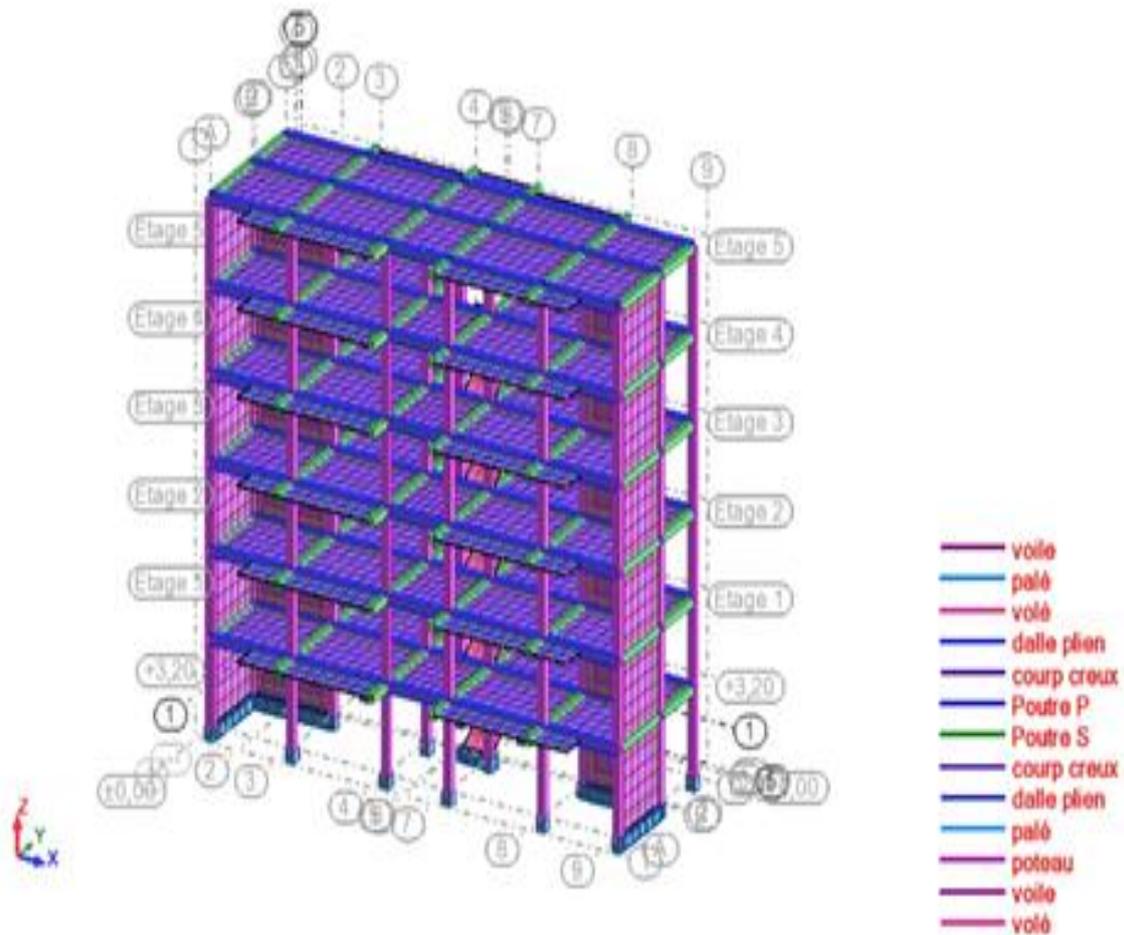


Figure V.2 : structure modélisé par Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2010

V.3.Calcul de la force sismique par la méthode statique euivalente (M.S.E)

V.3.1.Introduction

L'Algérie est un pays situe au nord de l'Afrique. Il est situé par sa géographie sur une zone côtière qui s'est avérée au fil de ces dernières années comme une zone a sismicité importante tout comme l'Asie du sud-est et le nord-est du continent Américain.

