

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

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



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : STRUCTURES

Présenté par : **HABBACHE Rihab**

Thème : Réhabilitation des structures en béton armé

Sous la direction de : **Dr. KHALDI. Nacera**

Juillet 2021

REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie « Dieu » le tout puissant,

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui ont participé au bon déroulement de mon travail, et qui m'ont permis de réaliser ce mémoire.

Je témoigne donc toute ma reconnaissance :

A ma famille pour les sacrifices qu'elle a fait pour que je termine mes études.

A mon encadreur Dr. KHALDI, qui a consacré son précieux temps pour m'aider à réaliser mon travail et qui s'est toujours rendue disponible pour me renseigner et a contribué à l'avancement du travail.

Au personnel de département de génie civil et d'hydraulique, pour les moyens qui ont été mis à ma disposition durant toute la durée de la formation.

A toutes mes amies pour leur aide, leur patience, leur compréhension et leur encouragement.

Enfin à tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près pour l'élaboration de ce mémoire.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

- *Mes très chers parents qui ont consacré toute leurs vies pour mon éducation et mes études et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance, je leurs souhaite tout le bonheur.*
- *Mes chers frères.*
- *Mon cher mari.*
- *Mon encadreur Dr. KHALDI. N.*
- *Mes adorables amies Maha et Khawla.*

HABBECHÉ Rihab

Sommaire

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 01

CHAPITRE 0 : Problématique

 Problématique. 03

 Objectif. 03

CHAPITRE I : Etude bibliographique

I.1- Introduction. 05

I.2- Les définitions générales (Pathologie; Réparation, Réhabilitation ; Rénovation, Restauration). 05

 Pathologie. 05

 Réparation. 06

 Réhabilitation. 06

✚ Rénovation.	07
✚ Restauration.	08
I.3- Différents types de réhabilitation.	08
✚ Réhabilitation légère.	08
✚ Réhabilitation moyenne.	08
✚ Réhabilitation lourde.	09
✚ Réhabilitation exceptionnelle.	09
I.4- Description des pathologies du béton armé.	09
I.4.1. La fissuration.	09
I .4.2. La carbonatation des bétons.	10
I.4.3. La corrosion des armatures.	11
I.4.3.1. Le phénomène de corrosion dans le béton armé.	11
I.4.3.2. Les causes de la corrosion.	12
I.4.3.3. Les conséquences de la corrosion.	13
I.4.4. Les autres causes de dégradation des bétons.	14
I.4.5. Classification générale des pathologies.	15

I.4.6. Les phases de dégradation.	16
I.5- Conséquences des désordres.	17
I.5.1. L'aspect de l'ouvrage.	17
I.5.2. La sécurité vis-à-vis des usagers.	17
I.5.3. La stabilité de la construction.	17
I.6- Conclusion.	17

CHAPITRE II : Techniques de diagnostic

II.1- Introduction.	18
II.2- Réalisation d'un diagnostic.	19
II.2.1. Choix des investigations.	20
II.2.2. Types d'investigations.	21
II.2.2.1. Investigations non destructives.	21
II.2.2.1.1. Relevé visuel.	22
II.2.2.1.2. L'analyse du ferrailage.	25
II.2.2.1.3. L'auscultation sonique.	27
II.2.2.1.4. Scléromètre.	29

II.2.2.2. Investigations destructives.	29
II.2.2.2.1. Test à la carbonatation.	30
II.2.2.2.2. Carottage.	32
II.2.2.2.3. Prélèvement d'acier.	32
II.2.2.2.4. Mesure du potentiel de corrosion.	33
II.3- Conclusion.	34

CHAPITRE III : Technique de réhabilitation

III.1- Introduction.	35
III.2- Techniques de réhabilitation.	35
III.3- Synoptique des étapes clés pour la réhabilitation d'ouvrages en béton.	36
III.4- Solutions de réhabilitation.	37
III.4.1.1. Ragréage.	37
III.4.1.2. Béton projeté.	37
III.4.1.3. Tissu de fibres de carbone.	41
III.4.1.4. Réparation avec remplacement d'armatures.	41
III.4.1.5. Chemisage des sections de béton.	42

III.4.1.6. Reconstitution de l'enrobage.	43
--	----

III.5- Conclusion.	44
--------------------	----

CHAPITRE IV : Durabilité et normalisation

IV. Durabilité et normalisation.	45
----------------------------------	----

IV.1- Durabilité.	45
-------------------	----

IV.1.1. Etablir un cadre d'utilisation des essais de durabilité dans un contexte d'évaluation de la durabilité des ouvrages existant.	46
---	----

IV.1.1.1. Essais de durabilité sur béton et ses constituants.	47
---	----

IV.2- Normes.	50
---------------	----

IV.2.1. Les normes des essais de durabilité des structures.	50
---	----

IV.2.2. Les normes de produit de réparation des structures.	52
---	----

CHAPITRE V : Etude d'un cas réel

V.1- Introduction.	57
--------------------	----

V.1.1. Localisation graphique du projet.	58
--	----

V.1.2. Présentation du projet.	58
--------------------------------	----

V.2- Etat des lieux avant le commencement des travaux.	59
--	----

V.2.1. Description de l'ouvrage.	59
----------------------------------	----

V.2.2. Désordres constatés.	60
V.2.3. Évaluation des dommages et ses causes.	63
V.2.4. Elaboration du rapport final d'expertise (l'expertise de projet).	65
V.2.4.1. Les causes et les solutions de dégradation de structures.	65
V.2.4.2. Les travaux à réaliser sont.	68
V.3- Conclusion	75

Conclusion générale

Annexe

Liste des figures

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I.1 : Pathologie de béton.	05
Figure I.2 : Réparation de béton.	06
Figure I.3 : Réhabilitation des immeubles d'Alger.	07
Figure I.4 : Rénovation du vieux bâti d'Alger.	07
Figure I.5 : Restauration de la Citadelle d'Alger (Palais du Dey) a la Casbah d'Alger.	08
Figure I.6 : Phénomène de carbonatation.	11
Figure I.7 : Phénomène de corrosion.	12
Figure I.8 : Processus de corrosion.	13
Figure I.9 : Dégradation due à la corrosion.	14

CHAPITRE II

Figure II.1 : Procédure d'élaboration d'une étude de réhabilitation.	18
Figure II.2 : Schéma du choix d'investigation.	20
Figure II.3 : Schéma des investigations non destructives.	22
Figure II.4 : Fissuromètre.	24

Figure II.5 : Mesure d'une fissure.	25
Figure II.6 : Réponse en fonction de la densité d'armature.	26
Figure II.7 : Principe de la détection linéaire.	26
Figure II.8 : Principe de la détection par fenêtre.	27
Figure II.9 : Mesure ultrasonique.	28
Figure II.10 : Scléromètre.	29
Figure II.11 : Schéma des investigations destructives.	30
Figure II.12 : Graphique enrobage-carbonatation.	31
Figure II.13 : Courbe $a\sqrt{t}$.	31
Figure II.14 : Instrument de carottage.	32
Figure II.15 : Prélèvement d'aciers.	32
Figure II.16 : Principe du potentiel de corrosion.	33
Figure II.17 : Mesure du potentiel de corrosion.	34

Chapitre III

Figure III.1 : Aciers dégagés, Application du mortier et finissage par taloche.	37
Figure III.2 : Projection par voie humide.	38

Figure III.3 : Projection par voie sèche.	39
Figure III.4 : Tissus de fibre de carbone.	41
Figure III.5 : Organigramme du processus de chemisage en béton armé.	43
Figure III.6 : La réparation d'une fissure à l'aide d'une injection.	44

Chapitre IV

Figure IV.1 : Carbonatation du béton.	46
Figure IV.2 : Les essais sur béton (compression traction ...).	48
Figure IV.3 : Les essais de Carbonatation.	48
Figure IV.4 : Essai de flexion sur ciment.	49
Figure IV.5 : Le dispositif normatif du béton.	56

Chapitre V

Figure V.1 : Site de l'hôtel.	57
Figure V.2 : Plan de situation.	58
Figure V.3 : Vue de l'hôtel avant la réhabilitation.	59
Figure V.4 : Eclatement de béton avec corrosion des armatures.	60
Figure V.5 : Trace d'infiltration d'eau.	61

Figure V.6 : Fissures et chutes des enduits de revêtement, déformation des faux plafonds.	61
Figure V.7 : Détérioration des complexes d'étanchéités des terrasses inaccessibles.	62
Figure V.8 : Dégradation du béton.	62
Figure V.9 : Détachement des couvres joints des façades.	63
Figure V.10 : Vue du parking après la réhabilitation.	73
Figure V.11 : Vue du jardin thématique principale.	73
Figure V.12 : Vue de la piscine.	74
Figure V.13 : Vue de l'entrée principale de l'hôtel Mermoura.	74

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Classification générale des pathologies liées au bâtiment. (Source J.Monjo-Carrio, 2011)	15
---	----

Chapitre III

Tableau III.1 : Types de préparation en fonction du type de dégradation	35
--	----

Tableau III.2 : Traitements et réparations en fonction des désordres	36
---	----

Tableau III.3 : Tableau comparatif (Ragréage v/s Béton projeté)	40
--	----

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Modes opératoires d'essais performantiels.	51
--	----

Tableau IV.2 : Méthodes d'essais relatives aux caractéristiques de durabilité, dans le projet de norme belge NBN B15.	52
--	----

Tableau IV.3 : Les principales normes relatives aux produits de réparation.	53
--	----

Tableau IV.4 : Parties de la norme EN 1504.	54
--	----

Tableau IV.4.1 : Principes et méthodes relatifs à la corrosion des armatures.	55
--	----

Résumé

Résumé:

Les désordres survenus au niveau des structures sont souvent dus aux dégradations des matériaux employés, ou au changement de fonctionnalité (exemple l'accroissement de surcharges d'exploitation), le manque d'entretien...

Etablir un bon diagnostic impose des connaissances particulières du comportement des bétons sous l'influence des agents agressifs auxquels il est exposé, de son comportement mécanique.

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

L'objectif de ce travail est précis, c'est d'arriver à réaliser une expertise et rassembler les facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages en béton armé et l'élaboration d'un plan de réhabilitation avec une étude d'un cas réel.

Mots clé : béton armé, dégradation, diagnostic, réhabilitation, durabilité.

Abstract:

Structural disorders are often due to the degradation of the materials used, or to the change in functionality (e.g. the increase in operating overloads), the lack of maintenance...

Establishing a good diagnosis requires particular knowledge of the behavior of concrete under the influence of the aggressive agents to which it is exposed, of its mechanical behavior.

After a diagnosis, and in order to remedy this problem, it is imperative to proceed with methods of either: rehabilitation, repair; or reinforcement.

The objective of this work is precise, that is to achieve an expertise and gather the factors influencing the degradation of reinforced concrete structures and the development of a rehabilitation plan with a real case study.

Keywords : reinforced concrete, degradation, diagnosis, rehabilitation, sustainability.

ملخص :

الاضطرابات التي تقع في الهياكل غالبا ما تكون نتيجة لتدهور المواد المستخدمة، أو لتغيرات في الوظائف (مثل زيادة الأحمال التشغيلية)، قلة الصيانة ...

يتطلب إنشاء التشخيص الجيد معرفة خاصة بسلوك الخرسانة تحت تأثير العوامل العدوانية التي تتعرض لها وسلوكها الميكانيكي.

بعد التشخيص، ولعلاج هذه المشكلة، فمن الضروري للغاية إما: إعادة التأهيل أو الإصلاح أو البناء. فهدف هذا العمل دقيق للغاية، وهو اكتساب الخبرة وجمع العوامل المؤثرة في تدهور المنشآت الخرسانية المسلحة ووضع خطة لإعادة التأهيل مع دراسة حقيقية للحالة.

كلمات البحث: الخرسانة، تدهور، التشخيص، إعادة التأهيل، الاستدامة.

Introduction générale

Introduction générale

De nombreuses études ont porté sur le développement de la maintenance des ouvrages en béton Armé qui consiste à protéger ces structures en assurant une résistance aux différentes sollicitations et catastrophe naturel dont ils peuvent être soumis.

Ceci en les renforçant afin d'améliorer les performances et la durabilité de ses ouvrages.

C'est une contrainte qui demeure préoccupante dans la mesure où le coût des ouvrages neufs est de plus en plus élevé et les conditions de réparation et de renforcement deviennent difficiles. [M.N.2017]

Le béton est un matériau employé depuis des millénaires, mais ce n'est qu'au XIX siècle qu'il connaît 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 devenu un 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 un bâtiment pour abriter des personnes ou dans des activités, ou autres ouvrages en béton armé, ils remplissent tous une ou plusieurs fonctions bien précises.

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.

Le diagnostic est un moment clé lorsqu'il y a présence de pathologies.

En effet, si la source du problème est mal diagnostiquée, les réparations préconisées ne correspondront pas réellement à ce qui est nécessaire et l'ouvrage sera toujours soumis aux mêmes attaques.

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 du simple revêtement appliqué sur le parement, 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 l'existant.

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 il sera nécessaire de prévoir des travaux de confortement.

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. [B.N.2011]

Chapitre 0 : *Problématique*

Chapitre 0 : Problématique

Problématique :

Le béton est un matériau susceptible de se dégrader sous l'effet de nombreuses causes.

La dégradation des ouvrages, anciens et récents, est inéluctable et concerne les gestionnaires à tous les niveaux, depuis l'agent territorial jusqu'au décideur au plus haut niveau.

Elle concerne tout particulièrement l'ingénieur qui doit en connaître les mécanismes, établir et justifier des propositions et mener des actions correctives tout en gérant la sécurité d'utilisation puis en tirer la leçon d'une part pour définir une politique de gestion et de maintenance, d'autre part pour améliorer la conception et l'exécution des ouvrages futurs.

Ces dégradations constituent une menace pour la durabilité de la structure.

La durabilité des ouvrages en béton armé dépend de leur comportement face aux conditions climatiques et environnementales qui existent dans les milieux où ils sont construits.

Ces ouvrages sont souvent exposés à de nombreuses agressions physico-chimiques auxquelles ils doivent résister afin de remplir de façon satisfaisante pendant leur période d'utilisation, toutes les fonctions pour lesquelles ils ont été conçus.

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.

Objectif :

L'objectif de cette étude est d'établir des recommandations pour guider dans le choix du mode de réhabilitation le mieux adapté pour une structure présentant des dégradations, et ceci en fonction de critères tels que le processus de dégradation concerné, les caractéristiques du béton armé, le milieu environnant, les contraintes et sujétions rencontrées, etc.

Et aussi s'intéresser aux principales causes des dégradations et les identifier donc c'est une des étapes les plus importantes et les plus difficiles de tout le processus de réparation des structures endommagées.

Une élaboration d'une base de connaissances qui servira de base à la formulation des règles d'optimisation du processus de l'établissement d'un diagnostic de dégradation des ouvrages en béton armé. La base de connaissances regroupe la majorité des phénomènes connus liés à la dégradation des ouvrages en béton.

Elle est organisée selon un raisonnement permettant de décrire ou d'identifier la plupart des dommages et phénomènes de dégradation d'origine chimique, mécanique ou de mise en œuvre.

Il n'est généralement pas possible d'évaluer la nécessité de réhabiliter une structure ou de choisir la ou les méthodes de réparation sans avoir, au préalable, bien identifié l'origine des dégradations.

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 classés monuments historiques.

À partir du moment où une pathologie est diagnostiquée, même si cela ne remet pas en cause la stabilité de l'ouvrage, il est important de diagnostiquer d'où vient le problème, et à quel degré il affecte l'édifice ensuite, il est nécessaire de supprimer le problème à la source et de réparer l'ouvrage.

Chapitre I :
Etude bibliographique

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1- Introduction :

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

Toutefois, il faut noter que les domaines d'action auxquels correspondent ces interventions, bien que comportant une partie commune qui est bien sûr le diagnostic, doivent être distingués l'un de l'autre. [O.K.2015]

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. [M.I et all.2013]

I.2- Les définitions générales (Pathologie; Réparation, Réhabilitation ; Rénovation, Restauration) :

❖ Pathologie :

La pathologie est le terme employé pour définir les dégradations subies par les maçonneries altérées pas le temps. L'humidité est la cause principale de la plupart d'entre elles, elle prédispose les constructions à des mouvements de tassements qui engendrent des fissures. Le diagnostic de réparation d'une bâtisse doit permettre de découvrir les causes des dégradations pour les éliminer de manière à garantir l'opération de restauration. [H.M.2013]

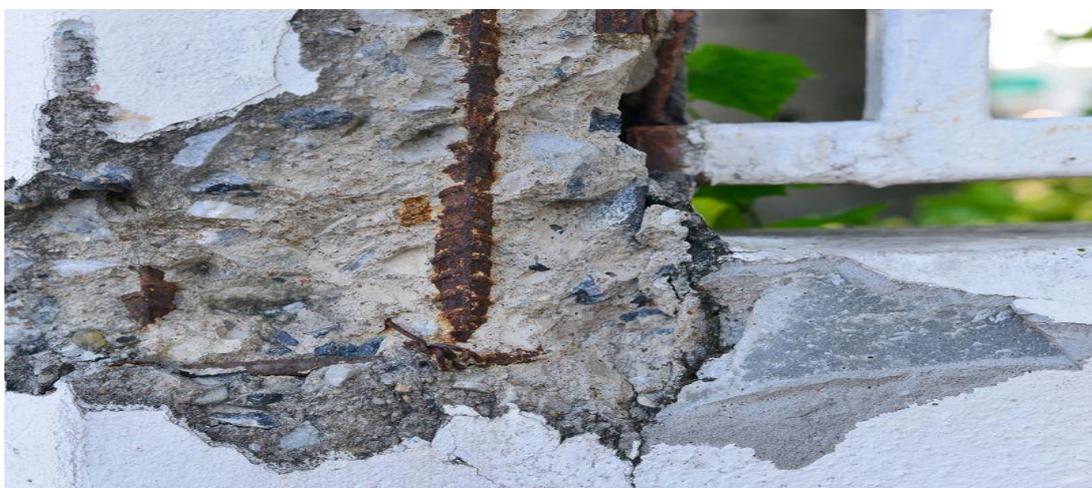


Figure I.1 : Pathologie de béton.

❖ Réparation :

La réparation d'une structure est une opération qui consiste à lui restituer, par des travaux appropriés, un niveau de service perdu, la baisse du niveau de service peut résulter de toutes sortes de causes ; les plus fréquentes sont la dégradation progressive des matériaux (agressions atmosphériques, modification des propriétés des matériaux), l'utilisation intensive (effet de répétition des charges) voire abusive (utilisation au-delà des charges prévues), les accidents et sinistres (incendies, choc ,séisme,...). [O.K.2015]

La réparation d'un ouvrage est la deuxième étape dans le processus de réhabilitation d'ouvrages en béton armé. [H.M.2013]

La « réparation » représente une intervention plus conséquente au niveau de l'ouvrage ou du matériau. La réparation des bétons nécessite de connaître le support à réparer, les matériaux de réparation et l'environnement dans lequel ils sont mis en œuvre, et de comprendre les mécanismes à la base de l'adhésion. Les compatibilités dimensionnelle, électrochimique, chimique et porosimétrique sont essentielles pour une réparation durable. [Net 1]

Il existe principalement deux méthodes de réparation du béton armé. Il y a la méthode traditionnelle du ragréage ainsi que la technique du béton projeté.

Cependant, une troisième méthode, plus récente, commence à se développer : l'utilisation des tissus de fibres de carbone (TFC). [H.M.2013]



Figure I.2 : Réparation de béton.

❖ Réhabilitation :

"Réhabilitation" : apporter le confort des normes d'aujourd'hui. [M.I et all.2013]

Englobe l'ensemble des actions en vue de récupérer et d'améliorer un édifice en l'adaptant à un usage de confort moderne. [J.P.1997].

L'objectif fondamental consiste à éliminer les anomalies constructives ou fonctionnelles accumulées au cours du temps, à moderniser installations, équipements et organisation des espaces, améliorant ainsi son fonctionnement et le préparant à une utilisation actuelle. [B.S.2010].

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. [M.I et all.2013]



Figure I.3 : Réhabilitation des immeubles d'Alger.

❖ **Rénovation :**

Rénovation : rebâtir à neuf.