Vu cette situation, il nous est donc impératif de faire une étude de notre structure sous charges horizontales. Pour cela nous allons suivre un document pre-établi par les ingénieurs et chercheurs algériens dénommé : Règles Parasismiques Algériennes (R.P.A).

V.3.2. Principe de la méthode

Les forces réelles dynamiques qui se développent dans la construction sont remplacées par un système de forces statiques fictives dont les effets sont considères équivalents a ceux de l'action sismique. Le mouvement du sol peut se faire dans une direction quelconque dans le plan horizontale. Les forces sismiques horizontales équivalentes seront considérées appliquées successivement dans deux directions orthogonales caractéristiques choisies par le

projecteur. Dans le cas général, ces deux directions sont les axes principaux du plan horizontal de la structure.

Il faut souligner toutefois que les forces et les déformations obtenues pour l'élément à partir des méthodes d'analyse statiques pour les charges de conception recommandées. Ce dépassement des forces est équilibré par le comportement ductile qui est fourni par les détails de construction de l'élément. C'est pourquoi l'utilisation de cette méthode ne peut être dissociée de l'application rigoureuse des dispositions constructives garantissant à la structure :

- une ductilité suffisante
- une capacité de dissiper l'énergie vibratoire transmise à la structure par des secousses sismiques majeures.

Calcul de f_{c28} équivalent :

- Voile :

$$F_{c28 \text{ eq}} = \frac{S_1 \times F_{c28(1)} + S_2 \times F_{c28(2)}}{S_1 + S_2}$$

$$F_{c28 \text{ eq}} = \frac{(15 \times 320) \times 16 + (5 \times 320) \times 40}{(20 \times 320)}$$

$$F_{c28 \text{ eq}} = 22 \text{ MPa}$$

- Poutre :

$$F_{c28 \text{ eq}} = \frac{S_1 \times F_{c28(1)} + S_2 \times F_{c28(2)}}{S_1 + S_2}$$

$$F_{c28 \text{ eq}} = \frac{(30 \times 40) \times 16 + (30 \times 10) \times 40}{(50 \times 30)}$$

$$F_{c28 \text{ eq}} = 20.8 \text{ MPa}$$

V.3.3. Calcul de la force sismique totale

La force sismique totale V , appliquée à la base de la structure, doit être calculée successivement dans deux directions horizontales orthogonales selon la formule suivante :

$$V = \frac{A.D.Q}{R} \cdot W$$

Coefficient d'accélération de zone (A)

Le coefficient d'accélération de zone A est donné par le tableau 4.1 du RPA en fonction de la zone sismique et le groupe d'usage du bâtiment. Dans notre cas nous avons d'après le RPA :

(zone (IIa), groupe d'usage 2), donc on a $A = 0,15$.

Facteur d'amplification dynamique moyen (D)

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

$$D = \begin{cases} 2,5 \eta & 0 \leq T \leq T_2 \\ 2,5 \eta (T_2 / T)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3s \\ 2,5 \eta (T_2 / T)^{2/3} (3 / T)^{5/3} & T \geq 3s. \end{cases}$$

η : facteur de correction d'amortissement donnée par la formule :

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\xi}} \geq 0.7$$

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

Nous avons un contreventement mixte voiles -portiques donc on prend , $\xi = 10 \%$.

$$D'où : \eta = \sqrt{\frac{7}{2+\xi}} = 0,764$$

$$\eta = 0.764 \geq 0.7$$

Calcul de la période T

a) par la formule empirique : $T = C_T \cdot h_n^{\alpha}$ (FORMULE 4-6 DU RPA)

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

$$h_n = 19.20m$$

C_T : coefficient, fonction du système de contreventement et du type de remplissage. Il est donné par le tableau 4.6 du RPA.

Notre structure est en contreventement assure partiellement par des voiles en béton arme, ce qui donne **CT = 0.05**

Donc : $T = 0.05 \times 19.2^{3/4} = 0.46$ s, ou **T= 0.46s**

Calcul de la période caractéristique T2 :

La période caractéristique T2 est associée a la catégorie du site donnée par le tableau 4.7 du RPA.