Englobe les actions qui s'attaquent à un tissu urbain dégradé, en l'éliminant pour le remplacer par une occupation nouvelle et actuelle, attribuant à la zone une nouvelle structure urbaine et fonctionnelle généralement avec ou sans lien avec la préexistante. [O.K.2015]



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

❖ Restauration :

Englobe l'ensemble des actions nécessaires à la conservation d'un édifice et à la récupération de son image qu'il s'agisse de sa conception originale ou du moment historique où il a atteint son apogée, en maintenant la plus grande fidélité possible aux techniques et matériaux de construction de l'époque. [O.K.2015]

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

Redonner au bâtiment caractère un bon moyen d'éviter les désordres de tout genre : employer les matériaux d'origine selon les techniques d'époque .La restauration demande un savoir-faire de spécialiste. [K.S.2017]



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

I.3- Différents types de réhabilitation :

On distingue plusieurs niveaux de réhabilitation :

✱ **Réhabilitation légère :** Sans travaux sur les parties communes.

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

- Les enduits ;
- Le nettoyage ;
- Le remplacement de la menuiserie.

✱ **Réhabilitation moyenne :** Des travaux plus complets sur les parties privatives.

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

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

※ **Réhabilitation lourde** : Redistribution des pièces, réfection des toitures, travaux touchant les gros œuvres.

Elle concerne les bâtiments dont la structure porteuse est sérieusement endommagée et l'état de la restauration et la réhabilitation se distinguent par leur rapport à la continuité et au changement. L'une est dévolue au maintien de la forme bâtie, sans égard particulier pour l'évolution éventuelle de son contenu ; l'autre transforme un bâtiment pour en actualiser à la fois le programme et la construction. Cette modification d'un lieu existant impose des arbitrages entre les exigences patrimoniales, sociales et économiques, qui nécessitent la médiation d'un acte architectural fortement empreint de culture sure est très avancé. Il s'agit dans ce cas de renforcer la structure ou de la remplacer. [O.K.2015]

※ **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 degrés d'altération très important comprenant le renforcement des structures ou leur remplacements si le besoin et par endroit (cage d'escalier, toiture, étanchéité) il arrive que cette dernière aille jusqu'à la reprise de structure porteuse de l'habitation si la stabilité de cette dernière s'avère atteinte en profondeur. [M.I et all.2013]

I.4- Description des pathologies du béton armé :

Dans cette partie, nous nous intéresserons aux principales pathologies apparaissant dans le béton armé durci. Ces pathologies ont des causes et conséquences variables. Elles sont décrites dans la suite.

I.4.1. La fissuration :

Il est important avant tout de souligner qu'il est impossible aujourd'hui d'éviter la fissuration du béton arme, que ce soit lors de la mise en œuvre le béton durci, du au vieillissement du matériau.

Les causes de la fissuration sont multiples, mais peuvent être répertoriées en quatre catégories:

- Les causes dues aux propriétés des matériaux, avec par exemple le retrait suite à l'évaporation de l'eau de gâchage, le gonflement liant ou encore à la résistance mécanique de la cohésion du liant.

- Les causes directes externes, avec notamment les déformations excessives sous l'action des charges ou encore des déformations sous l'action des variations de température ou sous l'action de l'humidité.
- Les causes externes indirectes, à savoir les répercussions sur certaines structures d'actions provenant d'autres éléments tels que les tassements différentiels des fondations.
- Les causes dues à un phénomène de corrosion des armatures, les armatures corrodées ayant un volume plus important que les aciers en bon état, l'état de Contrainte du béton au droit d'une armature corrodée est plus important et la fissuration s'enclenche.

Parmi les différents types de fissures, on distingue principalement trois catégories :

- Le faïençage, c'est un réseau caractéristique de microfissures qui affecte principalement la couche superficielle du béton
- Les microfissures, ce sont des fissures très fines dont la largeur est inférieure à 0,2 mm
- Les fissures, ce sont des ouvertures linéaires au tracé plus ou moins régulier dont la largeur est d'au moins 0,2 mm

Il est important lors du processus de réhabilitation d'un ouvrage, de s'intéresser à l'évolution de la largeur d'une fissure. Il est possible de classer les fissures en trois catégories selon leur évolution :

- Les fissures passives ou mortes, pour les fissures dont les ouvertures ne varient plus dans le temps, quelles que soient les conditions de température, d'hygrométrie ou de sollicitation de l'ouvrage. Cependant, elles sont rares, car les matériaux alentour a la fissure varient selon la température, c'est le phénomène de dilatation thermique.
- Les fissures stabilisées, lorsque leur ouverture varie dans le temps en fonction de la température.
- Les fissures actives ou évolutives, lorsque leur ouverture continue à évoluer indépendamment des cycles de température. [L.M]

I.4.2. La carbonatation des bétons :

La carbonatation dans le béton armé correspond à un phénomène chimique. Le CO₂ l'air réagit avec l'hydrate de chaux présent dans le béton. Cette réaction forme du Carbonate de Calcium et de l'eau. L'écriture simplifiée de cette réaction est la suivante



Cette réaction a pour conséquence que les deux bases alcalines présentent dans le béton sont :

Consommées, il y a donc une diminution du pH du béton. La valeur initiale du pH du béton de jeune âge est aux environs de 13 à 13,5. Après carbonatation il est autour de 9.

La carbonatation génère une modification lente de la structure du matériau et un changement de son comportement. Certes elle a un effet néfaste en réduisant la protection chimique des armatures, mais elle est aussi bénéfique en améliorant la résistance mécanique et la résistance aux eaux agressives.

Le schéma de la carbonatation peut être représentée de la manière suivante: [L.M]

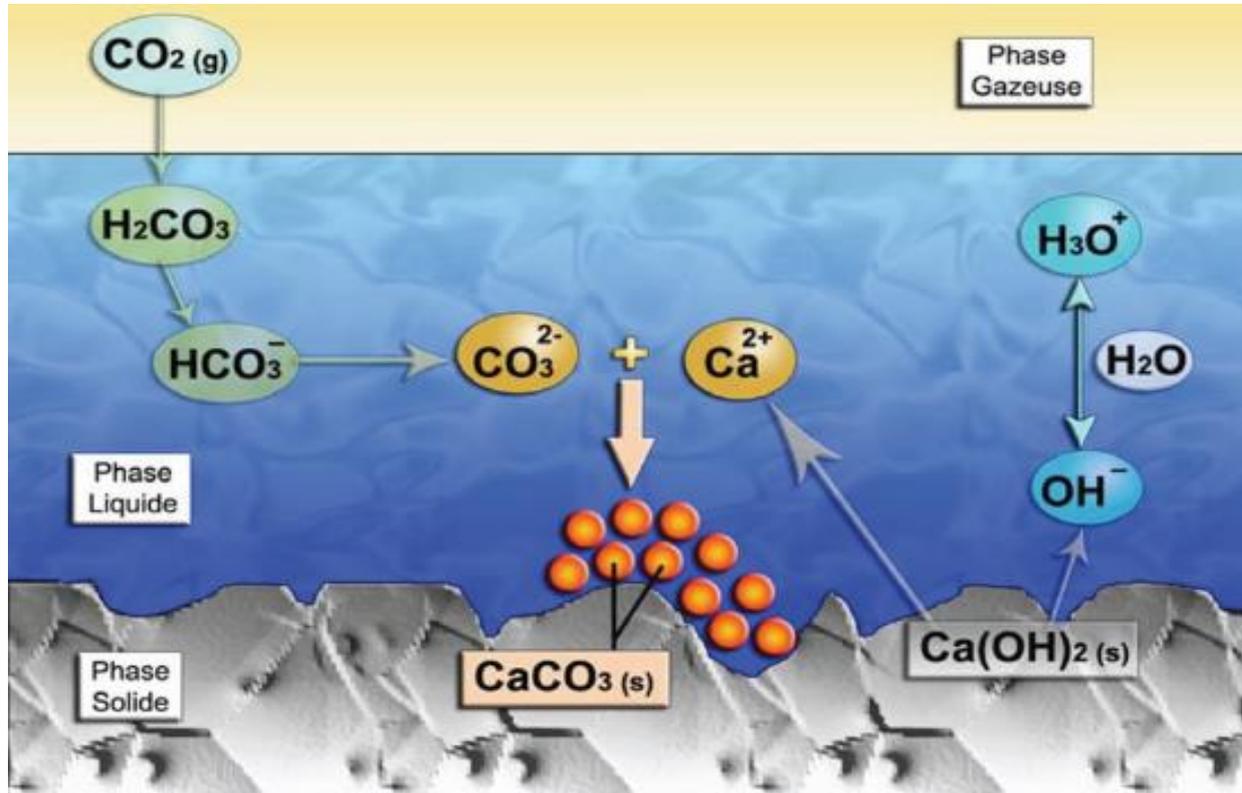


Figure I.6 : Phénomène de carbonatation.

I.4.3. La corrosion des armatures :

I.4.3.1. Le phénomène de corrosion dans le béton armé :

La corrosion est une réaction chimique ou électrochimique entre un matériau, généralement un métal, et son environnement qui entraîne une dégradation du matériau et de ses propriétés.

Ces phénomènes touchent tous les types d'ouvrages en béton armé :

- ✓ les bâtiments ;
- ✓ les bâtiments industriels ;
- ✓ les ponts et ouvrages d'art ;
- ✓ Les ouvrages. [M.I et all.2013]

Le béton sain ayant un pH de l'ordre de 13 correspond à un milieu naturellement protecteur pour les armatures. Autour des aciers se forme un film passif, une solution solide de $\text{Fe}_3\text{O}_4 - \text{Fe}_2\text{O}_3$, permettant de réduire voir d'arrêter la vitesse de corrosion. La dépassivation de l'acier

peut se faire dans les cas où le béton d'enrobage est carbonaté ou si la teneur en chlorure est élevée. Après destruction du film passif, un phénomène de pile électrochimique se met en place, le milieu électrolytique étant constitué par la solution interstitielle du béton.

Au niveau de la zone correspondant à l'anode, l'acier se dissout, entraînant une production d'électrons qui seront consommés au niveau de la cathode par réduction d'oxygène. Cette réaction entraîne la formation d'ions hydroxyle OH^- réagissant avec les ions ferreux produits au niveau de l'anode. En présence d'oxygène, il se forme à l'anode des oxydes et hydroxydes de fer gonflants. [L.M]

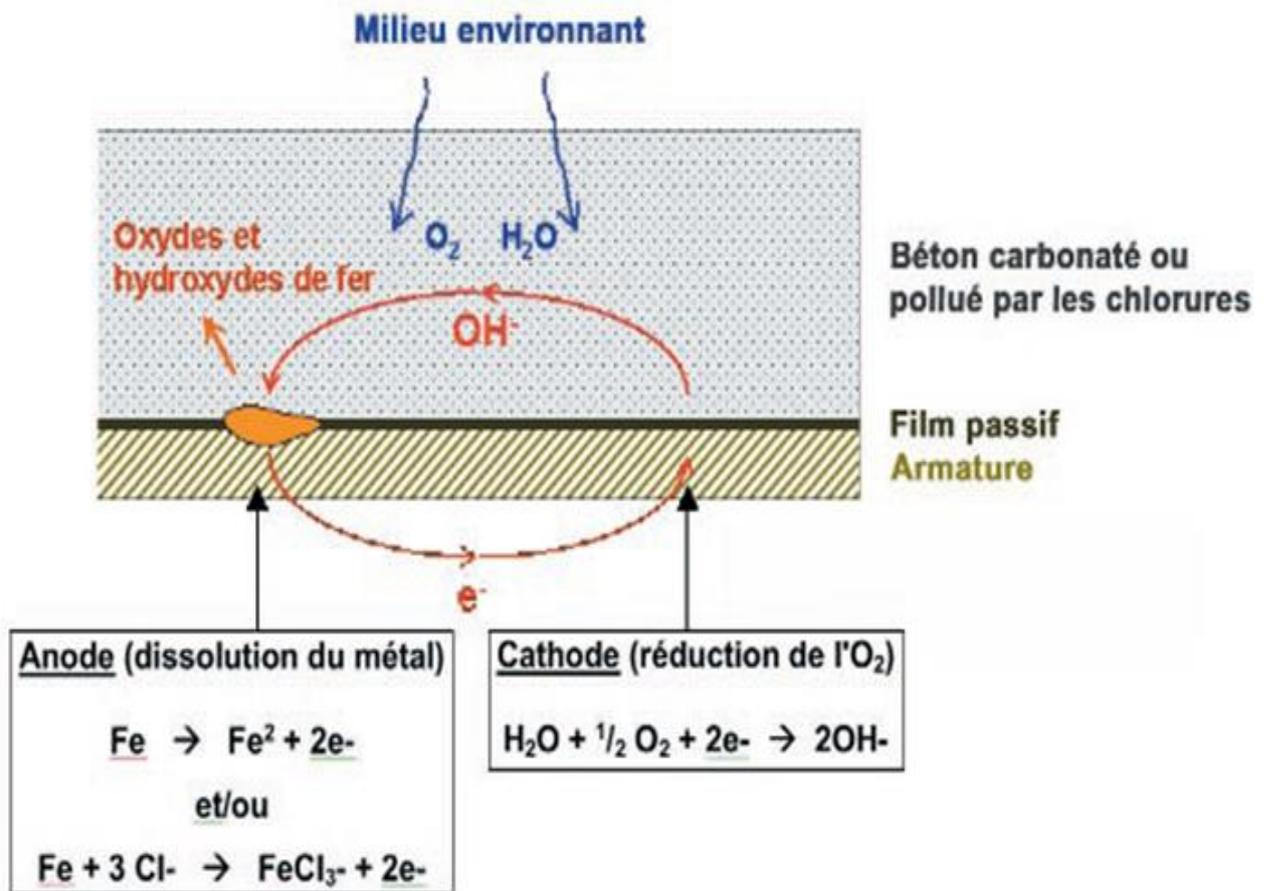


Figure I.7 : Phénomène de corrosion.

I.4.3.2. Les causes de la corrosion :

On distingue principalement deux facteurs favorisant l'apparition de la corrosion dans le béton armé. Tout d'abord, il y a la carbonatation du béton, lorsque le pH du béton descend en dessous de 9 les armatures ne sont plus passivées. Ce phénomène est occasionné par la réaction entre les hydrates de la pâte de ciment et le CO_2 atmosphérique. L'autre facteur étant les chlorures, la passivation s'opère lorsque la teneur en chlorures au niveau des armatures dépasse un certain seuil. Il est admis que ce seuil correspond à une teneur de 0,4% par rapport à la masse du ciment. Le schéma suivant décrit le principe de corrosion dans le béton armé : [L.M]

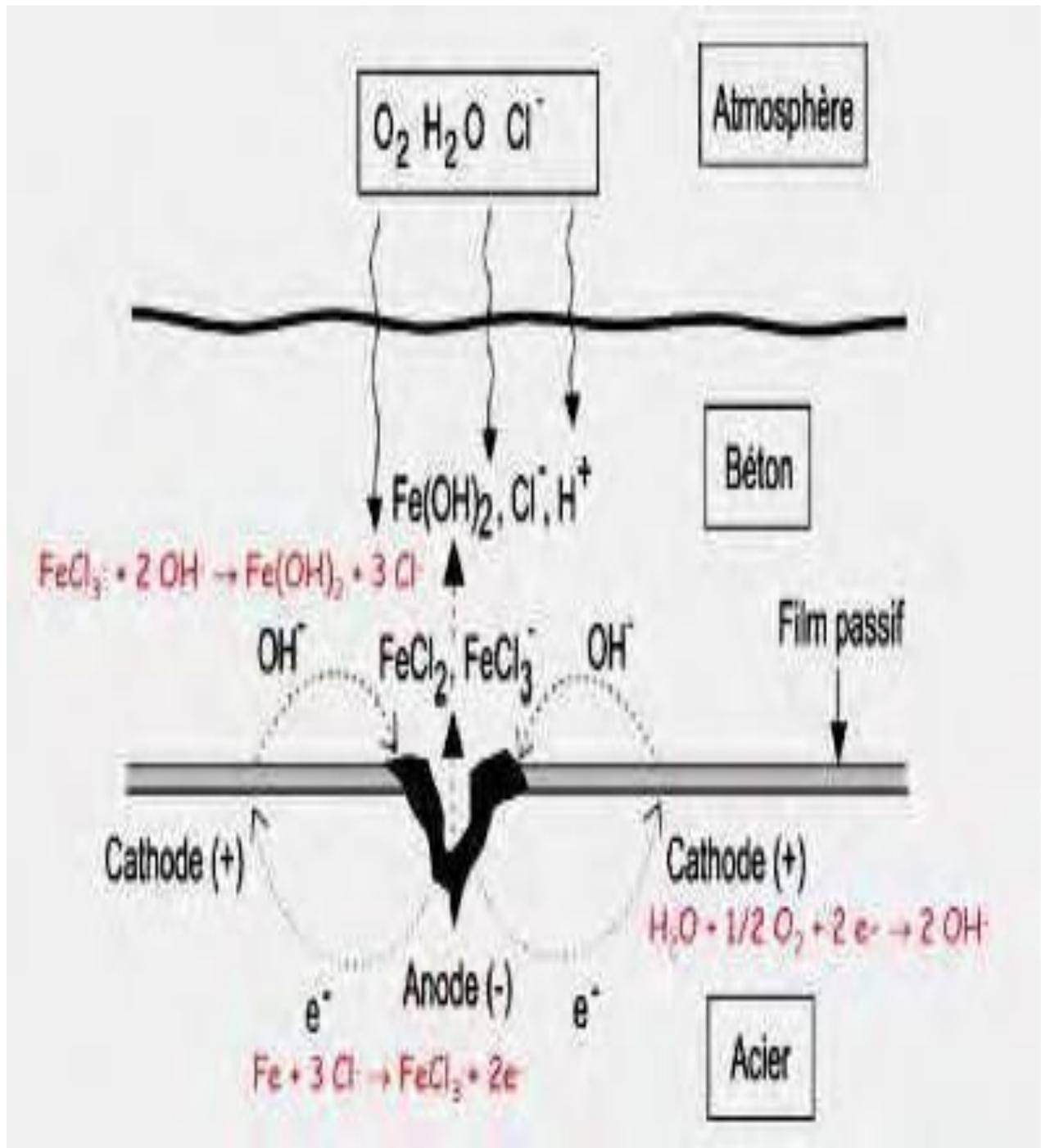


Figure I.8 : Processus de corrosion.

I.4.3.3. Les conséquences de la corrosion :

La formation de la corrosion s'effectue aux dépens de métal d'origine. Ce phénomène entraîne à la fois une augmentation importante de volume ainsi qu'une perte de la section efficace de l'armature. Cela a pour conséquences d'une part l'apparition de différentes pathologies au niveau du parement suite à l'augmentation de volume, mais aussi une perte de capacité portante due à la diminution de la section efficace. Ces pathologies peuvent être des fissures, des épaufrures, des décollements, ... [L.M]



Figure I.9 : Dégradation due à la corrosion.

I.4.4. Les autres causes de dégradation des bétons :

Nous avons vu que les bétons se dégradent à cause des milieux dans lesquels ils sont placés car ils y subissent des agressions physiques et chimiques. Certaines causes, essentiellement dues à une mauvaise mise en œuvre, peuvent également participer à la dégradation des bétons.

- ✓ Mauvais positionnement des armatures : Les armatures (généralement en acier) placées trop près du parement béton lors du coulage provoquent à terme des fissurations de surface.
- ✓ Mauvaise qualité des bétons employés : Un béton trop faiblement dosé en ciment, mal vibré, présentera un aspect défectueux : nids d'abeilles, faïençage, fissures superficielles, trous laissant les armatures apparentes.
- ✓ Vibration trop importante : Une vibration trop longue peut entraîner une ségrégation du béton et par conséquent une mauvaise répartition des constituants. Les efforts mal répartis entraînent alors des fissurations et des élancements du béton.
- ✓ Absence de cure du béton : La cure du béton est indispensable par temps chaud venté. Sans protection de surface, le béton se faïence en surface.
- ✓ Cycle humidité / sécheresse : Les cycles répétés d'humidité/sécheresse entraînent des variations dimensionnelles du béton pouvant créer des fissures et par conséquent la corrosion des aciers. [M.I et all.2013]

I.4.5. Classification générale des pathologies :

Le tableau ci-dessous regroupe les différentes pathologies qui peuvent atteindre un bâtiment.

Elles y sont classées en trois grandes catégories ; physique, mécanique et chimique, avec en complément le détail de leur typologie et de leur origine.

L'étude de ces pathologies constitue une étape majeure dans le processus de la réhabilitation- que nous aborderons en aval- notamment au stade de l'élaboration du diagnostic, étape déterminante dans la définition des interventions à mener sur le bâtiment. [M.I et all.2013]

Tableau I.1 : Classification générale des pathologies liées au bâtiment. (Source J.Monjo-Carrio, 2011).