Catégorie de site S2: **T2 = 0.5 s**

Coefficient de comportement (R)

Le Coefficient de comportement de la structure R est donnée par le tableau 4.3 en fonction du système de contreventement.

On a pour le système portiques contreventes par des voiles **R= 5**

· Facteur de qualité (Q)

Q = 1.2

Calcul de la force sismique statique V_{statique}

Cas 1 : (la structure avant le renforcement)

W=1332.30 t

$$V = \frac{A.D.Q}{R} \cdot W$$

$$V = \frac{0.15 \times 1.91 \times 1.2}{5} \times 1332.30$$

$V_{\text{statique}} = 91.60$ t

La force sismique donnée par la méthode dynamique :

$V_{\text{dynamique}} = 89.54$ t

Cas 2 : (structure avec poutres renforcées)

W=1362.30 t

$$V = \frac{A.D.Q}{R} \cdot W$$

$$V = \frac{0.15 \times 1.91 \times 1.2}{5} \times 1362.30$$

$$V_{\text{statique}} = 93.67 \text{ t}$$

La force sismique donnée par la méthode dynamique

$$V_{\text{dynamique}} = 91.90 \text{ t}$$

Cas 3 : (structure avec voiles renforcées)

$$W = 1371.20 \text{ t}$$

$$V = \frac{A.D.Q}{R} \cdot W$$

$$V = \frac{0.15 \times 1.91 \times 1.2}{5} \times 1371.20$$

$$V_{\text{statique}} = 94.28 \text{ t}$$

La force sismique donnée par la méthode dynamique

$$V_{\text{dynamique}} = 91.52 \text{ t}$$

D'après le RPA 99/version 2003 art 4.3.6 : la résultante des forces sismique a la base V_t obtenue par combinaison des valeurs, modales ne doit pas être inférieure à 80% de la résultante des forces sismiques déterminée par la méthode statique équivalente V pour une valeur de la période fondamentale

- Cas 1 :

$$V_{\text{dyn}} / V_{\text{stat}} = 0.98 > 0.8 \quad \text{Vérifiée}$$

- Cas 2 :

$$V_{\text{dyn}} / V_{\text{stat}} = 0.98 > 0.8 \quad \text{Vérifiée}$$

- Cas 3 :

$$V_{\text{dyn}} / V_{\text{stat}} = 0.96 > 0.8 \quad \text{Vérifiée}$$

V.3.4. Les résultats obtenu par le ROBOT

Tableaux de cas 1 (structure non renforcée)

Les résultats obtenus en utilisant le logiciel Robot sont mentionnés sur les tableaux suivants :

Tableau V.1 : masse de structure

Cas/Etage	Nom	Masse [kg]
6/ 1	Etage 1	225472,41
6/ 2	Etage 2	225472,41
6/ 3	Etage 3	225472,41
6/ 4	Etage 4	225472,41
6/ 5	Etage 5	225472,41
6/ 6	Etage 6	204943,85

Tableau V.2 : déplacement de structure

Cas	MAX UX [cm]	Noeud	MAX UY [cm]	Noeud
Cas 9	G+Q+EX			
Etage 1	0,1	5232	0,0	5111
Etage 2	0,1	5287	0,1	816
Etage 3	0,3	4871	0,2	918
Etage 4	0,4	5340	0,3	1022
Etage 5	0,6	5364	0,4	157
Etage 6	0,7	71	0,5	759
Cas 10	G+Q-EX			
Etage 1	0,0	1	0,0	358
Etage 2	-0,0	32	0,0	407
Etage 3	-0,1	88	0,0	455