Famille	Lésions	Types
Physique	Humidité	Capillaire/De filtrage/De condensation/Accidentelle/De Travaux
	Saleté	Par dépôt / Par nettoyage différentiel
	Erosion	Météorologique
Mécanique	Déformations	Tassement/Effondrement/Flambement/Gauchissement/ Flèche
	Fissures	Par charge / Par dilatation - contraction
	Fissures superficielles	Par support / Par finition
	Détachements	Finitions continues / Finitions par éléments
	Erosion	Coups / Frottements

Chimique	Efflorescence	Sels solubles cristallisés/Réaction chimique avec les sels
	Oxydation	Oxydation superficielle
	Corrosion	Oxydation préalable/Immersion/Aération différentielle/Paire galvanique
	Organismes	Présence et attaque d'animaux/Présence de plante
	Erosion	Pollution

I.4.6. Les phases de dégradation :

La dégradation du béton armé comporte deux phases successives :

- Une phase d'incubation ou de latence (dite parfois d'amorçage) qui correspond à l'altération lente du béton, sans qu'il ne se produise encore des effets visibles,
- Une phase de développement (dite parfois de croissance) des dégradations du matériau.

La phase d'incubation s'arrête :

- ✦ Soit lorsque les produits formés par les réactions internes du ciment atteignent un «volume critique » provoquant un gonflement néfaste du béton (par exemple, par réaction sulfatique),
- ✦ Soit lorsque l'enrobage de béton ne protège plus les aciers contre la corrosion (par exemple, si l'enrobage est carbonaté).

La phase de développement est celle où les dégradations sont visibles. [M.I et all.2013]

I.5- Conséquences des désordres :

I.5.1- L'aspect de l'ouvrage :

Les efflorescences et les taches de rouille conséquence de la pénétration d'agents agressifs dans l'enrobage de béton, altèrent l'aspect de l'ouvrage. Ce point est parfois considéré comme étant de peu d'importance, par le gestionnaire des ouvrages. Par contre, ce sont les fissurations et les fracturations du béton qui commencent à inquiéter le gestionnaire, car des éclats de béton peuvent se produire.

I.5.2 - La sécurité vis-à-vis des usagers :

Les éclats de béton présentent un risque pour les personnes qui circulent près de l'ouvrage. Leur prévention et leur élimination doivent donc être traitées avec soin.

I.5.3-La stabilité de la construction :

Des essais effectués sur des éprouvettes ont permis d'estimer les valeurs des forces d'adhérence pour des éléments en béton dont les armatures sont corrodées.

Il est apparu que ni la qualité du béton, ni le rapport enrobage/diamètre d'armature n'influent sur la force résiduelle d'adhérence, même si l'enrobage est fissuré par la corrosion de l'armature sans qu'il ne soit détruit par éclatement.

En ce qui concerne les moments fléchissant et les efforts tranchants, une recherche expérimentale a porté sur l'effet de la corrosion sur ces grandeurs mécaniques. Elle a montré que pour prévoir de façon conservatrice la tenue des éléments en béton armé, il suffit d'appliquer les modèles de calculs classiques, en considérant la section réduite des armatures ainsi que la section réduite de béton.

Ainsi, tant que les diminutions de section des armatures restent faibles et que l'enrobage reste cohésif, la corrosion de ces armatures ne modifie pas significativement la tenue au moment fléchissant ou aux efforts tranchants.

Mais lorsque la corrosion a atteint un stade avancé, des calculs plus précis doivent être faits pour évaluer la tenue résiduelle de l'ouvrage. [B.N.2011]

I.6- Conclusion :

Ce chapitre a présenté les différentes terminologies existantes dans le domaine de réhabilitation, de réparation et de renforcement des ouvrages existants.

Chaque terme correspond à un cas, seul un expert peut déterminer le mode d'intervention envisagé en fonction du problème posé.

Chapitre II :
Techniques de
diagnostic

Chapitre II : Techniques de diagnostic

II.1- Introduction :

Le diagnostic est le résultat d'enquêtes menées pour prendre une décision sur l'état de la construction ou l'immeuble et ses conséquences. Cette appellation «diagnostic» est devenue le terme utilisé pour exprimer la réalisation des examens pour arriver à la formulation des conclusions. [A.F.2016]

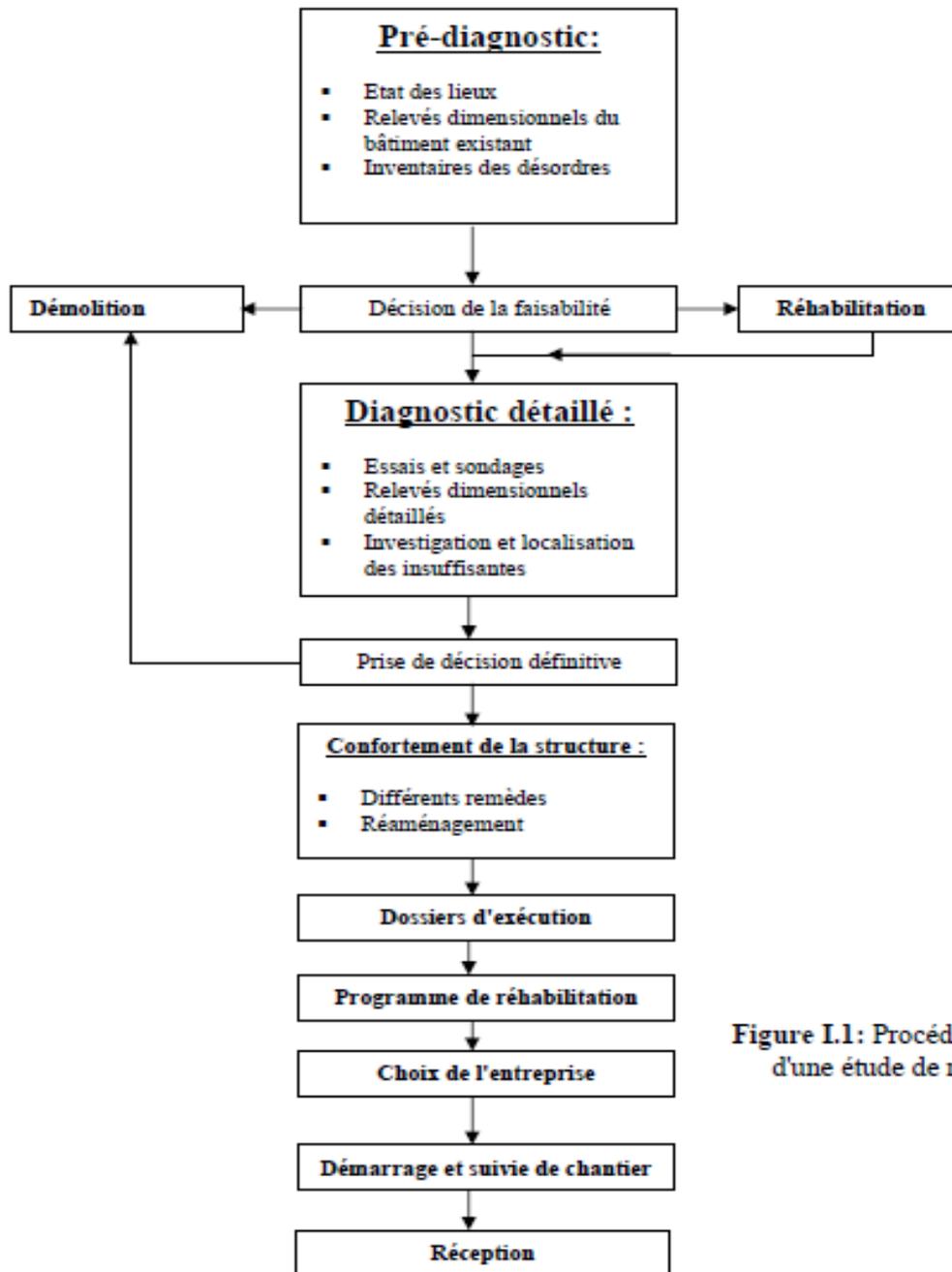


Figure I.1: Procédure d'élaboration d'une étude de réhabilitation.

Figure II.1 : Procédure d'élaboration d'une étude de réhabilitation. [O.K.2015]

II.2- Réalisation d'un diagnostic :

Le diagnostic d'un ouvrage est une étape importante dans le processus de sa réhabilitation. Il permet avant tout de se prononcer sur son état de santé et de voir quelles sont les éventuelles pathologies ainsi que leur ampleur.

Généralement lorsque l'on effectue un diagnostic, c'est quand un client découvre quelque chose qui n'allait pas dans le fonctionnement de l'ouvrage ou bien l'apparition de désordres.

Le diagnostic peut avoir principalement deux finalités.

Dans un premier temps, il peut être demandé de suivre l'évolution des différentes pathologies dans le temps, que ce soit à court, moyen ou long terme. Cela permet d'évaluer le comportement de l'ouvrage sous l'effet de ces troubles, de voir s'il y a une stagnation du phénomène ou s'il y a une dégénérescence, auquel cas il est important de prévoir des réparations.

L'autre finalité d'un diagnostic c'est de répertorier tous les désordres, mais aussi la constitution de chaque élément, en vue d'un traitement immédiat. [B.N.2011]

❖ Les différents essais de diagnostic :

➤ Essais physiques non destructifs:

- Contrôle visuel : recherche des fissures, taches de rouille...
- Essais au marteau et sondages sonores ;
- Essais au phacomètre : emplacement de l'enrobage de l'armature et détermination de sa valeur ;
- Cartographie du potentiel : prévision relative à l'état de l'armature ; mesure du courant de corrosion ;
- Jauges de fissures : mesure de l'état et de la stabilité des fissures.

➤ Essais chimiques:

- Analyse de la profondeur de carbonatation ; mesure du taux d'ions chlorures ;
- Analyse au microscope : détermination de l'activité de la réaction alcali-agrégats.

➤ Essais destructifs:

- Carottage permettant d'identifier la résistance du béton.

❖ Les objectifs du diagnostic :

- Identification de l'origine des désordres ;
- Évaluation de leur étendue dans l'espace ;
- Prédiction de leur évolution probable, dans l'espace et dans le temps en cas de non intervention ;
- Estimation des conséquences des désordres sur la portance et la sécurité de l'ouvrage et des personnes ;
- Détection de produits nocifs éventuellement présents dans l'ouvrage : amiante, plomb...

- Définition des suites à donner et des solutions de réparation ou de renforcement envisageables.
- ❖ **Établir le diagnostic** :

Lorsque la fissuration de la façade possède une certaine ampleur et qu'un mouvement des fondations est pressenti, le technicien ou l'expert en charge de la gestion du sinistre dispose de nombreux moyens pour établir son diagnostic. Il pourra :

- Examiner les plans de fondations ou faire réaliser des fouilles de reconnaissance ;
- Lire l'étude de sol s'il en existe une ou solliciter un géotechnicien ;
- Questionner les occupants : la date d'apparition des fissures pourra être corrélée ou non avec une période de sécheresse ou, au contraire, très pluvieuse ;
- Prendre connaissance de la carte géologique ;
- Vérifier si la construction se trouve ou non sur une zone sensible à l'aléa retrait-gonflement et cartographiée. [H.M.2013]

II.2.1-Choix des investigations :

Le choix des investigations dans un diagnostic d'ouvrage dépend de plusieurs paramètres. Il est primordial de les évaluer afin de mettre en œuvre mission.

Ces différents paramètres sont les suivants :

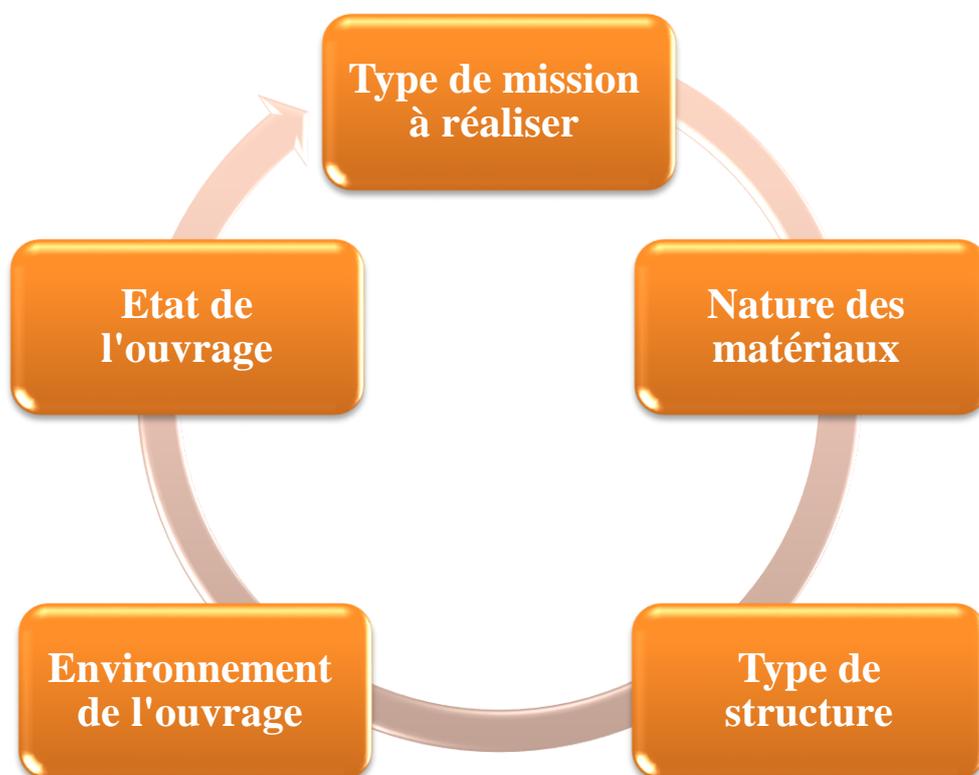


Figure II.2 : Schéma du choix d'investigation.

Le choix des investigations dépend de :

✓ **Type de mission à réaliser :**

Diagnostic de maintenance en vue d'éventuelles réparations, diagnostic structure pour un calcul de résistance ou encore évaluation des risques vis-à-vis des biens et des personnes.

✓ **Nature des matériaux :**

Les matériels et techniques utilisés pour réaliser le diagnostic ne sont pas les mêmes si l'on a à faire à du béton, de l'acier, du bois ou encore de la pierre.

✓ **Type de structure :**

Géométrie et taille de l'ouvrage.

✓ **Etat de l'ouvrage :**

Les investigations dépendent des désordres qui affectent l'ouvrage. On aura par exemple recours à un matériel particulier en présence de fissures ou d'armatures corrodées dans le béton.

✓ **Environnement de l'ouvrage :**

L'étude porte également sur l'environnement dans lequel se trouve l'ouvrage car certains désordres y sont parfois directement liés. C'est ainsi fréquemment le cas pour les structures soumises à des attaques chimiques.

De plus, les accès limités voire impossibles sur une partie de la structure peuvent être un frein à la réalisation d'investigations et nécessiter l'utilisation de moyens spécifiques (nacelle, échafaudages, etc.). [M.I et all.2013]

De plus, certaines parties de structures peuvent être inaccessibles ou nécessitant la mise en place d'échafaudages ou nacelle afin de pouvoir diagnostiquer ces éléments.

II.2.2-Types d'investigations :

Il est possible de classer les différentes investigations en deux catégories : soit les méthodes non destructives, soit les méthodes destructives. Les principales méthodes rencontrées lors de diagnostics sont décrites dans la suite. [L.M]

II.2.2.1-Investigations non destructives:

Le principe des investigations non destructives réside dans le fait qu'on ne touche pas directement à la structure. Pour les ouvrages en béton armé, il existe différentes méthodes permettant d'effectuer un diagnostic sans risques de porter atteinte à son intégrité. [M.I et all.2013]

Ces méthodes sont à favoriser aussi dans le cas d'ouvrage dont la structure est très atteinte et affaiblie.

Effectuer des prélèvements sur ce type de structure risque de la fragiliser encore plus. [L.M]

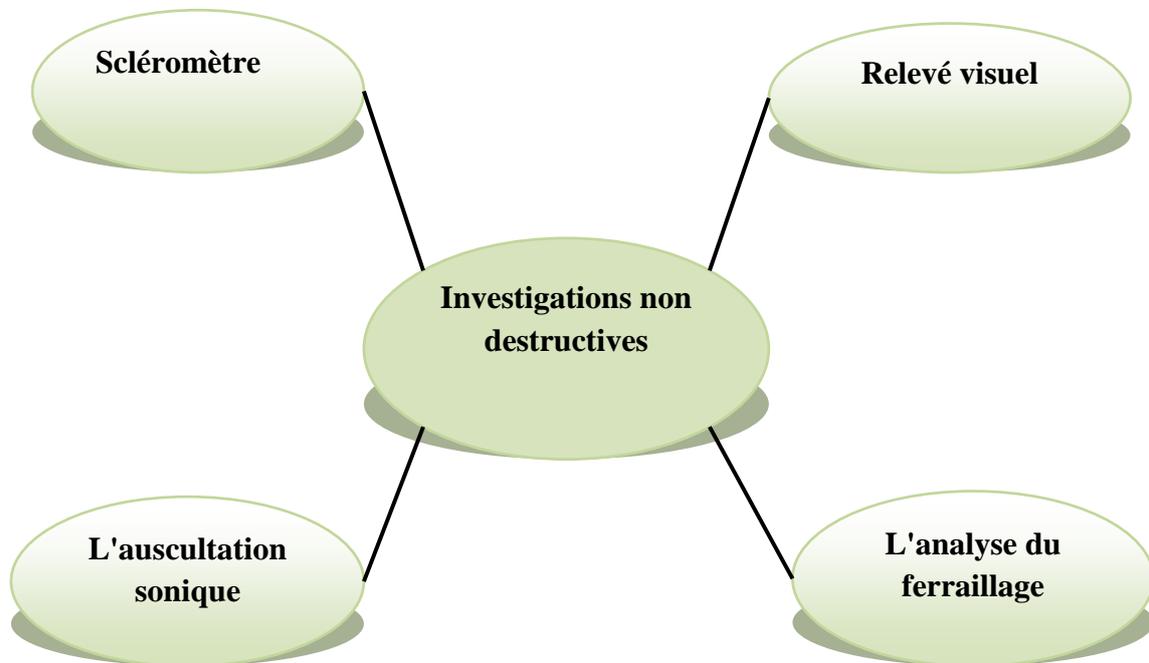


Figure II.3 : Schéma des investigations non destructives.

II.2.2.1.1- Relevé visuel :

Le diagnostic visuel consiste à aller sur site et d'analyser chaque élément de la structure en détail.

Ainsi, cela permet dans un premier temps de connaître les caractéristiques géométriques de chaque élément et aussi les matériaux constitutifs.

Cela permet d'évaluer le comportement global de l'ouvrage, de connaître les éléments porteurs ainsi que l'acheminement des charges dans la structure.

Dans un second temps, il est nécessaire de répertorier les différentes pathologies présentes sur la structure.

Les principaux désordres rencontrés pour les structures en béton armé sont les suivants :

- Les fissures, avec leur ouverture et leur longueur.
- Les fractures, avec leur ouverture, décalage ou rejet.
- La présence de coulures de calcite.
- Les zones d'altération superficielles et profondes.
- Les zones humides.

- Les zones de mousses ou de végétation.
- Les zones de faïençage.
- Les éclats de béton en formation ou profonds.
- Les aciers apparents.
- Les zones de ségrégation.

Il est nécessaire de répertorier tous ces éléments sur des plans, soit existant soit à créer, et de créer un dossier photographique des principaux désordres afin de pouvoir les visualiser au mieux.

Dans tous les cas le diagnostic visuel doit permettre de :

- ✓ Qualifier les désordres, car chaque type a une origine et des conséquences particulières.
- ✓ Déterminer les caractéristiques d'une pathologie permet de savoir quelle sorte de traitement sera nécessaire afin de stopper le phénomène.
- ✓ Quantifier les désordres, car selon son ampleur, des méthodes de réparation plus ou moins lourdes seront à envisager.
- ✓ Localiser les désordres afin de pouvoir déterminer son origine et ainsi agir à la source du problème. S'il est seulement prévu de réparer l'élément sans s'attaquer à ce qui engendre la pathologie, la réparation risque de ne pas être pérenne et l'on verra rapidement apparaître de nouvelles pathologies similaires.

Il est possible de classer les éléments selon la gravité de leur pathologie :

- **Indice A** : Pas de défauts apparents.
- **Indice B** : Défauts sans conséquence importante autres qu'esthétique.
- **Indice C** : Défauts qui indiquent qu'une évolution risque de se faire anormalement. Ces défauts doivent être surveillés.
- **Indice D** : Défauts révélateurs de dégradation, ils sont rangés en deux classes:
 - **DA** : Défauts qui indiquent un début d'évolution. Ils doivent être surveillés régulièrement et des mesures doivent être prises en cas d'évolution.
 - **DB** : Défauts qui indiquent une évolution avancée. Des mesures de renforcement ou de remplacement doivent être prises.
- **Indice E** : Défauts qui traduisent de façon très nette une modification du comportement de la structure et qui mettent en cause la durée de vie de l'ouvrage. Des mesures doivent être prises dans les plus brefs délais.
- **Indice F** : Défauts indiquant la proximité d'un état limite et nécessitant soit une restriction d'utilisation, soit la mise hors service de l'ouvrage.

De même, il est possible de classer le site dans sa globalité afin de donner une vision d'ensemble de l'état de la structure au maître d'ouvrage. Il peut être classé de la manière suivante:

- **Indice 1** : Site en état neuf ou quasi neuf, aucun travaux n'est à prévoir à moyen termes.
- **Indice 2** : Site en très bon état général, quelques points à surveiller.
- **Indice 3** : Site en bon état, quelques travaux à prévoir à moyen ou long termes.
- **Indice 4** : Site en état moyen, travaux à prévoir à moyen termes et surveillance conseillée.
- **Indice 5** : Site dégradé, travaux à court termes à prévoir.
- **Indice 6** : Site très dégradé, travaux d'urgences à prévoir, site prioritaire.

Les outils indispensables pour mener à bien une inspection visuelle sont les suivants :

- Un appareil photo.
- Un mètre.
- Un distancemètre.
- Un pied à coulisse.
- Un fissuromètre (réglette en plastique transparente munie de traits de largeurs calibrées que l'on place successivement sur la fissure à observer pour estimer sa largeur).
- Le nécessaire pour prendre des notes.



Figure II.4 : Fissuromètre.

Cette première étape permet de définir la gravité des pathologies, mais aussi de classer les différents éléments en fonction de la priorité auxquels ils doivent être réparés.

L'investigation visuelle permet aussi de prévoir quels sont les autres moyens de diagnostic les plus adaptés à mettre en œuvre afin de répondre pleinement à la problématique.

Ces investigations complémentaires ont pour but de préciser les désordres observés lors du relevé visuel, mais aussi de recueillir des informations complémentaires concernant leur constitution ainsi que leur état. [B.N.2011]

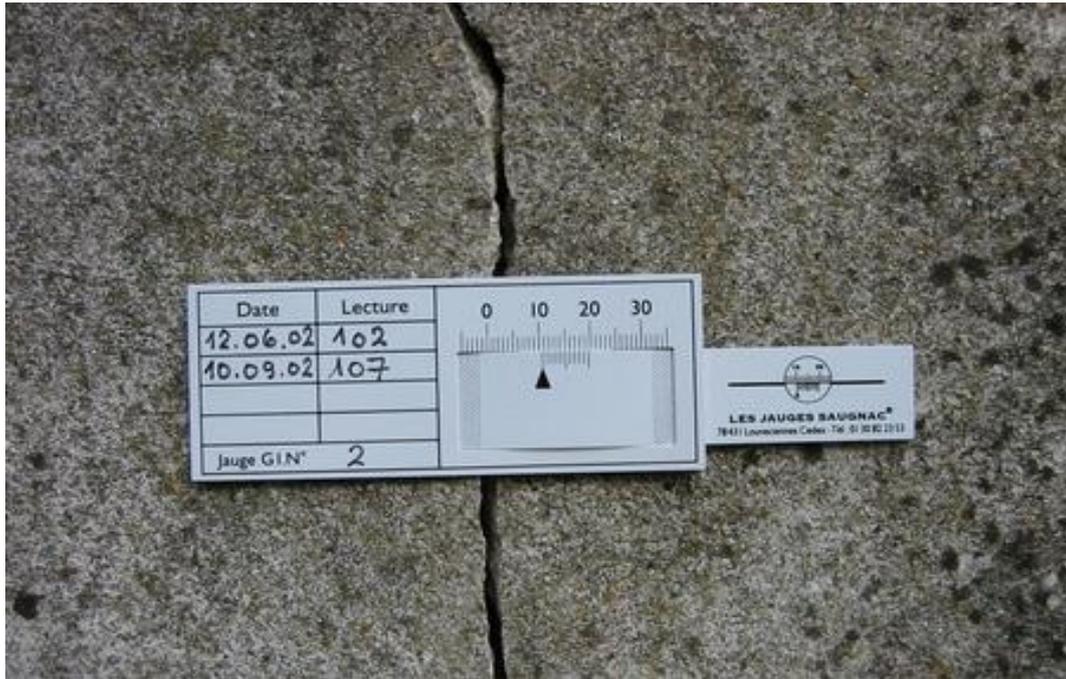


Figure II.5 : Mesure d'une fissure.

II.2.2.1.2- L'analyse du ferrailage :

Le relevé du ferrailage peut se faire à l'aide d'un Pachomètre de type Ferroskan.

Cet appareil est un système de détection portable pour un examen d'armatures non destructif. Il permet de déterminer le position exact des barres d'armatures, de mesurer l'enrobage et de donner une indication du diamètre de l'armature.

Le principe de fonctionnement repose sur l'émission d'un flux magnétique par l'appareil.

Le Pachomètre détecte la diffusion de ce champ magnétique ainsi que les modifications de la résonance magnétique induite par la présence d'aciers. Ainsi, l'appareil mesure la variation électromagnétique due à la présence d'éléments ferromagnétiques, les armatures.

La détermination du diamètre et de l'enrobage repose sur le fait que plus une armature a un diamètre important, plus le signal reçu par l'appareil sera important. A contrario, plus l'épaisseur d'enrobage sera importante, plus le signal sera faible.

Ainsi, la profondeur d'auscultation avec cet appareil est limitée (généralement de l'ordre de 10 à 15 centimètres selon le type de bétons et le type d'armatures).

Le schéma ci-dessous montre la réponse obtenue selon la densité d'armatures, avec à droite une seule armature, au milieu trois armatures relativement espacées et à gauche trois armatures rapprochées.

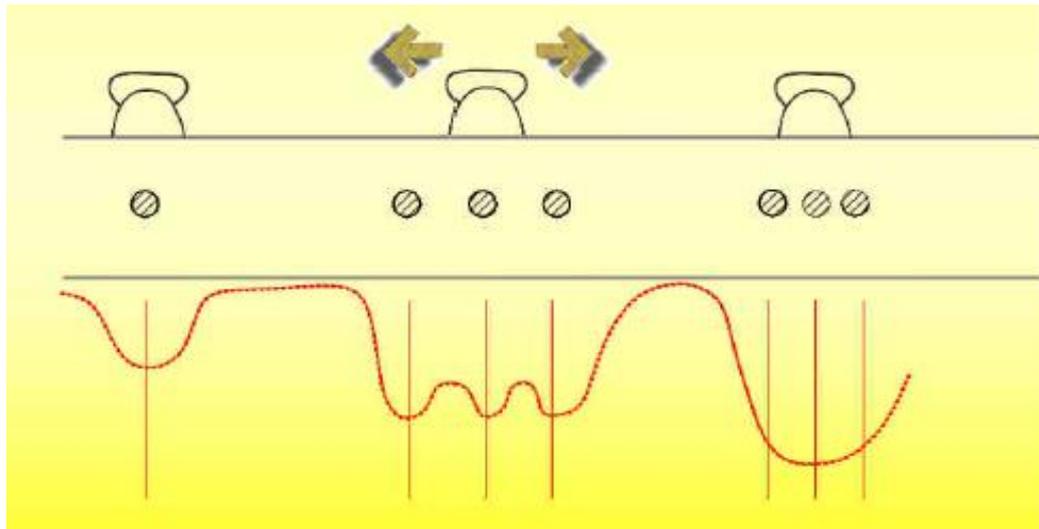


Figure II.6 : Réponse en fonction de la densité d'armature.

Concernant l'utilisation de l'appareil, il existe principalement deux modes de mesures :

- ❖ La détection par lignes
- ❖ La détection par fenêtres

La première méthode consiste à déplacer l'appareil perpendiculairement aux armatures que l'on souhaite détecter.

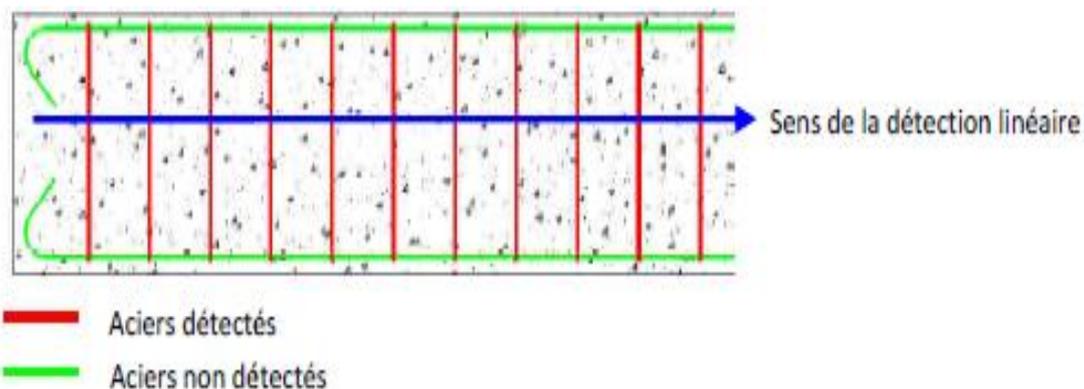


Figure II.7 : Principe de la détection linéaire.

La détection par lignes est très intéressante pour les éléments longs sur lesquels on souhaite avoir une vision globale du ferrailage. En effet, les détections peuvent aller jusqu'à quarante mètres de longueur. Ce type de mesure permet d'obtenir les variations d'espacement des armatures ainsi que les enrobages correspondants.

La seconde méthode consiste à détecter les aciers sur un carré de soixante centimètres de côté. Cela par pallier de quinze centimètres, d'abord dans le sens transversal puis dans le sens longitudinal.

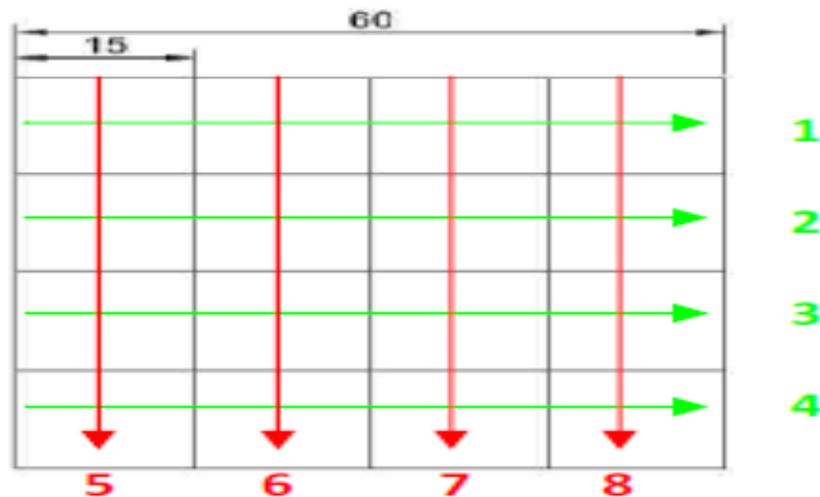


Figure II.8 : Principe de la détection par fenêtre.

Cette méthode permet d'une part d'estimer le diamètre des aciers ainsi que les enrobages, et d'autre part de voir localement comment les aciers ont été assemblés. Cela trouve toute son utilité pour voir le clavetage d'une poutre à un poteau par exemple.

Le travail d'ingénierie consiste, après extraction des données sur un ordinateur grâce à un logiciel, à exploiter les mesures effectuées sur site. Cette étape varie selon le type de mesures effectuées. [L.M]

II.2.2.1.3- L'auscultation sonique :

L'auscultation sonique permet de mesurer le temps de propagation d'un train d'ondes sonores entre deux points. Une partie de l'auscultateur, le transducteur, produit des ultrasons.

Grâce aux propriétés piézoélectriques des matériaux, l'énergie électrique émise est transformée en énergie mécanique ultrasonore. L'appareil mesure le temps nécessaire à l'onde pour atteindre le récepteur qui la convertit en signal électrique. Connaissant la distance de l'émetteur possible de connaître la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu.

Ce procédé permet de caractériser l'homogénéité physique du béton ainsi que son état d'altération. En effet, cette méthode de diagnostic permet entre autres de localiser des défauts, des vides ou autres malfaçons dans le béton.

Le principe est que les lames d'air emprisonnées dans le matériau transmettent très peu l'énergie des ultrasons, ainsi, la vitesse mesurée sur l'ensemble de l'élément sera plus faible que pour un béton homogène.

Il existe principalement deux types de mesures à effectuer sur site :

- ✓ Les mesures en transparence : cette méthode consiste à déterminer le temps de propagation des ondes sonores longitudinales à travers un élément. Pour procéder à ce

type de mesure, il faut placer l'émetteur et le récepteur sur les deux faces opposées de l'élément à ausculter.

- ✓ Les mesures de surface : cette méthode s'effectue principalement lorsqu'une seule des faces de l'élément est accessible lors des investigations.

Elle peut aussi être utilisée pour déterminer la profondeur d'une fissure ou bien la présence de couches multiples dans un même élément.

Pour réaliser cette mesure, il faut placer l'émetteur et le récepteur sur la même face plane de l'élément à ausculter. [H.M.2013]

L'émetteur reste sur un même point, tandis que le récepteur se déplace en effectuant à chaque fois une mesure.

Il est à noter qu'il existe une règle a été conçue par le CEBTP afin d'avoir des espacements donnés et ne pas faire des erreurs sur les distances mesurées.

Le tableau suivant donne les résultats d'essais obtenus par le CEBTP sur l'auscultation sonique des bétons : [B.N.2011]

Vitesse de propagation du son	Qualité estimée du béton
$V > 4000$ m/s	le béton est de bonne qualité et homogène
$3500 < V < 4000$ m/s	le béton est de qualité moyenne
$3000 < V < 3500$ m/s	le béton est de qualité médiocre
$V < 3000$ m/s	le béton est de mauvaise qualité



Figure II.9 : Mesure ultrasonique.

II.2.2.1.4- Scléromètre :

Cet instrument permet de mesurer la dureté superficielle du béton, et il permet de faire une estimation pour la résistance du béton. Cet instrument n'est pas très pratique car il faut faire une quinzaine d'essais pour chaque zone testée afin d'obtenir une valeur moyenne représentative.

La surface de mesure doit être nette, ces surfaces ne doivent pas présenter des écaillages de nids de gravier ou des textures grossières, en plus il faut éliminer la peinture ou l'enduit et toute trace de l'eau doit être éliminée.

Le scléromètre a pour rôle de préciser aux différents points de structure l'homogénéité de la résistance du béton, mais tout le résultat obtenu sur le béton reste imprécis en utilisant cette méthode. [A.F.2016]



Figure II.10 : Scléromètre.

II.2.2.2- Investigations destructives :

Lorsque cela est possible, il peut s'avérer utile d'avoir recours à des essais destructifs. Ces méthodes permettent généralement de faire des prélèvements et de connaître la nature des matériaux présents, leurs caractéristiques mécaniques et chimiques ainsi que leur état d'altération. [M.I et all.2013]

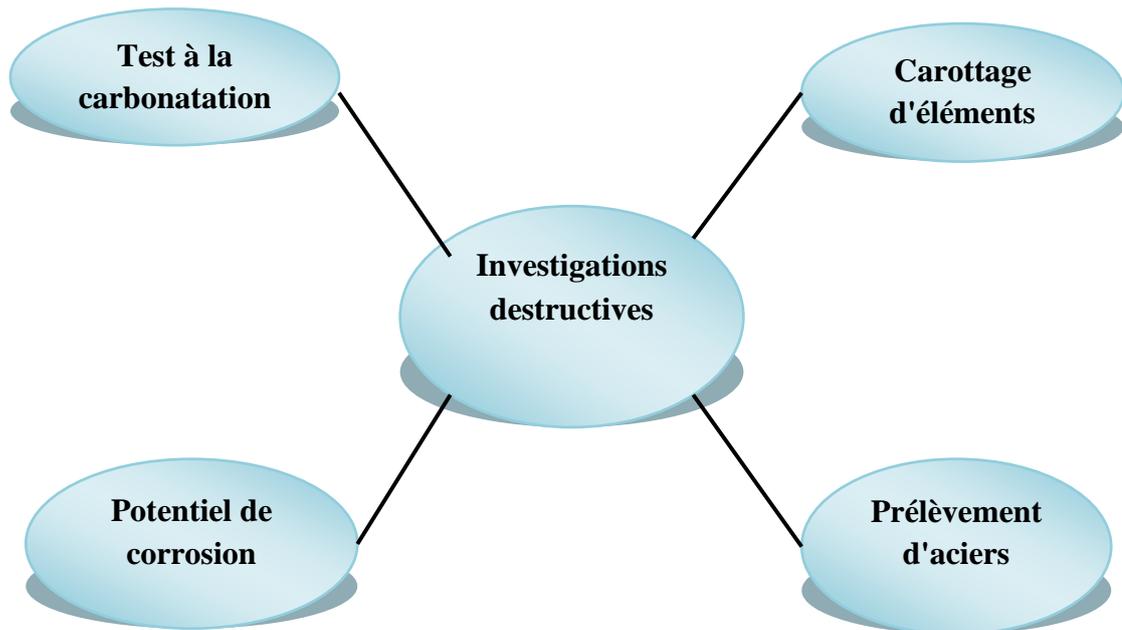


Figure II.11 : Schéma des investigations destructives.

II.2.2.2.1- Test à la carbonatation :

Le principe du test à la carbonatation repose sur le fait que le pH du béton carbonaté est plus faible que celui du béton sain. Pour déterminer la zone carbonatée, il est généralement utilisé un indicateur coloré tel que la phénolphthaléine.

La phénolphthaléine est un composé organique de formule $C_{20}H_{14}O_4$. L'utilité de ce composé est qu'il change de couleur selon le pH de l'élément avec lequel il entre en contact.

Il fait partie des indicateurs de pH ou indicateur coloré. Ce changement de couleur est dû à une modification de la structure chimique de la molécule lors du passage de la forme protonée (milieu acide) à la forme déprotonnée (milieu basique).

La couleur que prend la phénolphthaléine dépend du pH. Elle sera rose pour un pH compris entre 8,2 et 12 et incolore au-delà et au-deçà de cette zone de virage.

Cet essai se réalise généralement sur une coupe fraîche de béton. Il faut y pulvériser la solution de phénolphthaléine, si la phénolphthaléine ne réagit pas, il faut approfondir la coupe dans le béton par paliers d'un centimètre et répéter les étapes précédentes jusqu'à ce que la phénolphthaléine vire au rose.

Puis il est nécessaire de mesurer l'épaisseur entre le parement extérieur et la zone à laquelle commence la coloration du béton. Cela nous donne la profondeur de carbonatation du béton de cette zone.

Il peut être utile de réaliser cette mesure en différents points d'un élément afin de pouvoir cartographier les profondeurs de carbonatation associées.

Il peut s'avérer intéressant de coupler les mesures de profondeur de carbonatation avec les mesures d'enrobages données par exemple avec un Pachomètre de type Ferroskan. En effectuant un certain nombre de mesures, il est possible d'obtenir une courbe du type :

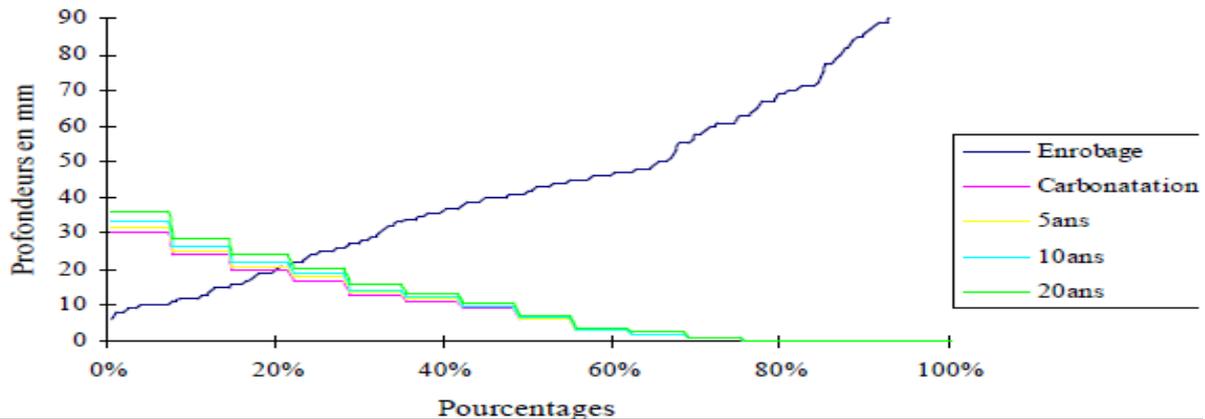


Figure II.12 : Graphique enrobage-carbonatation.