Etage 4	-0,2	116	-0,0	503
Etage 5	-0,2	144	-0,1	551
Etage 6	-0,3	163	-0,1	167
Cas 11	G+Q+EY			
Etage 1	0,0	2718	0,1	14
Etage 2	0,1	5280	0,2	287
Etage 3	0,1	5304	0,3	116
Etage 4	0,2	5328	0,5	144
Etage 5	0,2	5352	0,6	172
Etage 6	0,3	5264	0,8	1713
Cas 12	G+Q-EY			
Etage 1	0,0	2717	0,0	367
Etage 2	-0,0	32	-0,0	407
Etage 3	-0,0	88	-0,1	74
Etage 4	-0,0	116	-0,2	102
Etage 5	-0,1	5193	-0,3	1070
Etage 6	-0,1	163	-0,4	1175

Les

déplacements des étages sont inférieurs aux valeurs limites imposées par le RPA99/VERSION 2003.

Tableau V.3 : les périodes et la participation des masses

Cas/Mode	Période [sec]	Masses Cumulées UX [%]	Masses Cumulées UY [%]
6/ 1	0,45	51.56	43,48
6/ 2	0,43	53,07	69,19
6/ 3	0,28	69,47	69,70
6/ 4	0,15	82.12	86,82
6/ 5	0,14	87.69	86,83

6/ 6	0,14	90.01	86,83
6/ 7	0,13	90.21	89,83
6/ 8	0,13	90.85	90,23
6/ 9	0,13	91.06	90,84
6/ 10	0,13	93.58	91,84

Interprétations des résultats obtenus :

- ❖ Selon art 4.2.4.4 du RPA la condition ($1.3 t_e < t$) est vérifiée.
- ❖ Le premier mode est un mode de translation suivant l'axe transversal (xx).
- ❖ Le 2^{ème} mode est un mode de translation suivant l'axe transversal (yy).
- ❖ Le 3^{ème} mode est un mode de torsion.
- ❖ Les facteurs de partition massique ont atteint plus de 90% aux modes 6^{ème}, 8^{ème} respectivement pour le sens X et Y.

Tableau de cas 2 (structure avec poutres renforcées)

L'analyse automatique par le logiciel robot a donné les résultats dans les tableaux suivants :

Tableau V.4 : masse de structure

Cas/Etage	Nom	Masse [kg]
8/ 1	Etage 1	230470,13
8/ 2	Etage 2	230470,13
8/ 3	Etage 3	230470,13

8/ 4	Etage 4	230470,13
8/ 5	Etage 5	230470,13
8/ 6	Etage 6	209941,57

Tableau V.5 : déplacement de structure

Cas	MAX UX [cm]	Noeud	MAX UY [cm]	Noeud
Cas 9	G+Q+EX			
Etage 1	0,0	5232	0,0	5111
Etage 2	0,1	5287	0,1	816
Etage 3	0,3	4873	0,2	917
Etage 4	0,4	5340	0,3	1021
Etage 5	0,5	5364	0,4	157
Etage 6	0,7	71	0,5	759
Cas 10	G+Q-EX			
Etage 1	0,0	1	0,0	358
Etage 2	-0,0	32	0,0	407
Etage 3	-0,1	88	0,0	455
Etage 4	-0,1	116	-0,0	503
Etage 5	-0,2	144	-0,1	551
Etage 6	-0,3	163	-0,1	166
Cas 11	G+Q+EY			
Etage 1	0,0	2722	0,1	14
Etage 2	0,1	5280	0,2	287
Etage 3	0,1	5304	0,3	116
Etage 4	0,1	5328	0,5	144
Etage 5	0,2	5352	0,6	172

Etage 6	0,2	5263	0,8	1713
Cas 12	G+Q-EY			
Etage 1	0,0	2717	0,0	353
Etage 2	-0,0	32	-0,0	407
Etage 3	-0,0	88	-0,1	74
Etage 4	-0,0	113	-0,2	102
Etage 5	-0,1	5193	-0,3	1070
Etage 6	-0,1	163	-0,4	1175

Les déplacements des étages sont inférieurs aux valeurs limites imposées par le RPA99/VERSION 2003.