L'intersection de la courbe d'enrobage (courbe bleu foncé) avec celle de carbonatation (courbe rose) donne le pourcentage des armatures qui ne sont plus protégées.

Il est aussi possible de faire des prévisions sur les évolutions pour les années à venir (courbes jaune, bleu clair et verte). En effet, l'évolution de la carbonatation suit une évolution en fonction du temps du type $a\sqrt{t}$, avec « a » un facteur propre à chaque béton. En connaissant l'âge du bâtiment ainsi que la profondeur de carbonatation à l'instant t, il est facile de déterminer le facteur « a ». [B.N.2011]

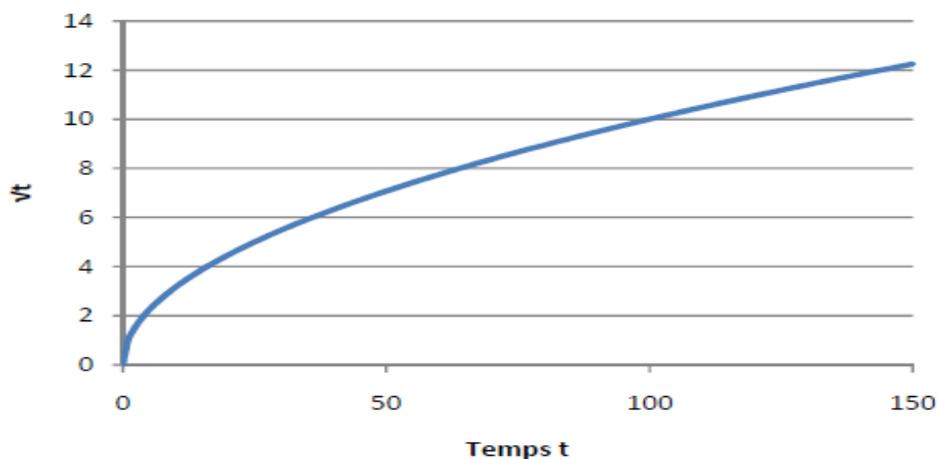


Figure II.13 : Courbe $a\sqrt{t}$.

II.2.2.2- Carottage :

Cette méthode consiste au prélèvement d'une carotte du béton pour l'analyser en laboratoire. Le carottage peut être fait au sec ou à la présence de l'eau. Cette analyse aide pour :

- ✓ L'identification et la détérioration des agrégats
- ✓ L'homogénéité du béton
- ✓ La réparation des fissures
- ✓ La résistance à la compression et la module d'élasticité.
- ✓ La profondeur d'une éventuelle carbonatation. [A.F.2016]



Figure II.14 : Instrument de carottage.

II.2.2.3- Prélèvement d'acier :

En cas de re-calcul d'une structure, il est important de connaître les aciers présents dans un ouvrage.

Le prélèvement d'acier permet de déterminer le type d'acier (HA, lisse, TOR, etc.) ainsi que leurs caractéristiques mécaniques telles que la limite d'élasticité. [M.I et all.2013]



Figure II.15 : Prélèvement d'aciers.

II.2.2.2.4- Mesure du potentiel de corrosion :

La mesure du potentiel de corrosion ne peut se faire que sur des ouvrages ayant un ferrailage continu et n'ayant pas de revêtement de surface pouvant agir comme isolant.

Si le ferrailage est discontinu, il est toujours possible de mettre en place des pontages électriques.

Le principe de la mesure du potentiel de corrosion est de mettre à nu une armature puis de la connecter à une borne d'un millivoltmètre à haute impédance.

Une électrode de référence est placée sur le parement, elle-même reliée à une autre borne du millivoltmètre.

Elle est dite de référence, car elle a un potentiel constant du à un équilibre électrochimique.

Il est important de veiller à ce que la jonction entre le béton et l'électrode soit humide afin d'établir une conduction électrique.

Cela permet de diminuer la résistance entre l'électrode de référence et le béton ainsi que le potentiel de jonction entre l'électrolyte contenu dans l'électrode de référence et la solution interstitielle du béton.

Une fois les branchements faits, il faut réaliser les mesures des potentiels des zones auscultées en déplaçant l'électrode de référence. [H.M.2013]

La norme ASTM C876-91 fait une corrélation entre le potentiel mesuré et la probabilité de corrosion. Ainsi, en utilisant une électrode Cu/CuSO₄ on a la relation suivante :

- ✓ Si $E > -200$ mV alors la corrosion est peu probable (probabilité inférieure à 10%).
- ✓ Si $-350 < E < -200$ mV alors la corrosion est possible (probabilité de cinquante pour cent).
- ✓ Si $E < -350$ mV alors la corrosion est très probable (probabilité de 50 à 90%).

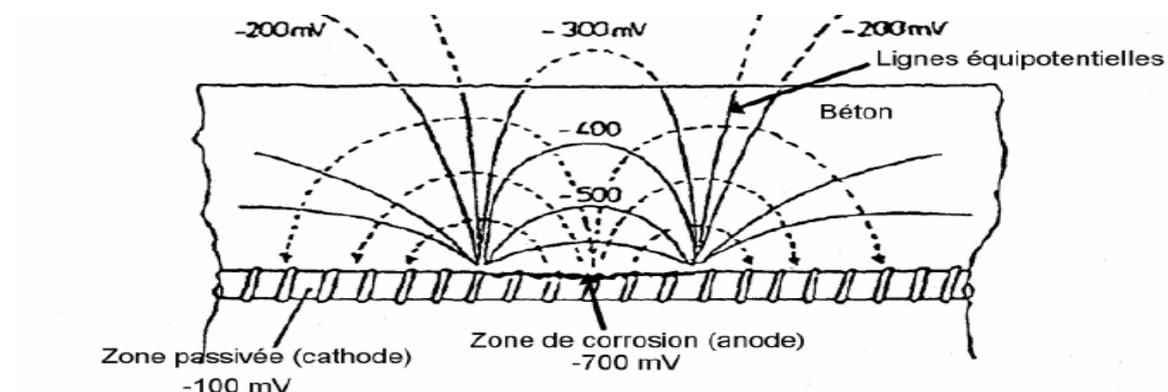


Figure II.16 : Principe du potentiel de corrosion.

Cependant, il est important de noter le fait que différents paramètres peuvent influencer sur les résultats obtenus, tels que :

- ✓ L'hygrométrie de surface, il peut y avoir une diminution de 100 mV entre une mesure sur surface humide et une mesure quand c'est sec.
- ✓ Pour des milieux agressifs comme la présence de chlorures, la conductivité est augmentée et les potentiels sont plus négatifs.
- ✓ Lorsque le béton est carbonaté, les potentiels sont plus positifs. [B.N.2011]



Figure II.17 : Mesure du potentiel de corrosion.

II.3- Conclusion :

Dans cette partie nous avons vu l'importance du diagnostic dans l'opération de réhabilitation d'un ouvrage 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'ouvrage 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.

Le diagnostic est donc un outil d'aide à la décision au maître d'ouvrage pour la pérennité de son ouvrage. Deux choix sont possibles : [M.I et all.2013]

- ✓ Maintien de l'ouvrage avec ou sans mesures conservatoires pour une utilisation « Normale ».
- ✓ Déconstruction dans le cas où le coût des réparations ne justifie pas le maintien.

Chapitre III :
Techniques de
réhabilitation

Chapitre III: Techniques de réhabilitation

III.1- Introduction :

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

Le plan d'action doit être fait d'une manière précise et très attention. [M.M.2012]

III.2- Techniques de réhabilitation :

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

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

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

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

Cependant, l'état optimal de la surface de béton dépend du type de réparation envisagé et de l'état du support. [K.S.2017]

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

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

Tableau III.2 : Traitements et réparations en fonction des désordres.

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

III.3- Synoptique des étapes clés pour la réhabilitation d'ouvrages en béton:

1. Auscultation et diagnostic précis de l'état de l'ouvrage:
 - Observations visuelles.
 - Analyse des documents.
2. Mise en sécurité de l'ouvrage (si nécessaire).
3. Détection, identification et constat des dégradations et de leurs causes:
 - Sondages tests.
 - Analyses en laboratoire.
 - Analyses en situation.
 - Inspections visuelles.
4. Estimation et pronostic de l'évolution des dégradations:
 - Modèles prédictifs.
 - Observations.
5. Détermination des objectifs de la réparation ou du renforcement.
6. Sélection des méthodes et techniques les mieux adaptées.
7. Mise au point du cahier des charges du projet de réparation ou de renforcement.
8. Réalisation des travaux.
9. Contrôle et réception des travaux.
10. Suivi de l'efficacité de la réparation ou du renforcement, gestion, surveillance et maintenance de l'ouvrage. [P.G.2011]

III.4- Solutions de réhabilitation :

Il est nécessaire de distinguer la réparation et le renforcement.

III.4.1.1. Ragraéage :

Le ragraéage est la technique traditionnelle de réparation des bétons. Il permet dans un premier temps de reconstituer les sections d'armatures qui ont disparu, de stopper le phénomène de corrosion des aciers par passivation. Puis, le principe est de protéger les armatures par reconstitution manuelle ou mécanique de l'enrobage à l'aide de mortier de réparation. [M.I et all.2013]

Les étapes de la réparation sont les suivantes :

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



Figure III.1 : Aciers dégagés, Application du mortier et finissage par taloche. [J.A.2016]

III.4.1.2. Béton projeté :

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

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

✚ Technique de projection :

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

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

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

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

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

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

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

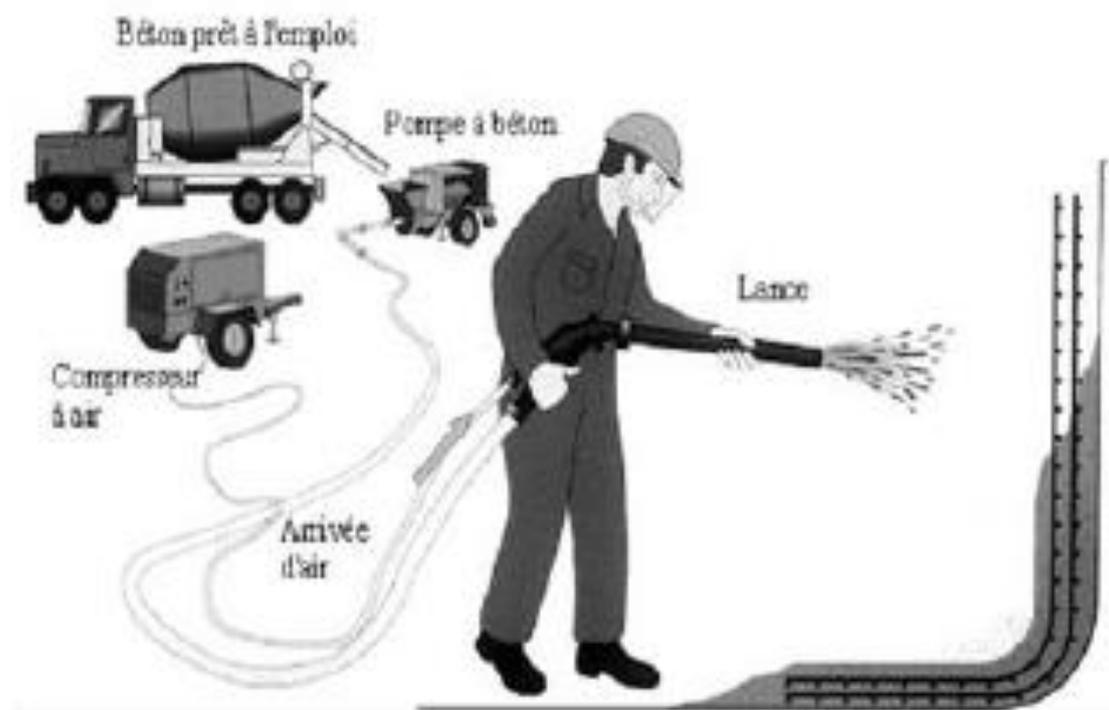


Figure III.2 : Projection par voie humide.

- ❖ Avantage : Ici Le contrôle de la qualité est simple, puisque l'on utilise un béton conventionnel (le dosage des constituants du mélange est connu).
- ❖ Désavantage : Ici le procédé ne peut être arrêté, car le mélange eau-ciment est préalable.

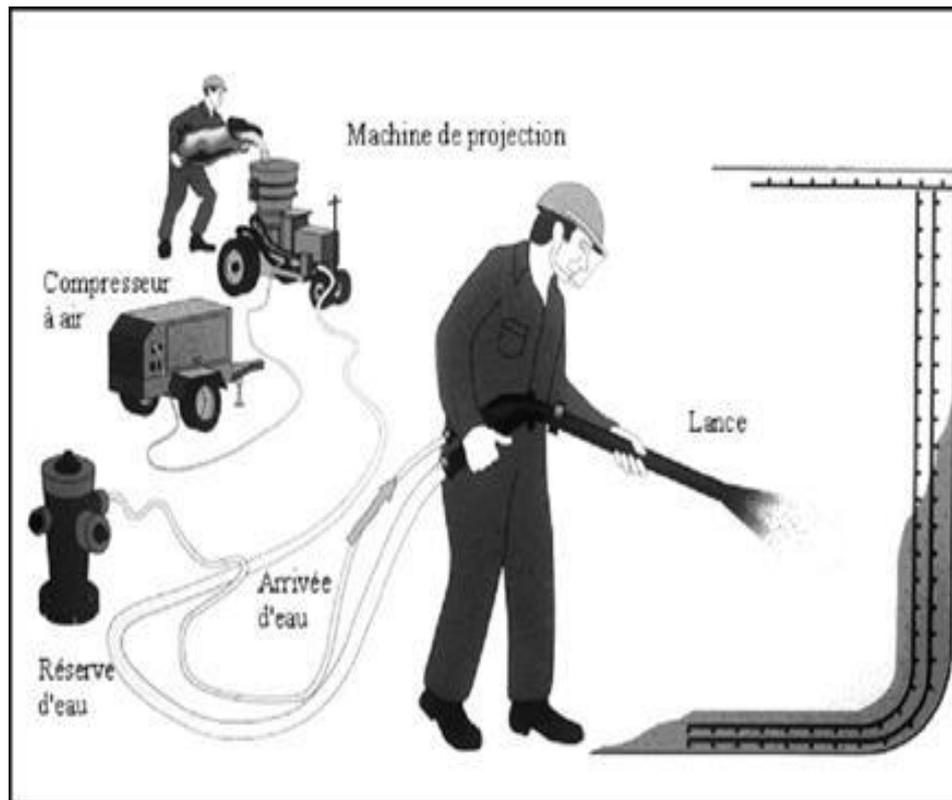


Figure III.3 : Projection par voie sèche.

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

✚ Mode opératoire :

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

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

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

Cette application peut se faire dans le cas du béton projeté par voie humide, mais n'est pas possible lors de la projection par voie sèche, parce que la protection serait abimée.[J.A.2016]

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

	<u>Remplacement du béton par ragréage avec passivant</u>	<u>Remplacement du béton par béton projeté</u>
<u>Avantages</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Petites destructions localisées de béton, pas de risque de déstabilisation de la structure. • Adapté aux petites surfaces. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en place du mortier de réparation plus rapide. • Béton moins poreux, donc moins sensible aux chlorures. • Adapté aux grandes surfaces.
<u>Inconvénients</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Beaucoup de main d'œuvre nécessaire. • Délais plus long. • Nécessite un revêtement imperméabilisant. 	<ul style="list-style-type: none"> • Risque de déstabilisation suite à une enlevée importante du béton. • Surcharges possibles => recalcul de la structure. • Pas adapté aux petites surfaces.
<u>Contraintes phase travaux</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Bien éliminer toutes les traces de corrosion des aciers et bien les passiver sur l'ensemble de la zone de désordre et non pas seulement au droit de l'épaufrure sous peine de corrosion accentuée. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bien éliminer toutes les traces de corrosion des aciers et bien les passiver sur l'ensemble de la zone de désordre et non pas seulement au droit de l'épaufrure sous peine de corrosion accentuée.
<u>Durée de vie estimée</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Temps de carbonatation/détérioration du nouveau béton. • Limité par rapport à la présence de chlorures. • Améliorée si protection complémentaire. 	<ul style="list-style-type: none"> • Temps de carbonatation/détérioration du nouveau béton. • Limité par rapport à la présence de chlorures. • Améliorée si protection complémentaire.

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

III.4.1.3. Tissu de fibres de carbone:

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

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

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

Il est à noter qu'une protection au feu est nécessaire afin de respecter la norme en vigueur. [H.M.2013]



Figure III.4 : Tissus de fibre de carbone. [K.S.2017]

III.4.1.4. Réparation avec remplacement d'armatures :

Si désordres limités à une partie de la structure, (cas courants de chocs), les armatures BA sont remplacées après travaux de préparation adaptés;

Si désordres liés à la corrosion et concernent une partie importante de la structure et que l'environnement est agressif, il est envisageable de remplacer les armatures BA par des armatures non corrodables, (inoxydables, matériaux composites).

Les caractéristiques du béton ou mortier de ré-enrobage des armatures remplacées doivent être compatibles avec les caractéristiques du béton existant et l'agressivité de l'environnement de l'ouvrage. [C.B.2014]

III.4.1.5. 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.

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.

Parmi les avantages et les inconvénients de chemisage, on peut citer :

▪ **Les avantages du chemisage :**

- Il met en place une canalisation à l'intérieur d'une autre, résistante à la corrosion et sans joint.
- Il est efficace aussi bien pour la réparation de systèmes entiers que pour la résolution de problèmes ponctuels
- Il rénove les collecteurs gravitaires et les branchements.
- Il a une durée de vie jusqu'à **100 ans**.
- Il suffit généralement d'une journée pour le mettre en œuvre.
- Il convient aux canalisations d'un diamètre de **100mm à 3000mm**.

▪ **Les inconvénients de chemisage :**

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

A noter que le renforcement d'un élément par l'augmentation de sa section de béton (chemisage), influe directement sur la masse de la structure, comparativement aux autres moyens de renforcements, qui se caractérisent par leur légèreté relative. [M.I et all.2013]

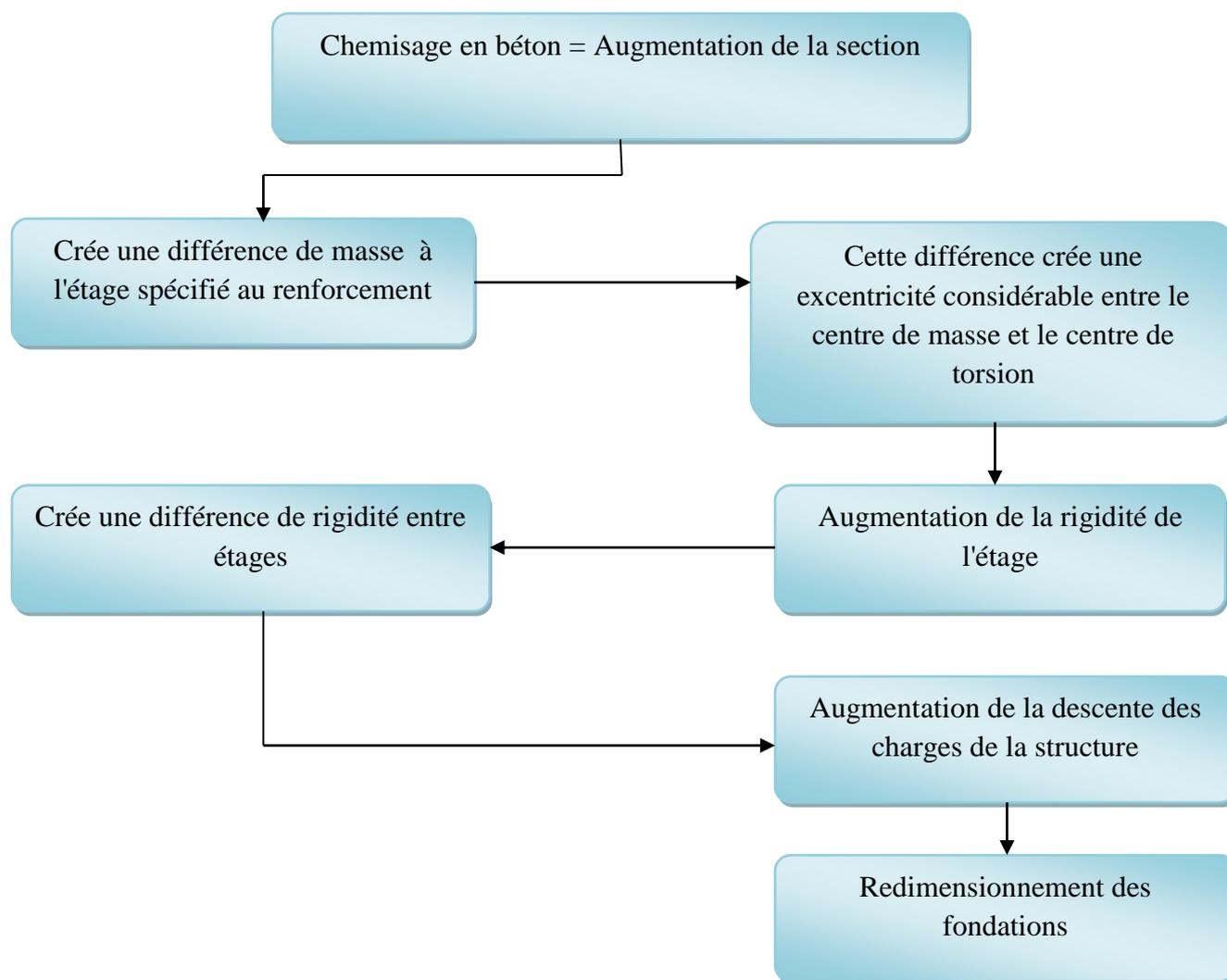


Figure III.5 : Organigramme du processus de chemisage en béton armé.