Tableau V.6 : les périodes et la participation des masses de la structure avec les poutres renforcées

Cas/Mode	Période [sec]	Masses Cumulées UX [%]	Masses Cumulées UY [%]
6/ 1	0,45	7,02	57,68
6/ 2	0,42	52,47	69,20
6/ 3	0,28	70,12	69,69
6/ 4	0,14	91.13	86,93
6/ 5	0,14	91,13	86,93
6/ 6	0,14	93,28	86,93
6/ 7	0,13	93,29	86,93
6/ 8	0,13	96,29	90.03
6/ 9	0,13	96,35	91.11
6/ 10	0,13	96,36	95,93

Interprétations des résultats obtenus :

- ❖ Selon art 4.2.4.4 du RPA la condition ($1.3 t_e < t$) est vérifiée.

- ❖ Le premier mode est un mode de translation suivant l'axe transversal (xx).
- ❖ Le 2^{ème} mode est un mode de translation suivant l'axe transversal (yy).
- ❖ Le 3^{ème} mode est un mode de torsion.
- ❖ Les facteurs de partition massique ont atteint plus de 90% aux modes 4^{ème}, 8^{ème} respectivement pour le sens X et Y.

Tableaux de cas 3 (structure avec voiles renforcées)

L'analyse automatique par le logiciel robot a donné les résultats dans les tableaux suivants :

Tableau V.7 : masse de structure

Cas/Etage	Nom	Masse [kg]
6/ 1	Etage 1	231955,94
6/ 2	Etage 2	231955,94
6/ 3	Etage 3	231955,94
6/ 4	Etage 4	231955,94
6/ 5	Etage 5	231955,94
6/ 6	Etage 6	211427,38

Tableau V.8 : déplacement de structure

Cas	MAX UX [cm]	Noeud	MAX UY [cm]	Noeud
Cas 9	G+Q+EX			
Etage 1	0,0	5232	0,0	5111
Etage 2	0,1	5287	0,1	816
Etage 3	0,2	4871	0,2	918

Etage 4	0,4	5340	0,3	1022
Etage 5	0,5	184	0,4	157
Etage 6	0,6	71	0,5	48
Cas 10	G+Q-EX			
Etage 1	0,0	1	0,0	358
Etage 2	-0,0	32	0,0	407
Etage 3	-0,1	88	0,0	455
Etage 4	-0,1	116	-0,0	503
Etage 5	-0,2	144	-0,0	551
Etage 6	-0,3	160	-0,1	167
Cas 11	G+Q+EY			
Etage 1	0,0	5232	0,1	5097
Etage 2	0,0	5280	0,1	94
Etage 3	0,1	5304	0,3	303
Etage 4	0,1	5328	0,4	144
Etage 5	0,2	5352	0,5	172
Etage 6	0,2	5264	0,7	1713
Cas 12	G+Q-EY			
Etage 1	0,0	2717	0,0	367
Etage 2	-0,0	34	-0,0	407
Etage 3	-0,0	88	-0,1	74
Etage 4	-0,0	5169	-0,2	102
Etage 5	-0,1	5193	-0,3	1070
Etage 6	-0,1	163	-0,4	1175

Les déplacements des étages sont inférieurs aux valeurs limites imposées par le RPA99/VERSION 2003.

Tableau V.9 : les périodes et la participation des masses de structure avec voiles renforcés

Cas/Mode	Période [sec]	Masses Cumulées UX [%]	Masses Cumulées UY [%]
6/ 1	0,42	46,92	31,26
6/ 2	0,40	51,64	68,77
6/ 3	0,25	68,62	69,23
6/ 4	0,14	78,64	85,66
6/ 5	0,14	93,64	85,66
6/ 6	0,14	93,72	91.22
6/ 7	0,13	94,73	91.22
6/ 8	0,13	94,73	92.74
6/ 9	0,13	95,77	92.70
6/ 10	0,13	95,77	93.12

Interprétations des résultats obtenus :

- ❖ Selon art 4.2.4.4 du RPA la condition ($1.3 t_e < t$) est vérifiée.
- ❖ Le premier mode est un mode de translation suivant l'axe transversal (xx).
- ❖ Le 2^{ème} mode est un mode de translation suivant l'axe transversal (yy).
- ❖ Le 3^{ème} mode est un mode de torsion.
- ❖ Les facteurs de partition massique ont atteint plus de 90% aux modes 5^{ème}, 6^{ème} respectivement pour le sens X et Y.