III.4.1.6. Reconstitution de l'enrobage :

La reconstitution de l'enrobage peut se faire à l'aide de béton projeté.

Cependant, cette surépaisseur entraîne une surcharge de la structure pour laquelle une vérification structurale devra être réalisée au niveau d'exécution.

➤ Injections :

Il s'agit d'un autre système de réparation de fissures et de brèches passives, applicable à des murs en maçonnerie appareillée ou en brique, qui consiste à introduire un liquide sous pression pour colmater entièrement le vide entre les lèvres de la fissure. En durcissant et en adhérant au support, ce liquide restitue à l'élément endommagé sa continuité d'origine. Les caractéristiques du liquide –généralement à base de composants époxydiques– et la pression d'injection varient en fonction des matériaux du mur et de la taille du trou à reboucher.



Figure III.6 : La réparation d'une fissure à l'aide d'une injection.

Les travaux d'injection permettent :

- ✓ L'amélioration des caractéristiques mécaniques et physiques du matériau constitutif de l'ouvrage et du sol à proximité immédiate de l'extrados ;
- ✓ Le rétablissement de la liaison de l'ouvrage avec le terrain ;
- ✓ L'amélioration de l'étanchéité. [K.S.2017]

III.5- Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons vu les différentes méthodes de réparation et de confortement d'un ouvrage 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.

Dans tous les cas, le but est de faire en sorte que la structure puisse reprendre à nouveau les charges qui lui sont appliquées voir de pouvoir reprendre un supplément de charge si cela s'avère nécessaire pour que l'ouvrage réponde aux attentes et à l'évolution des besoins des utilisateurs ou des propriétaires. [B.N.2011]

Chapitre IV :
Durabilité et
normalisation

Chapitre IV: Durabilité et normalisation

VI- Durabilité et normalisation

IV.1- Durabilité :

La durabilité d'une réhabilitation correspond au fait qu'elle ne doit pas être renouvelée avant un certain délai, qui est précisé dans une garantie. Cette durabilité dépend de la pertinence du choix de la technique retenue, de sa mise en œuvre et des sollicitations après traitement.

La pérennité de l'ouvrage correspond à son aptitude à remplir les fonctions prévues (mécaniques, esthétiques, etc.). Elle peut être allongée, après traitement de réhabilitation, quand les parements sont de plus revêtus d'un écran protecteur contre les agents agressifs. La notion de garantie est une notion contractuelle, dont la durée est liée au traitement choisi, pour une structure dans des conditions d'exploitation données. La garantie prend effet après la réception des travaux.

La réception des travaux est un acte de fin de travaux qui atteste que la réalisation est conforme au contrat. Avant cette réception l'efficacité du traitement doit être vérifiée.

La durabilité des structures en béton est maintenant devenue un point important, y compris dans l'approche normative des ouvrages, ne serait-ce que parce que les réparations ont un coût non négligeable. Ainsi, les Eurocodes (règles européennes de construction) définissent la notion de durée d'utilisation de projet, durée pour laquelle la structure doit être dimensionnée de sorte que sa détérioration n'abaisse pas ses performances au-dessous de celles qui sont escomptées, compte tenu de l'environnement et du niveau de maintenance prévu. Il y a beaucoup de facteurs à considérer pour ce dimensionnement, parmi lesquels la composition, les propriétés et les performances des matériaux, ainsi que la qualité de la mise en œuvre et le niveau de contrôle.

La norme EN 206 (« Béton : spécifications, performances, production et conformité ») définit des classes d'environnement auxquelles le béton sera soumis :

- ✓ X0 : aucun risque, correspond à du béton coulé à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est très faible ;
- ✓ XC1 à XC4 : corrosion induite par carbonatation, le risque croissant de 1 à 4 ;
- ✓ XD1 à XD3 : corrosion induite par des chlorures autres que marins ;
- ✓ XS1 à XS3 : corrosion induite par des chlorures provenant de l'eau de mer ;
- ✓ XF1 à XF4 : gel et dégel, avec ou sans sels de déverglaçage ;
- ✓ XA1 à XA3 : attaques chimiques.

En fonction de l'environnement de l'ouvrage et des risques d'agression auxquels il va être exposé pendant sa durée de service, on optimise ensuite les performances du béton, sa

durabilité et l'enrobage des armatures (l'enrobage est l'épaisseur de béton qui protège les armatures métalliques les plus proches de la surface).

Les essais de durabilité sont de deux types :

- Indicateurs de durabilité caractérisant les propriétés du béton en relation avec la résistance aux agressions extérieures et permettant d'alimenter des modèles de vieillissement (exemple : coefficient de diffusion des ions chlore vis-à-vis de la protection des armatures en milieu marin) ;
- Essais de vieillissement accéléré (exemple : carbonatation accélérée). [DTR 1]

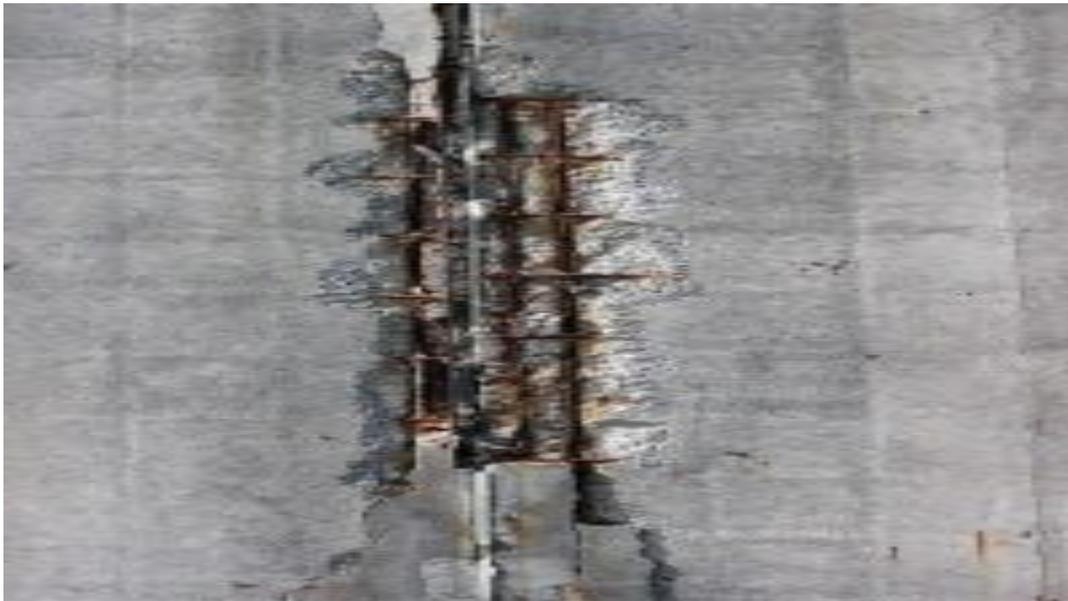


Figure IV.1 : Carbonatation du béton.

IV.1.1. Etablir un cadre d'utilisation des essais de durabilité dans un contexte d'évaluation de la durabilité des ouvrages existant :

L'approche performantielle doit conduire à l'utilisation de bétons durables résistants aux agressions pour lesquelles ils ont été prescrits.

Les essais de durabilité permettent de s'en assurer en amont et en cours de construction.

Ces essais permettent également d'évaluer la durabilité des bétons des ouvrages en service.

Il s'agit là d'un enjeu majeur pour les maîtres d'ouvrage gestionnaires qui ont besoin de connaître l'état de leurs ouvrages et d'anticiper leurs dégradations pour optimiser leurs plans de maintenance.

Les essais de durabilité, réalisés dans le cadre de diagnostics en association avec d'autres techniques, constituent des outils indispensables à l'évaluation et à la prédiction du vieillissement des ouvrages en service.

Le travail portera donc sur le choix des essais d'évaluation au regard de critères à définir, sur les modalités de prélèvements et d'échantillonnage et sur les éventuelles adaptations des modes opératoires (prise en compte de l'effet de parement notamment).

Seront également identifiées les modalités d'utilisation des résultats d'essais (classes de durabilité potentielle, modèles prédictifs).

Ce travail se fera en lien avec les travaux de calage des seuils admissibles s'appuyant sur l'évaluation d'un panel d'ouvrages existants. Ce travail sera également l'occasion d'identifier les liens et les complémentarités avec d'autres méthodes d'évaluation de la durabilité du béton.

IV.1.1.1. Essais de durabilité sur béton et ses constituants :

Le béton est un matériau composite, c'est-à-dire fabriqué à partir de l'assemblage de granulats, de ciment, d'eau et d'adjuvants.

C'est le matériau maître dans les constructions contemporaines car il présente le double intérêt :

- D'être produit à moindre coût;
- D'être extrêmement malléable.

En effet, il existe autant de recettes de fabrication d'un béton que de constructions.

Selon la nature des ouvrages, il peut plus ou moins être résistant, à l'épreuve des chocs thermiques, perméables ou endurants.

A. Les essais sur béton :

- Essais à l'état frais.
- Essai de compression.
- Essai d'étalement.
- Masse volumique.
- Teneur en air.
- Résistance en traction.
- Résistance à la flexion.
- Module d'élasticité statique.
- Coefficient de Poisson.
- Essais de fluage.



Figure IV.2 : Les essais sur béton (compression traction ...).

❖ **Carbonatation :**

- Résistance au gel.
- Dilatation thermique.
- Perméabilité à l'eau et à l'air.
- Carbonatation accélérée.
- Réaction vis-à-vis de l'alcali-réaction.
- Réactivité sulfatique.
- Essais chimiques et microstructuraux.



Figure IV.3 : Les essais de carbonatation.

B. Les essais sur constituants :**❖ Essais sur ciments :**

- Temps de prise.
- Stabilité à la chaud.
- Résistance à la flexion et à la compression.
- Masse volumique.
- Retrait ou gonflement.
- Chaleur d'hydratation.
- Essai de flexion sur ciment.
- Indice d'activité.
- Finesse.
- Surface spécifique Blaine.
- Besoin en eau.

C. Essais sur granulats :

- Sur sables : masse volumique, friabilité, équivalent de sable
- Sur gravillons : masse volumique, coefficient d'aplatissement, Los Angeles, sensibilité au gel, fragmentation dynamique
- Sur enrochements : masse volumique, résistance au gel/dégel

D. Essais sur additions:

- Indice d'activité.
- Finesse.
- Surface spécifique Blaine.
- Besoin en eau. [Net 1]



Figure IV.4 : Essai de flexion sur ciment.

IV.2- Normes :

L'un des problèmes les plus délicats que rencontre le domaine de la construction est la réparation et le renforcement des ouvrages endommagés.

Vu la rareté des organismes d'études et de contrôle ou les entreprises de réalisation ainsi que les documents de référence utiles.

Un document intitulé "Recommandations techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages endommagés" est mis à la disposition de tous les ingénieurs, techniciens et opérateurs déjà appliqués qui vise en premier lieu les travaux de reprise des bâtiments endommagés par un séisme mais il peut aussi servir de guide pour les autres types d'ouvrages dont l'endommagement provient d'autres origines.

Il est important de noter également qu'il est prévu d'éditer les autres documents complémentaires qui s'intitulent :

- Catalogue des méthodes de réparation et de renforcement.
- Méthodes de diagnostic rapide des bâtiments soumis au risque sismique.
- Méthodes d'évaluation de la résistance des bâtiments soumis au risque sismique.
- Le règlement parasismique algérien (RPA) version 2003.
- Le règlement d'urbanisme en cas de modification de l'aspect extérieur ou d'extension.
- La sécurité des personnes en cas d'incendie et de panique. [M.I et all.2013]

IV.2.1. Les normes des essais de durabilité des structures :

Des normes étrangères françaises ou autres fournissent déjà des procédures d'essais performantiels, le tableau suivant rassemble, par types d'exposition, les modes opératoires

disponibles.

Exposition	Mode opératoire	Référence
Indicateurs généraux	Détermination de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l'eau	AFPC-AFREM (1997)
	Essai de perméabilité aux gaz du béton durci	AFPC-AFREM (1997)
	Mesure de l'absorption d'eau par capillarité	AFPC-AFREM (1997)
	Méthodologie d'approche de la microstructure des bétons par les techniques microscopiques	AFPC-AFREM (1997)
	Estimation du degré d'hydratation par la mesure de la teneur en eau liée	GranDuBé (2006)
	Quantification de la microfissuration des bétons	GranDuBé (2006)
	Détermination de la teneur en alcalins dans un béton durci	GranDuBé (2006)
Carbonatation	Essai de carbonatation accéléré. Mesure de l'épaisseur de béton carbonaté	AFPC-AFREM (1997)
	Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton, Méthodes d'essai, Détermination de la résistance à la carbonatation	NF EN 13295 (2004)
Chlorures	Méthode de prélèvement d'échantillons (poudres) pour la mesure de teneur en chlorure dans le béton	AFPC-AFREM (1997)
	Extraction et dosage des chlorures libres (extraits à l'eau) et totaux dans le béton	AFPC-AFREM (1997)
	Essai accéléré de corrosion par immersion séchage sur éprouvettes de béton armé	AFPC-AFREM (1997)
	Essai de brouillard salin sur grand corps d'épreuve	AFPC-AFREM (1997)
	Essai dynamique de brouillard salin	AFPC-AFREM (1997)
	Extraction et dosage des chlorures libres et totaux dans un béton durci	GranDuBé (2006)
	Détermination des isothermes d'interaction entre les ions chlorures et le béton	GranDuBé (2006)
	Détermination des coefficients de diffusion effectif et apparent des chlorures dans le béton par essais de migration en régime permanent et transitoire	GranDuBé (2006)
	Essai d'immersion pour la détermination du coefficient de diffusion des chlorures en régime non stationnaire par mesure du profil de pénétration.	NT Build 443
	Essai de migration pour la détermination du coefficient de migration des chlorures en régime non stationnaire	NT Build 492
Gel/dégel	Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration	ASTM C 1202-05 (2005)
	Essai d'écaillage des surfaces de béton durci exposés au gel en présence d'une solution saline	NF P 18-420 (1995)
	Essai de gel sur béton durci, Gel dans l'eau – Dégel dans l'eau	NF P 18-424 (1994)

	Essai de gel sur béton durci, Gel dans l'air – Dégel dans l'eau	NF P 18-425 (1994)
	Détermination au microscope des vides d'air et des paramètres du réseau de vides d'air dans le béton durci, Partie 2 – méthode modifiée de comptage par point	ASTM C 457-98 (1998)
Sulfates	Produits de calage et/ou scellement à base de liants hydrauliques, Essai de tenue à l'eau de mer et/ou à l'eau à haute teneur en sulfates	NF P 18-837 (1993)
	Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution	ASTM C 1012 - 95a (2000)
	Standard test method for potential expansion of Portland-cement mortars exposed to sulfates	ASTM C 452 - 02 (2002)
Lixiviation	Essai de lixiviation à pH constant	Projet de norme expérimentale (2007)

Tableau IV.1 : Modes opératoires d'essais performantiels.

Type de dégradation	Essai performantiel	Référence	V _{dég}	C
Carbonatation	Essai de carbonatation accéléré.	Adapté de prEN 13295	Profondeur de carbonatation	1,2
Gel/dégel	Cycles de gel/dégel et caractérisation par des essais de fendage ou mesures de vitesses du son.	NBN B 05-203	Diminution de résistance ou de vitesse du son	1,2
Sels de déneigement	Cycles de gel/dégel avec solution de NaCl.	NTN PROBETON 018 ou prENV 12390-9.	Perte de masse	1,2
Pénétration des chlorures	Détermination du coefficient de diffusion des chlorures à l'état non stationnaire par mesure du profil de pénétration.	NT Build 443 (1995)	Coefficient de diffusion des chlorures à l'état non stationnaire	1,4
Eau de mer	Variations dimensionnelles dans une solution d'eau de mer reconstituée.	NF P18-837	Allongement	1,2
Sulfates	Variations dimensionnelles dans une solution à haute teneur en sulfates.	NF P18-837	Allongement	1,2
Acides ou autres produits chimiques	Cycles d'immersion/séchage, solution acide régulée en pH	cf. NBN B 15	Perte de masse	1,2

Tableau IV.2 : Méthodes d'essais relatives aux caractéristiques de durabilité, dans le projet de norme belge NBN B15. [DTR 2]

IV.2.2. Les normes de produit de réparation des structures :

Normes françaises de mise en œuvre des ouvrages NF DTU, normes européennes sur les produits de construction, normes de conception des ouvrages (Eurocodes)... : les normes dans le secteur de la construction font partie des règles de l'art depuis des décennies. Elles constituent des éléments de référence incontournables pour les acteurs de l'acte de construire en tant que gages de qualité et de sécurité, d'aide à la mise en œuvre des réglementations, ou d'appui en termes d'assurance. [A.E.2013]

Les principales normes relatives aux produits de réparation sont les suivantes :

Ouvrages d'art, Normes sur les techniques de réparations			Année
NF P 95-101	Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie – Reprise du béton dégradé – Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés		1990
Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique			
N° de normes	Titre	Nature du liant	Année
NF P 18-800	Définitions, classification, conditionnement, marquage, conditions de réception	H – R	1989
NF P 18-802	Contrôle sur chantier	H – R	1992
Produits ou systèmes de produits destinés aux réparations de surface du béton durci			
NF P 18-840	Caractères normalisés garantis- Normes d'essais garantis – Normes		1993
NF P 18-852	Essais d'adhérence sur surfaces sciées	H – R	1993
NF P 18-853	Essai d'adhérence après cycles thermiques sur surfaces sciées	H – R	1993
NF P 18-854	Essai de tenue aux chocs répétés sur surfaces sciées	H – R	1993
NF P 18-855	Essai de perméabilité aux liquides avec surfaces sciées	H – R	1992
NF P 18-856	Essai de tenue aux rayonnements U.V.	R	1993
NF P 18-857	Essai de tenue aux chocs sur surfaces sciées après cycles	H – R	1993
NF P 18-858	Essai d'adhérence sur surfaces rugueuses	H	1993
NF P 18-859	Essai d'adhérence après cycles thermiques sur surfaces rugueuses	H	1993
NF P 18-860	Essai de tenue aux chocs répétés sur surfaces rugueuses	H	1993
NF P 18-861	Essai après cycles de gel-dégel, de tenue aux chocs répétés sur éprouvettes à surface rugueuse	H	1993
NF P 18-862	Essai de perméabilité aux liquides sur éprouvette à surface rugueuse	H	1993

H : produits hydrauliques
R : résines de synthèse

Tableau IV.3 : Les principales normes relatives aux produits de réparation.

La norme européenne EN 1504 définit les produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton. Elle se compose de dix parties et de 65 méthodes d'essai. Les dix parties sont présentées dans ce tableau

<i>EN 1504-1</i>	Termes et définitions de la norme
<i>EN 1504-2</i>	Caractéristiques des produits/systèmes de protection de surface pour béton
<i>EN 1504-3</i>	Caractéristiques de réparation structurale et non structurale
<i>EN 1504-4</i>	Caractéristiques de collage
<i>EN 1504-5</i>	Caractéristiques d'injection
<i>EN 1504-6</i>	Caractéristiques d'ancrage des barres d'acier d'armatures
<i>EN 1504-7</i>	Caractéristiques de protection contre la corrosion des armatures
<i>EN 1504-8</i>	Maîtrise de la qualité et l'évaluation de la conformité des sociétés de fabrication
<i>EN 1504-9</i>	Principes généraux régissant l'utilisation des produits/systèmes de protection et de réparation des structures en béton
<i>EN 1504-10</i>	Informations concernant l'application sur site des méthodes et systèmes de contrôle de la qualité des travaux

Tableau IV.4 : Parties de la norme EN 1504.

La partie 9 de la norme définit deux grandes familles de dégradation, la dégradation des bétons et la corrosion des armatures. Elle établit aussi 11 principes de réparation incluant la réparation des défauts du béton pour les six premiers principes et jusqu'à la corrosion des armatures pour les quatre derniers principes. On présente dans le tableau IV.1.4 les principes de solution pour la corrosion des armatures. Ces principes peuvent être répertoriés en deux familles, les méthodes électrochimiques et les méthodes non électrochimiques. L'application des méthodes nécessite au préalable une bonne connaissance du mécanisme de corrosion, un bon diagnostic et une bonne maîtrise de la technique. Les méthodes non électrochimiques sont connues pour être des méthodes classiques de réparation, assez simple à appliquer et moins coûteuses, contrairement aux méthodes électrochimiques. [DTR 3]

<i>Principe</i>	<i>Définition</i>	<i>Méthodes fondées sur le principe</i>
Principe 7	Préservation ou restauration de la passivité de l'armature	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de la couverture de l'armature avec mortier ou béton hydraulique supplémentaire. - Remplacement du béton contaminé ou carbonaté. - Ré alcalinisation électrochimique du béton carbonaté - Ré alcalinisation du béton carbonaté par diffusion. - Extraction électrochimique du chlorure
Principe 8	Augmentation de la résistivité électrique du béton	<ul style="list-style-type: none"> - Limitation de la teneur en humidité par des traitements de surface, des revêtements ou par recouvrement.
Principes 9 10 et 11	Contrôle et protection cathodique	<ul style="list-style-type: none"> - Limitation de la teneur en oxygène (au niveau de la cathode) par saturation ou revêtement de la surface - Application d'un potentiel électrique - Badigeonnage de l'armature avec des revêtements contenant des pigments actifs - Badigeonnage de l'armature avec des revêtements de protection - Application d'inhibiteurs sur le béton

Tableau IV.4.1 : Principes et méthodes relatifs à la corrosion des armatures.

La norme NF EN 206-1 :

Garantit la durabilité de la structure vis-à-vis des agressions extérieures et les normes relatives aux produits préfabriqués en béton intègrent cette nouvelle approche, en mettant à la disposition du prescripteur une définition d'un ensemble de classes d'exposition pour prendre en compte l'environnement dans lequel se trouve l'ouvrage ainsi que les risques d'agressions et d'attaques auxquels il va être exposé pendant sa durée de service.

Cette évolution s'inscrit dans une logique de progrès visant à optimiser la qualité des bétons et à maîtriser la durabilité des ouvrages.

Un béton durable est un béton compact (présentant une faible porosité) dont les constituants de qualité ont été bien choisis conformément aux normes.

Cependant, quelles que soient les précautions prises pour adapter et optimiser sa formulation, il ne pourra assurer sa fonction durablement que si les « règles de l'art » ont été respectées lors de sa fabrication (malaxage efficace adapté à la formulation, respect des tolérances sur les

constituants) et de sa mise en œuvre (vibration correcte, cure adaptée, prise en compte des conditions climatiques lors du bétonnage, retraits maîtrisés, respect des valeurs d'enrobage des armatures, etc.).

Pour obtenir la durabilité spécifiée, il convient de respecter les recommandations ou les normes d'exécution des ouvrages tels que le fascicule 65, le DTU 21, ou les normes des produits préfabriqués ainsi que la norme NF EN 13369 pour les produits structuraux. [DTR 3]

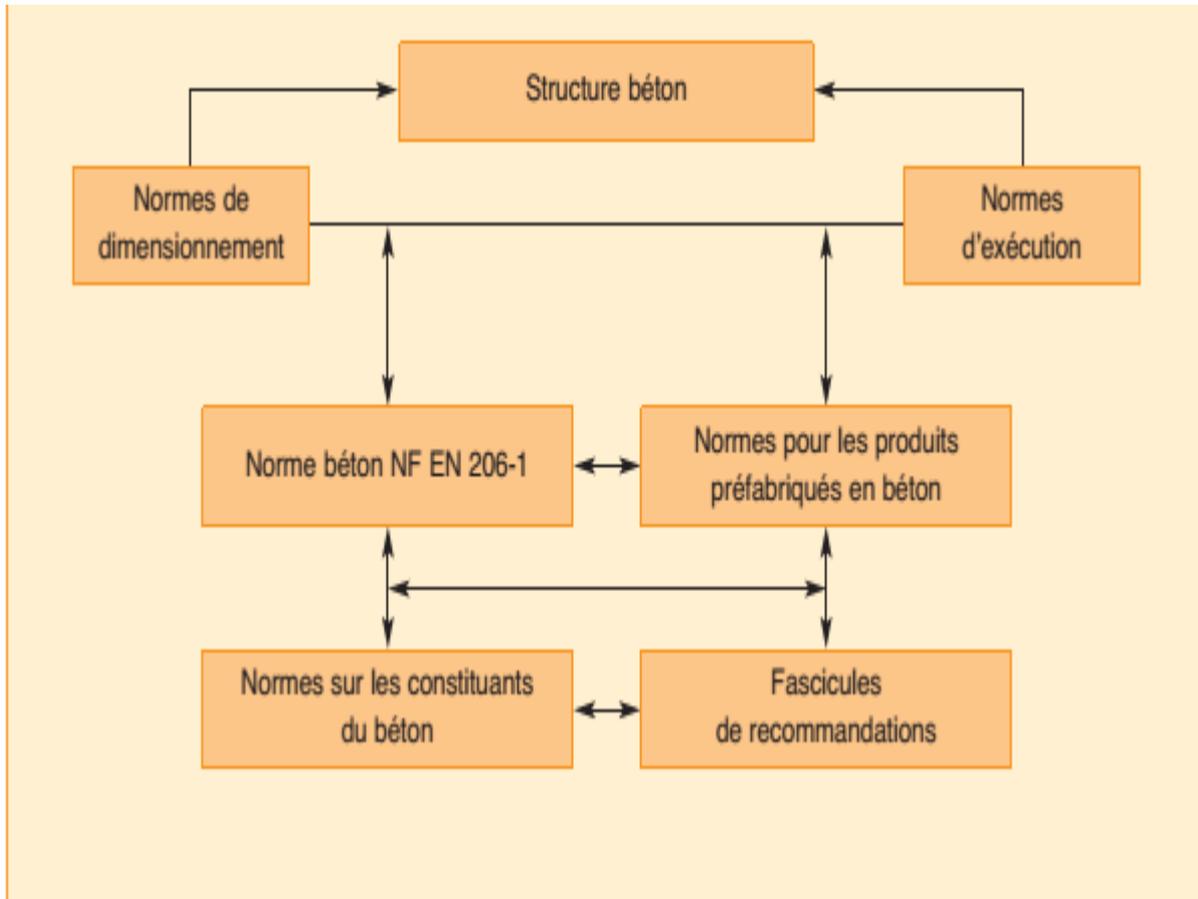


Figure IV.5 : Le dispositif normatif du béton.

Chapitre V :
Etude d'un cas réel

Chapitre V : Etude d'un cas réel : Réhabilitation de l'hôtel Mermoura

-GUELMA-

V.1- Introduction :

Lors de mon stage de fin d'étude qui s'est déroulé au sein du - CENTRE DE DIAGNOSTIC ET D'EXPERTISE - C.D.E (ANNABA), j'ai pu récupérer une étude d'expertise de l'hôtel Mermoura, et voici le rapport détaillé de notre intervention :

Nous avons limité et ciblé seulement deux opérations faisant partie des travaux de réhabilitation de l'ouvrage cité en objet : à savoir les facteurs et les paramètres techniques qui seront la référence et la justification qui permettent à procéder à des travaux de réfection et de démolition locale et partielle.

A cet effet, une équipe technique du CTC-EST (agence de Guelma) s'est rendue sur le lieu, et a effectué une investigation et vérification des désordres observés et signalés dans le rapport d'expertise présenté par le BET, chose qui a permis de s'assurer de la conformité des états des désordres et des lieux indiqués sur les plans fournis par le BET, et de faire une interprétation précise qui peut être critique, et par la suite donner un complément aux insuffisances constatées en termes de diagnostic et de recommandations.



Figure V.1 : Site de l'hôtel.

V.1.1. Localisation graphique du projet :

L'ouvrage objet est l'hôtel Mermoura situé sur la rue Ali Chorfi en plein centre-ville de GUELMA. L'hôtel Mermoura dont le début de la réalisation remonte aux années soixante-dix (réceptionnée en 1980) s'étale sur une surface bâtie de 4000 m² et environ 13500 m² de planchers.

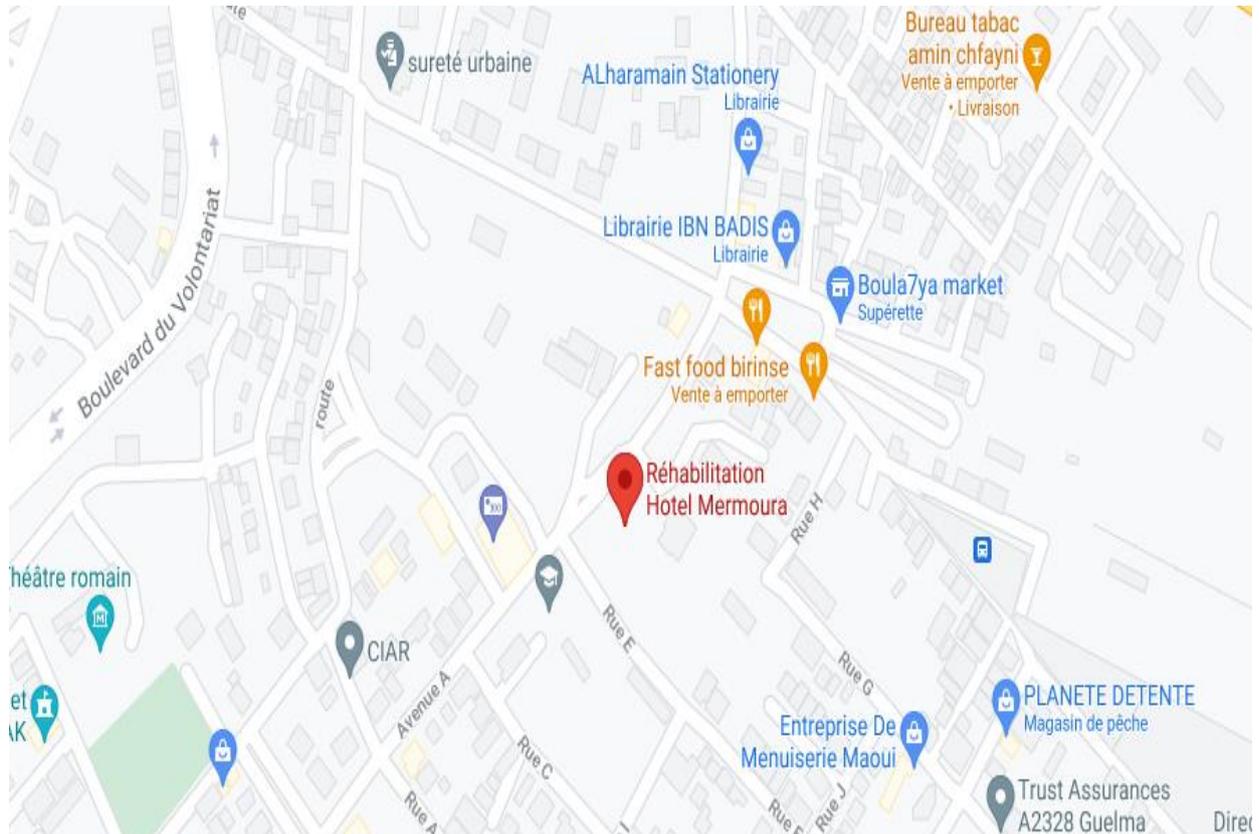


Figure V.2 : Plan de situation.

V.1.2. Présentation du projet :

- ✓ Nom de projet : Réhabilitation de l'hôtel Mermoura Guelma
- ✓ Nom de l'ouvrage : l'hôtel Mermoura
- ✓ Maître de l'ouvrage : Entreprise de Gestion Touristique de Annaba
- ✓ Age approximatif (environ 45 ans).
- ✓ Constructions destinées à usage collectif
- ✓ Système de contreventement de la structure : Structure en béton armé et voiles.
- ✓ Système de fondation : Radier général, semelles isolées pour les vestiaires.
- ✓ Constructions adjacente : Il n'y a pas de constructions adjacentes à notre ouvrage.



Figure V.3 : Vue de l'hôtel avant la réhabilitation.

V.2- Etat des lieux avant le commencement des travaux :

V.2.1. Description de l'ouvrage :

L'hôtel comprend : trois blocs en béton armé séparés par deux joints de rupture. La partie centrale de l'hôtel est composée d'un sous-sol, RDC et deux niveaux.

La structure porteuse est constituée de voiles en béton armé de 20cm d'épaisseur avec des planchers en dalles pleines de 15cm d'épaisseur et des dalles en corps creux sur d'autres parties.

La partie gauche qui est irrégulière en plan et en élévation est composée d'un sous-sol, un RDC et deux niveaux.

Son ossature est également constituée de voiles de 20cm d'épaisseur, avec des dalles en béton armé de 15cm d'épaisseur et des dalles en corps creux sur d'autres parties.

La partie droite est également irrégulière en plan et en élévation est composé d'un sous-sol, d'un RDC et trois niveaux.

Sa structure porteuse est composée de voiles en béton armé de 20cm d'épaisseur et de portiques (poteaux et poutres) sur une grande partie de sa surface en plan.

Les planchers sont identiques aux précédents (dalles pleines).

L'accessibilité entre deux niveaux est assurée par plusieurs escaliers de trois et deux paliers selon le type, ainsi que par un ascenseur unique prenant pour appui une cage d'ascenseur en béton armé conçue au niveau du jour de l'escalier à trois volées.

Le remplissage extérieur est réalisé en maçonnerie double parois en brique creuse à base de terre cuite.

Le même matériau est également utilisé pour les cloisons de séparation intérieure.

L'ensemble des terrasses de l'hôtel sont de type inaccessible, avec des acrotères de 60cm de hauteur en béton armé réalisés périphériquement sur leur contour.

Le système d'étanchéité réalisé sur toutes les terrasses est de type traditionnel avec un revêtement multicouches en feutres bitumés collées par un enduit d'imprégnation à chaud.

Il est à signaler l'existence d'un étage technique au-dessus du RDC sur la partie centrale et la partie gauche.

Ce niveau sert au passage de l'ensemble des gaines de ventilation, conduites d'alimentation en eau, passage de câbles et autres réseaux qui sont ensuite acheminés à travers des gaines techniques verticales visibles dans les couloirs menant vers les chambres.

V.2.2. Désordres constatés :

Au fur et à mesure des années, même une structure solide et résistante peut s'user et s'abîmer. Les principaux désordres constatés sont :

1. Eclatement du béton avec corrosion des armatures pour tous les niveaux et dans différents endroit pour les voiles et les planchers en béton armé.

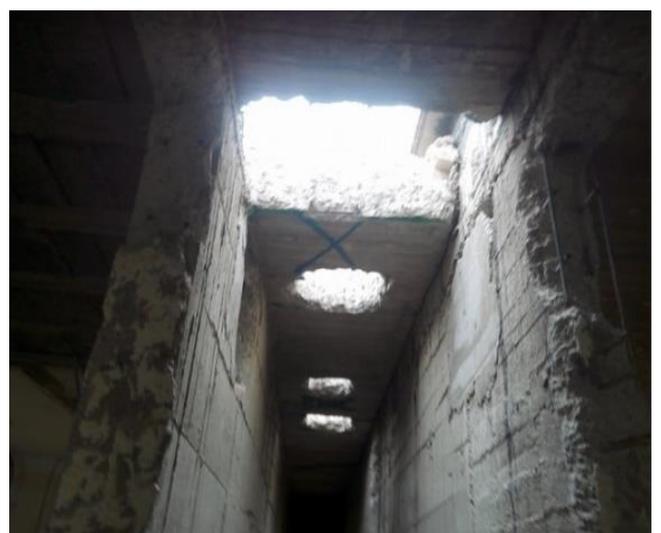


Figure V.4 : Eclatement de béton avec corrosion des armatures.

2. Trace d'infiltration d'eau, cloquage de la peinture intérieure et extérieure, fissures et chutes des enduits de revêtement, déformation des faux plafonds, détérioration de l'étanchéité des terrasses inaccessibles.



Figure V.5 : Trace d'infiltration d'eau.



Figure V.6 : Fissures et chutes des enduits de revêtement, déformation des faux plafonds.



Figure V.7 : Détérioration des complexes d'étanchéités des terrasses inaccessibles.

3. Le passage anarchique à travers les planchers et voiles en béton armé surtout au niveau sous-sol (là où on a constaté le plus le problème de dégradation du béton), de la tuyauterie liée à la chaufferie et équipement hydrofuge, des eaux potables, des différentes descentes des eaux et en plus les câbles électriques.
4. La présence des fissures horizontales au niveau de la jonction des panneaux de façades en maçonneries et éléments horizontaux de la structure.
5. La présence des panneaux en maçonneries, éléments de façades qui traversent les joints entre blocs.
6. Détachement des couvres joints des façades.
7. Stagnation des eaux dans les endroits des périphéries des sous-sols.



Figure V.8 : Dégradation du béton.



Figure V.9 : Détachement des couvres joints des façades.

Les désordres dont on a constatés et collectés sont dues essentiellement à l'absence d'entretien, la négligence, le dysfonctionnement, la vétusté, et l'intervention mal étudiée et irresponsable chose conduisant à la fatigue des différents systèmes liés à l'étanchéité à l'eau soit au niveau de la structure du béton armé soit au niveau des différents matériaux de corps d'états liés aux gros œuvres.

V.2.3. Évaluation des dommages et ses causes :

❖ Niveau générale des dommages :

Le niveau de dégradation est très avancé au niveau de la qualité du béton et les armatures.

❖ Causes probables :

Les causes probables de ces dégradations sont dues essentiellement à :

- ✓ La négligence et au manque d'entretien.
- ✓ La corrosion des aciers sont dues à l'oxydation des armatures
- ✓ Le volume de l'oxyde produit par la corrosion des armatures provoque des fissures dans le béton.
- ✓ La dégradation totale de l'étanchéité.

 **Photos de l'hotel pendant la réhabilitation :**



V.2.4. Elaboration du rapport final d'expertise (l'expertise de projet) :

Vu ce constat nous pouvons conclure ce qui suit :

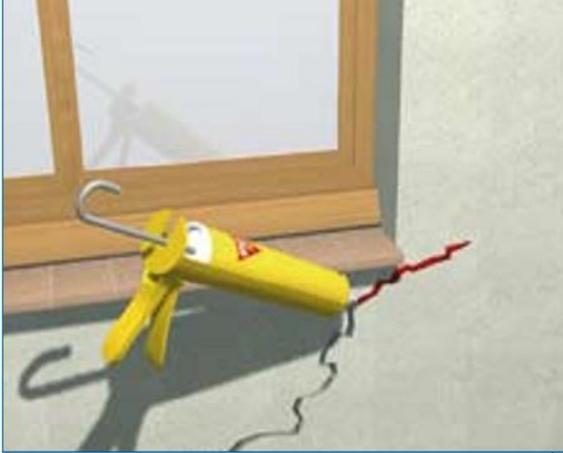
- ✓ Le niveau de dégradation est très avancé et constaté au niveau de la qualité du béton des poteaux ainsi que leurs armatures.
- ✓ L'absence des voiles de contreventements.

V.2.4.1. Les causes et les solutions de dégradation de structures :

Phénomènes	Constatations	Causes de dégradation	Solutions
<u>Dégradation de l'étanchéité</u>			
Figure V.6	<ul style="list-style-type: none"> - Fissures verticale et inclinée au niveau des poteaux et poutres. - Déformation des faux plafonds. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ La contrainte thermique provoquée sur les poutres et les poteaux. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Refaire une nouvelle protection d'étanchéité (avec différentes couches...). ❖ Traitement des fissures par certain produit comme (SIKA LATEX ; ...etc.). ❖ Préparation des fissures par injection de la résine de réparation.
Figure V.5	<ul style="list-style-type: none"> - Humidité au niveau du plafond. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Engorgement de canalisation des eaux pluviales. ❖ Défaut de réalisation de la dalle. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Entretien ou rénovation de canalisation (descente d'eau ; gargouille ...). ❖ Nettoyage et brossage des surfaces qui peuvent être humides. ❖ Utilisation du produit anti humidité (comme SIKA GRAD).