Comparaison

Tableau V.10 : comparaison entre les masses

Etage	Masse cas 1	Masse cas 2	Masse cas 3
1	225472,41	230470,13	231955,94
2	225472,41	230470,13	231955,94
3	225472,41	230470,13	231955,94
4	225472,41	230470,13	231955,94
5	225472,41	230470,13	231955,94

6	204943,85	209941,57	211427,38
---	-----------	-----------	-----------

Tableau V.11 : comparaison entre les déplacements

étage	Déplacement MAX UX [cm]			Déplacement MAX UY [cm]		
	Cas 1 (structure original)	Cas 2 (Poutres renforcées)	Cas 3 (voiles renforcés)	Cas 1 (structure original)	Cas 2 (Poutres renforcées)	Cas 3 (voiles renforcés)
Cas 9	G+Q+EX					
Etage 1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Etage 2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Etage 3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2
Etage 4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3
Etage 5	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4
Etage 6	0,7	0,7	0,6	0,5	0,5	0,5
Cas 10	G+Q-EX					
Etage 1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Etage 2	-0,0	-0,0	-0,0	0,0	0,0	0,0
Etage 3	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0
Etage 4	-0,2	-0,1	-0,1	-0,0	-0,0	-0,0
Etage 5	-0,2	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,0
Etage 6	-0,3	-0,3	-0,3	-0,1	-0,1	-0,1
Cas 11	G+Q+EY					
Etage 1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
Etage 2	0,1	0,1	0,0	0,2	0,2	0,1
Etage 3	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3
Etage 4	0,2	0,1	0,1	0,5	0,5	0,4
Etage 5	0,2	0,2	0,2	0,6	0,6	0,5
Etage 6	0,3	0,2	0,2	0,8	0,8	0,7
Cas 12	G+Q-EY					
Etage 1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Etage 2	-0,0	-0,0	-0,0	-0,0	-0,0	-0,0
Etage 3	-0,0	-0,0	-0,0	-0,1	-0,1	-0,1
Etage 4	-0,0	-0,0	-0,0	-0,2	-0,2	-0,2
Etage 5	-0,1	-0,1	-0,1	-0,3	-0,3	-0,3
Etage 6	-0,1	-0,1	-0,1	-0,4	-0,4	-0,4

Tableau V.12 : comparaison entre les périodes

Mode		Les périodes		
Cas		Cas 1 (structure original)	Cas 2 (Poutres renforcées)	Cas 3 (voiles renforcés)
6/	1	0,45	0,45	0,42
6/	2	0,43	0,42	0,40
6/	3	0,28	0,28	0,25
6/	4	0,15	0,14	0,14
6/	5	0,14	0,14	0,14
6/	6	0,14	0,14	0,14
6/	7	0,13	0,13	0,13
6/	8	0,13	0,13	0,13
6/	9	0,13	0,13	0,13
6/	10	0,13	0,13	0,13

Tableau V.13 : comparaison globale

Cas	Comparaison		
	Cas 1 (structure original)	Cas 2 (Poutres renforcées)	Cas 3 (voiles renforcés)
Périodes fondamentales (s)	0,45	0.45	0.42
Participation des	x/ 91.01	91.13	93.64

masses (%)			
	y/ 90.23	90.03	91.22
Déplacement maximum (cm)	x/ 1.2	0.8	0.7
	y/ 1.1	0.9	0.8

Conclusion :

Dans ce chapitre on a étudié le renforcement des éléments par chemisage en béton (voiles et poutres). Le chemisage consiste à augmenter la section initiale de l'élément. Dans ce cas la rigidité de l'élément gainé augmente ce qui diminue considérablement le déplacement de la structure. L'augmentation de la section crée une différence de masse et de rigidité entre les différents étages. Généralement le chemisage augmente le poids des éléments structuraux, ce qui nécessite dans certain cas un redimensionnement des fondations.