Traitement des armatures

<p>Figure V.4</p>	<p>- Erosion du béton.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Les facteurs météorologiques. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Démolition et restauration du béton.
<p>Figure V.4</p>			<ul style="list-style-type: none"> ❖ Utilisation des mortiers de réparation avec le ciment hydrofuge. <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Eliminer le béton friable, brosser les aciers pour enlever la rouille.</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Après gâchage à l'eau, appliquer le SIKA MONOTOP 610 AC au pinceau ou à la brosse sur les armatures.</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;">  <p>Gâcher à l'eau le mortier SIKA MONOTOP sélectionné et l'appliquer à la truelle en serrant.</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Lisser le mortier à la talochette éponge ou au polystyrène dès qu'il commence à tirer.</p> </div> </div>
<p>Figure V.8</p>	<p>- L'érosion du béton et l'apparition des armatures aux niveaux : Poteaux et semelles.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Enrobage insuffisant. ❖ Contraintes météorologiques. ❖ Le volume de l'oxyde produit par la corrosion des armatures provoque des fissures dans le béton. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Utilisation de résine pour adhérence béton frais / béton durci (comme SIKA DUR 32 LP). <div style="text-align: center;">   </div>

<p>Figure V.5</p>	<p>- Apparition des micro fissures au niveau des plafonds.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Les charges climatiques ❖ La corrosion des armatures 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Traitement les fissures par le produit mastic-colle polyuréthane. (comme SIKAFLEX PRO 11 FC) 
<p>Figure V.6</p>	<p>- Séparation des enduits au niveau du plafond et maçonnerie.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Les facteurs météorologiques. ❖ Humidité. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Utilisation d'enduit de ragréage a gâché à l'eau (comme SIDERBAT).
	<p>- Dégradation des escaliers.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Les facteurs météorologiques. ❖ L'utilisation répétitif. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Démolition des escaliers et réalisation de nouveaux escaliers.

V.2.4.2. Les travaux à réaliser sont :**1. Partie réfection :**

Nous recommandons ce qui suit :

- ✓ Prévoir des solutions bien ciblées qui permettent d'éliminer les différents paramètres causant les désordres et non seulement procéder à une réparation et un traitement qui peut être non durable.
- ✓ Faire un traitement soigné des parois des réservations créées au niveau des planchers et voiles en béton armé, pour le passage de différentes conduites, tuyauteries et descentes des eaux.
- ✓ Réparation et/ou remplacement des conduites, tuyauteries et descentes ayant des défauts d'emboîtement et des fuites d'eau ou de vapeur.
- ✓ Préconiser des systèmes adéquats qui assurent la protection des niveaux sous-sols contre les eaux de ruissellement qui peuvent induire à des inondations chose aussi qu'une vérification de l'état des réseaux d'assainissement est indispensable.
- ✓ Procéder à une bonne vérification de l'état des joints horizontales (entre planchers des blocs) et verticales (entre façades des blocs) et procéder à l'élimination ou l'intervention auprès des différents obstacles qui gênent le bon fonctionnement de ces derniers et par suite faire un traitement de ceux qui sont incriminés suivit d'une mise en place des couvre joints esthétiques surtout au niveau des façades.

2. Partie essai sur béton :

L'interprétation des résultats donné par l'essai d'auscultation dynamique effectué par le laboratoire LTP-EST (Annaba) sur quelques voiles et poteaux au niveau des (03) blocs nous a permis de constater une qualité de béton variable de faible à acceptable (avec des vitesses respectivement inférieures et supérieures à 4000m/s).

A cet effet et pour une bonne confirmation sur la qualité du béton des éléments testés, il est jugé indispensable qu'un autre laboratoire réalise le même essai (essai non destructif) ou passé directement à la phase d'un essai destructif à savoir : le carottage.

3. Partie démolition :

- ✓ Prévoir des sondages au niveau des fondations du bloc à droite.
- ✓ La reconstruction de la salle de conférence.
- ✓ Présenter la procédure de démolition détaillée en termes de : méthodes, techniques et matériels.
- ✓ L'entreprise choisie pour les travaux de démolition est qualifiée et spécialisée pour ce type de travaux et dont cette dernière doit préconiser les consignes générales de sécurité à savoir l'installation de grillage et barrières de sécurité.

- ✓ Prendre les précautions nécessaires de l'impact de la démolition sur l'environnement (les déchets, les poussières, la pollution du sol et des eaux).
- ✓ Après les travaux de démolition et de nettoyage, procéder à une évaluation sur l'état des matériaux et de la structure de la partie découpée de celle qui a été démolie.

A. travaux de démolition :

Dans le cadre des réaménagements proposés dans le projet de la réhabilitation de l'hôtel Mermoura outre les travaux touchant les éléments secondaires (cloisons) appelés à être supprimées ou déplacées, il y a également besoin de :

- ✓ Création d'ouvertures (passages) dans les voiliers en béton armé ou élargissement de certaines ouvertures déjà existantes.
- ✓ Démolition d'une partie du bâti existant pour sa reconstruction en un nouveau volume répondant aux exigences d'exploitation (création de salle de conférences).
- ✓ Démolition des escaliers extérieurs pour leur reconfiguration afin de s'adapter aux nouveaux aménagements.
- ✓ Démolition de la couverture du patio au dernier niveau (terrasse) pour réaménager la terrasse en espace couvert par une structure légère.
- ✓ Démolition de murs en maçonnerie de différentes épaisseurs.
- ✓ Dépose du revêtement en carreaux y compris la couche de mortier sous revêtement.

Dans le but de mener à bien l'opération de démolition, nous avons procédé à l'examen des limites de l'ouvrage, et analyser l'impact des travaux projetés sur la stabilité de l'hôtel lui-même et les répercussions sur son environnement immédiat.

B. La délimitation de l'ouvrage ainsi que les étapes de démolition seront comme suit :

1. Coté latéral droit :

Afin de doter l'hôtel Mermoura d'un centre de conférences, il a été retenu la démolition de la partie abritant actuellement la brasserie en sous-sol et la salle polyvalente au RDC.

Il sera érigé à la place un bloc en R+1 devant servir à abriter la salle de conférences, deux salles de réunion et un foyer.

La démolition interviendra dans la limite décidée en veillant à mettre en œuvre un procédé de démolition qui retracera les étapes à suivre pour réussir cette opération avec un minimum d'impact sur le bâti existant et sur l'environnement de l'hôtel.

Ce procédé doit tenir compte des vibrations qui peuvent être générées sur les éléments structuraux de l'édifice (non concerné par la démolition).

Nous recommandons d'utiliser des moyens légers au début de l'opération et de prendre comme axe de départ, l'extrémité avec l'ancien bâti.

L'intérêt de cette recommandation, est de permettre de démolir d'abord les panneaux de dalles le long de cet axe, puis en utilisant une scie à béton appropriée, on sectionne les poutres des trames mitoyennes.

Ceci est de nature à isoler le reste de la partie à démolir par rapport à l'édifice existant, pour ensuite continuer l'opération de démolition en toute sécurité (l'usage de grands moyens sera alors permis).

2. Démolition de l'escalier extérieur :

L'escalier se trouvant sur la façade postérieure, sera démoli pour ériger à la place un autre escalier qui reliera les deux salles de cafétéria du niveau sous-sol et du RDC.

Une partie de cet escalier servira à restituer le passage de la réception vers l'espace extérieur de l'hôtel (piscine, espace de détente...).

La structure du nouvel escalier sera totalement dépendante du bâti existant.

La démolition de l'escalier existant interviendra par la technique de sciage des parties mitoyennes avec la structure existante, ce qui permettra de le désolidariser complètement, puis on procède à son effritement par des marteaux piqueurs afin de faciliter son évacuation en portions transportables en dehors du site.

3. Démolition de la couverture du patio :

La couverture du patio central de l'hôtel sera démolie pour les besoins de réaménagement de la terrasse.

En effet toute la surface de la dite terrasse sera aménagée en espace couvert annexe à l'activité prévue au dernier étage.

Une structure métallique légère est prévue pour faire la toiture avec une couverture de type pergola.

Par ailleurs, la démolition de la couverture en béton initiale sera exécutée soigneusement comme suit : la démolition de la maçonnerie la démolition des panneaux de dalles en premier lieu, et le sciage des éléments en béton (poteaux et poutres) en deuxième lieu pour éviter de générer trop de vibrations pouvant être préjudiciables pour la structure de la dalle existante.

4. Travaux à l'intérieur de l'hôtel :

Pour les besoins des nouveaux aménagements, il sera prévu quelques démolitions d'éléments en béton armé à l'intérieur de l'hôtel.

Il s'agit essentiellement de la réalisation ou l'élargissement d'ouvertures sur les voiles, la création de réservations sur les planchers pour le passage de nouvelles gaines ou canalisations et la démolition de certains escaliers intérieurs pour les reconfigurer de sorte à les faire adapter aux aménagements projetés.

La technique de démolition à retenir pour ce genre d'interventions est exclusivement le sciage qui permet la réalisation des travaux envisagés sans nuire à la structure existante en évitant la propagation des vibrations qui peuvent être générées par les moyens classiques (marteaux piqueurs).

5. Infrastructure :

La démolition l'infrastructure sera abordée différemment de la superstructure.

La démolition devra s'arrêter au niveau des fondations et d'étudier convenablement la jonction entre les fondations.

D'après les plans initiaux de l'hôtel, il existe un joint de rupture en infrastructure, les fondations du bloc concerné peuvent être elles aussi démolies avec un maximum de précaution pour éviter les affouillements sous les semelles du bâtiment central.

6. Stabilisation des parois des fouilles :

Lors de la démolition de l'infrastructure qui se trouve forcément à un niveau bas par rapport au bâti existant et par rapport à la route, il y'a lieu de procéder à la stabilisation des parois des fouilles par un système de blindage en béton projeté ou autre dispositif capable de retenir les terres et assurer la stabilité des parties supérieures.

Le dispositif à mettre en œuvre devra recevoir, au préalable l'avis du maitre d'ouvrage et du maitre d'œuvre.

C. Phasage à respecter pour l'opération de démolition :

1. Balisage de la zone de travail par une clôture de chantier.
2. Coupure du courant électrique, du gaz et de l'alimentation en eau par les services concernés.
3. Démolition des murs de séparation en maçonnerie, dépose des menuiseries et différents appareillages d'électricité et de plomberie susceptibles d'être récupérés.
4. Démolition de la superstructure de l'ensemble des parties désignées sur plan :
 - ✓ On commence par le sciage des éléments horizontaux (planchers et poutres) et verticaux (poteaux et voiles périphériques) sur une bande de 1m par rapport à la limite envisagée.

- ✓ Cette étape nous permet de désolidariser et de délimiter clairement les parties à démolir par sciage (la bande de 1m mitoyenne à la structure qui restera en place) et les parties à démolir par des grands moyens (le reste de la superstructure du sous-sol et du RDC).
- ✓ On procède à la démolition des parties désolidarisées de l'extérieur vers l'intérieur, en veillant à démolir d'abord les planchers, puis les poutres et ensuite les éléments verticaux (poteaux et voiles).
- ✓ La démolition progressera par bandes transversales, de préférence par trame structurelle, jusqu'à atteindre le joint formé par sciage, réalisé au début de l'opération.
- ✓ Maintenant qu'il ne reste que la bande de 1m mitoyenne à l'hôtel existant, on procède au fractionnement des planchers par petites portions, faciles à évacuer par un moyen de levage (grue ou engin mécanique).
- ✓ Le fractionnement se fera par sciage. Par la suite, on procédera au sciage des poutres, toujours par portions pour faciliter l'intervention du moyen de levage.
- ✓ La même opération se poursuivra pour les éléments verticaux (poteaux et voiles) jusqu'à achèvement de l'opération.

5. **Démolition de l'infrastructure :**

Il sera procédé à la démolition des semelles éloignées par rapport à la mitoyenneté avec le bâtiment existant par les moyens lourds (engins mécaniques ou marteaux piqueurs).

En revanche, une attention particulière doit être accordée, et en concertation étroite avec le bureau d'études de suivi, pour le traitement ou le renforcement des semelles communes.

Il ne sera admis, si une partie des semelles devrait être démolie, qu'à la technique de sciage pour éviter d'endommager le reste des semelles.

Photos de l'hôtel après la réhabilitation :



Figure V.10 : Vue du parking après la réhabilitation.



Figure V.11 : Vue du jardin thématique principale.



Figure V.12 : Vue de la piscine.



Figure V.13 : Vue de l'entrée principale de l'hôtel Mermoura.

V.3- Conclusion :

La détermination des causes des dégradations du béton est essentielle pour réussir les interventions en termes de qualité et durabilité.

Le processus menant à la source du problème est inclus dans un outil de diagnostic adapté.

Cette façon de procéder permet par la suite d'améliorer le choix des méthodes et des produits les plus aptes à combler les défaillances causées par l'endommagement sur l'ouvrage.

Afin de mener à bien cette opération de démolition, il est demandé de prendre toutes les précautions à même d'éviter tout risque au voisinage, de suivre les recommandations citées plus haut ainsi que les étapes de mise en œuvre édictées précédemment.

Il y a lieu de tenir en compte des normes de sécurité, telle que la mise en place d'un périmètre de sécurité par une clôture provisoire au cours des travaux afin d'éviter tout risque d'accident. D'autre part, il est nécessaire de se rapprocher des services de SONEGAS et de l'ADE pour la coupure de l'alimentation en eau, en gaz et en courant électrique.

Il est strictement interdit d'utiliser tout matériel vibrant pouvant porter préjudice aux éléments de structure des bâtisses avoisinantes.

Par ailleurs, tous les gravats et matériaux issus de la démolition de cet ouvrage devront être stockés à l'intérieur du terrain en attendant d'être évacués vers la décharge publique (aucun gravats ne devrait être stocké sur la voie publique).

L'entrepreneur veillera au bon déroulement de l'opération en matière de sécurité pour les personnes et les biens notamment le port du casque et chaussures de sécurité pour les ouvriers, une attention particulière sera donnée à la démolition des éléments qui sont mitoyens au voisinage en prenant toutes les précautions afin de garantir un bon déroulement de l'opération.

En fin, il faut noter la nécessité de faire exécuter ces travaux par une entreprise qualifiée et d'assurer le suivi des travaux par le bureau d'études.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les missions menées dans le cadre de ce projet de fin d'études ont permis de recenser les principales techniques d'investigation d'ouvrages en béton armé utilisées.

On a pu voir qu'il existait deux types de diagnostic, l'un en utilisant des méthodes destructives et l'autre avec des méthodes non destructives.

Il a été souligné l'importance du diagnostic dans le processus de réhabilitation d'ouvrages en béton armé, c'est à ce moment que l'on détermine les pathologies présentes ainsi que leur ampleur.

Cela est nécessaire afin de prodiguer les réparations les plus adaptées.

Nous avons vu aussi les différents matériaux et techniques de réparation d'un ouvrage en béton armé.

Ces techniques ont pour buts principaux de redonner à chaque élément ses caractéristiques géométriques et également de redonner à la structure ses capacités à reprendre les efforts qui lui sont appliqués.

Nous avons vu les différentes méthodes de réparation d'un ouvrage 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.

Dans tous les cas, le but est de faire en sorte que la structure puisse reprendre à nouveau les charges qui lui sont appliquées voir de pouvoir reprendre un supplément de charge si cela s'avère nécessaire pour que l'ouvrage réponde aux attentes et à l'évolution des besoins des utilisateurs ou des propriétaires.

Il existe un certain nombre de conseils relatifs aux choix d'une technique de réhabilitation d'un ouvrage existant :

- ✓ Il ne faut jamais engager de travaux destinés à lutter contre une dégradation, aussi peu onéreux soient-ils, sans avoir au préalable procédé à un diagnostic sérieux permettant de déterminer le type de désordre à combattre.
- ✓ Lorsque le diagnostic démontre que plusieurs causes se conjuguent pour entraîner la dégradation d'un ouvrage, plusieurs interventions sont en général nécessaires. La sagesse commande alors de ne pas les engager ensemble mais successivement, en commençant par la moins onéreuse et en n'entamant la suivante qu'après avoir jugé les résultats de la précédente.

- ✓ Il ne faut pas confondre les remèdes s'attachant aux causes du mal à ceux n'ayant pour seul objet que camoufler ses effets.
- ✓ Avant d'entamer un traitement important, et donc coûteux, il est recommandé, chaque fois que cela est possible, de procéder à un essai pour juger de son efficacité dans le cas concerné.
- ✓ Avant de porter un jugement sur les résultats de cet essai, il convient d'attendre un délai raisonnable (par exemple pour le cas de l'humidité, plusieurs mois sont en effet nécessaires pour que l'eau accumulée avant traitement dans les maçonneries puisse s'évaporer ou pour que l'humidité réapparaisse après application d'un remède inefficace).

Ce projet de fin d'études nous a permis de découvrir de nouveaux aspects de l'ingénierie du génie civil.

Lors de notre formation, nous étudions principalement les différents modes de construction et les matériaux utilisés dans le neuf, mais très peu de connaissances ont été acquises concernant la réhabilitation d'ouvrages existants.

Pourtant, ce domaine tend à se développer surtout dans le cadre du développement durable.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[M.N.2017] MERABET Nor-Eddine, Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en génie civil « Etude du renforcement d'un bâtiment en béton armé par les matériaux composites » Université Aboubekr BELKAID, Année 2017.

[B.N.2011] BOUALLA Nabila, mémoire de licence « Réhabilitation des ouvrages en béton armé » Université d'Oran. Année 2011.

[O.K.2015] Dr. OUZAA Kheira, polycopié « Réhabilitation des structures », Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed BOUDIAF U.S.T.O, Année 2015.

[M.I et all.2013] MAIZI Ibtissam, BENJOUDI Mouslam, mémoire de master II « Réhabilitation des structures en béton armé », Université 8 Mai 1945 Guelma, Année 2013.

[H.M.2013] HAMOUCHI Meryem, mémoire de master II « Pathologie et réparation des ouvrages en béton armé », Université 8 Mai 1945 Guelma, Année 2013.

[J.P.1997] Jean PERRET, " Guide de la maintenance de bâtiments », Editions du moniteur, 1997, (59-119).

[B.S.2010] Bertrand SCHWARTZ, « Réhabilitation des bâtiments. Structures et enveloppe, solutions techniques », Edition Lavoisier, 2010.

[K.S.2017] KHOBIZI Sena, mémoire de master II « Réhabilitation des structures en béton armé », Université 8 Mai 1945 Guelma, Année 2017.

[L.M] Lorry-Alan MOALIC « Réhabilitation d'ouvrages en béton armé du diagnostic au confortement » (ANNEXE 1 : Fiches réhabilitation) INSA de Strasbourg spécialité génie civil.

[A.F.2016] ABOU CHAKRA Farid, mémoire Présenté en vue d'obtenir Le diplôme d'ingénieur Cnam « Renforcement des poteaux en béton armé au moyen de polymère renforcé par fibre de carbone - comparaison des codes.» conservatoire national des arts et métiers ISSAE – centre associé du Liban soutenu le 09 mars 2016.

[M.M.2012] MEGUENNI Mustapha, BEKHALED Abdelouahab, Mémoire pour l'Obtention du diplôme de master en génie civil « La réhabilitation d'un ancien bâtiment industriel R+3 «AIN TEMOUCHENT»», Université Aboubekr BELKAID, Tlemcen, 2012.

[P.G.2011] Patrick GUIRAUD «Les solutions techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages de génie civil en béton», Construction moderne / Annuel "Ouvrages d'art" 2011.

[J.A.2016] JOSEPH Abou Zeid; 'Information et communication pour l'ingénieur Génie Civil' –ENG 222; « Méthodes de réparation et de protection des ouvrages en béton armé. » Institut des Sciences Appliquées et Économiques - Université Libanaise ISAE – Cnam Liban, Centre du Liban associé au Conservatoire national des arts et métiers – Paris; on 30 April 2016.

[C.B.2014] Christophe BRICARD; Journée Technique « Gestion d'ouvrages d'art maritimes et portuaires réparation du béton » 4-11-2014.

[DTR 1] Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle.

[Net1] [http://www.btpconsulting.fr/activites/auscultation-reconnaissance/ 21/04/2021](http://www.btpconsulting.fr/activites/auscultation-reconnaissance/21/04/2021)

[DTR 2] Documents scientifiques et techniques «Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion», Novembre 2003.

[A.E.2013] Abd Errahmane SOUFI; « Etude de la durabilité des systèmes béton armé : mortiers de réparation en milieu marin.», Université de La Rochelle France Année 2013.

[DTR 3] « Durabilité des ouvrages en béton ».

Annexe