Conclusion générale

Conclusion générale

Après réalisation des projets de construction certains éléments structuraux sont incapables de résister aux sollicitations appliquées à cause de la mauvaise qualité de béton. Dans ce cas la remise en état initial de l'élément est nécessaire. Ce qui nécessite des travaux de réhabilitation. Parmi les méthodes de réalisation et de renforcement on peut citer : le chemisage en béton, réparation des bétons, béton projeté, l'injection du béton et le renforcement par matériaux composites... etc.

L'objectif de notre mémoire est la recherche bibliographique sur la réhabilitation des poutres et des voiles en béton armé, le chemisage en béton permet d'augmenter la rigidité de la structure pour qu'elle puisse résister aux charges appliquées.

Pour le calcul pratique on a considéré un bâtiment à usage d'habitation (R+5) implanté à Guelma classé en zone sismique (IIa) en utilisant le logiciel ROBOT pour le calcul des sollicitations. Le cas envisagé est celui du chemisage en béton pour les poutres et les voiles.

Les résultats obtenus ont montré l'augmentation de la capacité en terme d'effort tranchant et par conséquent une réduction de la période et de déplacement.

Références bibliographiques

Bibliographie

- [1] A.PLUMIER, pathologie et réparations structurelles des constructions, ArGenCo, édition 2006.
- [2] Avis technique, CSTB, 2008.
- [3] Benjamin LACLAU et Nicolas SALMON, Étude des spécificités des bétons de la première moitié du 20^{ième} siècle et leur adaptabilité aux nouvelles technologies de renforts composites, Fonds communs de coopération AQUITAINE / EUSKADI 2008.
- [4] César DÍAZ GÓMEZ , Les techniques de réhabilitation : renforcer les structures, l'École technique supérieure d'Architecture de Barcelone, Université polytechnique de Catalogne, Espagne.
- [5] Document technique SIKA El-Djazair année2002.
- [6] F. Tebbal, catalogue des méthodes de réparation et de renforcement des ouvrages.
- [7] J. PERCHAT. «Béton armé, règles BAEL, pièces soumises à des sollicitations normales», technique de l'ingénieur, C2306-C2320, 1991.
- [8] J.A.CALGARO, maintenance et réparation des ponts, ENPC, année 1997.
- [9] J.V.MIRANDA, techniques et systèmes de renfort des structure en béton 2004.
- [10] JC Carlès entretien réparer et renforcer les ouvrages en béton armée, la précontrainte additionnelle: la conception et les études préalables, Ouvrages d'Art du CETE Méditerranée, 2007.
- [11] Mohcine Boukhar,« réhabilitation et renforcement des poutres au moyen des matériaux composites »,thèse magister en Génie civil, université de mentouri constantine. Juillet 2009.pp11- 29-40.

[12] Perfectionnement sur les techniques de réhabilitation et de renforcement des règlement eurocode8, conception et dimensionnement des structures pour leur résistance au séisme et document d'application nationale AFNOR 2000.

[13] structure, rencontres scientifique ,SOCOTEC-CTC année 2002.

[14] TANIA CROSTON, « étude expérimentale du comportement d'une poutre en béton arme en flexion 3 points réparée par matériaux composites (approche probabiliste) » thèse de docteur en Génie Mécanique Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, 20 juin 2006.

[15] Tania croston, « étude expérimentale du comportement d'une poutre en béton armé en flexion 3 points réparé par matériaux composite(approche probabiliste)»,thèse doctorat en Génie mécanique, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux.2006 .pp19-22.

Les sites internet :

[Net.1] : www.caue85.com/Restauration-renovation-et.html

[Net.2] : www.climamaison.com

[Net.3] : <http://fra.sika.com/>