**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA**




**F**aculté de **T**echnologie

# Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en génie civil

---

# Réparation des ouvrages en béton dégradés par la corrosion d'armatures

---

Présenté par

**FERGANI Omar**

**BOURETAA Hichem**

Proposé et Dirigé par

**Dr. ZEMIR Ismail**

**Promotion 2021**

# *Remerciements*

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH, pour nous avoir guidés vers le bon chemin de la lumière et du savoir, mais aussi pour nous avoir donnédu courage, de la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos profondes gratitudes à notre encadreur M.ZEMIR pour l'encadrement de ce mémoire, pour son aide, la patienceet la confiance qu'il nous a accordée.

Nos sincères remerciements vont également à tous les enseignants dugénie civil de l'université de Médéa.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

## DEDICACES :

Nous dédions ce travail à tous nos amis et collègues, nos familles, et surtout à nos parents qui nous ont soutenue depuis le début jusqu'à ce que nous ayons atteint ce stade, nous leur souhaitons une vie longue et prospère.

## ملخص

الخرسانة المسلحة مادة هيكلية أساسية مستخدمة على نطاق واسع لأكثر من قرن، سواء في الهندسة المدنية أو في البناء
يمكن أن يتدهور بسبب جودته الأصلية أو ضغوط التشغيل أو الأسباب البيئية. من بين أسبابه، نجد بشكل عام تآكل التعزيزات وهو السبب الرئيسي للتدهور.
من أجل وقف تقدم التآكل وتقليل فقد جزء من الخرسانة والفولاذ الذي يمكن أن يسبب ويؤدي إلى فقدان قدرة تحمل العناصر الهيكلية، من الضروري إصلاح عناصرها الهيكلية.



**الكلمات الرئيسية:** الخرسانة المسلحة، التشخيص، المتانة، التآكل، التدهور، الإصلاح.



## Résumé

Le béton armé est un matériau de base de structures largement utilisé depuis plus d'un siècle, aussi bien dans le génie civil que dans le bâtiment.
Il peut se dégrader à cause de sa qualité originelle, des sollicitations d'exploitation ou des causes d'ordre environnemental. Parmi ses causes, on trouve généralement la corrosion des armatures qui est la principale cause de dégradation.

Afin d'arrêter l'avancement de la corrosion et de réduire la perte de section de béton et des aciers qui peut provoquer et entraîner une perte de capacité portante des éléments structuraux, ilest nécessaire de réparer ses éléments structuraux.



**MOTS CLES** : Béton armé, Diagnostic, Durabilité, Corrosion, Dégradation, Réparation.



## Abstract

Reinforced concrete has been a basic structural material widely used for over a century, both in civil engineering and in construction.
It can deteriorate due to its original quality, operating stresses or environmental causes. Among its causes, we generally find the corrosion of reinforcements which is the main cause of degradation.

In order to stop the advancement of corrosion and reduce the loss of section of concrete and steels which can cause and lead to loss of bearing capacity of structural elements, it is necessary to repair its structural elements.



**KEY WORDS**: Reinforced concrete, Diagnosis, Durability, Corrosion, Degradation, Repai

# Table des matières :

INTRODUCTION GENERALE .....1
CHAPITRE I : LES PATHOLOGIES DU BETON ARME : CAUSES ET CONSEQUENCES.....1
1.1Historique du béton armé : .....2
1.2 Les pathologies de béton armé : causes et conséquences : .....2
1.2.1 Les causes physiques de dégradation : .....2
1.2.2 Les causes chimiques de dégradation : .....3
1.2.3 Les autres causes de dégradation des bétons : .....3
1.3 Généralité sur la corrosion : .....6
1.3.1 Définition : .....6
1.3.2 Les types de corrosion : .....6
1.3.3 Les ouvrages concernés par la corrosion des armatures : .....8
1.3.4 La corrosion des aciers dans le béton : .....10
1.3.4.1 Présentation générale : .....10
1.3.4.2 Processus de la corrosion : .....11
1.3.4.3 Dépassivation des armatures : .....13
1.3.4.4 Facteurs influant de la corrosion : .....16
1.3.4.5 Conséquences des dommages dus à la corrosion des armatures : .....19
1.3.4.6 Corrosion généralisée : .....19
1.3.4.7 Corrosion locale par piqûres : .....19
1.3.4.8 La sécurité vis-à-vis des usagers : .....20
1.3.4.9 La stabilité de l'ouvrage : .....20
1.4 Conclusion : .....21
CHAPITRE 2 : CARACTERISATION ET DIAGNOSTIC DES STRUCTURES EN BETON ARME .....22
2.1 Introduction : .....23
2.1.1 Les étapes clés de processus de réparation et de protection selon la Norme EN1504.....24
2.1.2 Gestion des ouvrages existant .....27
2.1.2.1 Évaluation technique des ouvrages d'art.....27
2.1.2.2 Indices de priorité .....27
2.1.3 Domaine public .....28
2.1.4 Domaine privé.....28
2.2 Les principales étapes d'un diagnostic .....28
2.2.1 Réalisation d'un diagnostic .....28
2.2.2Choix des investigat .....29

2.2.3.1 Investigations non destructives.....30
2.2.3.2 Relevé visuel.....31
2.2.3.3 L'analyse de ferraillage.....31
2.2.3.4 L'auscultation sonique.....32
2.2.3.5. Scléromètre :.....33
2.2.4.1 Investigations destructives :.....33
2.2.4.2 Carottage d'éléments en béton armé.....34
2.2.4.3 Prélèvements d'acier :.....35
2.2.4.4 Potentiel de corrosion :.....35
2.2.4.5 Test à la carbonatation :.....37
2.3 Conclusion :.....38
CHAPITRE 3 : Réparation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion.....39
3.1 Introduction.....39
3.2 Réparation d'un ouvrage en béton armé.....39
3.3.1 Le ragréage.....39
3.3.2 Le béton projeté.....41
3.3.2.1 Projection par voie sèche et par voie humide.....42
3.3.2.2 Mode Opératoire :.....43
3.3.2.3 Matériaux utilisé :.....44
3.4 Protection des ouvrages en béton :.....50
3.4.1 Le revêtement imperméabilisant :.....50
3.4.2 Les inhibiteurs de corrosions.....52
3.4.3 La déchloration.....54
3.4.4 La réalcalinisation.....56
3.4.5 La protection cathodique.....57
3.5 Utilisation des MAP et BAP dans la réparation :.....60
3.6 Renforcement des ouvrages en béton.....67
3.6.1 Renforcement par rajout d'armature :.....68
3.6.1.1 Mise en place des armatures complémentaires :.....69
3.6.1.2 Protection des armatures matériaux composites :.....69
3.6.2 Choix des méthodes de renforcement du béton.....69
Conclusion générale :.....71
Référence bibliographique :.....72

## Listes des figures

### CHAPITRE 1 : Béton armé et Corrosion :

Fig.1.1. Ouvrage concerné par la corrosion du béton en milieux marin……5
Fig.1.2. Ouvrage d'un parking d'aéroport concerné par la corrosion du béton…… 6
Fig.1.3. Au niveau des modillons au premier plan, des épaufrures laissent apparaître les aciers touchés par un phénomène de corrosion actif……..……..……... 6
Fig.1.4 : Représentation schématique des processus de corrosion de base des aciers dans le béton…….……12

### CHAPITRE 2 : CARACTERISATION ET DIAGNOSTIC DES STRUCTURES EN BETON ARME

Figure 2.1 : Schéma des étapes de diagnostic d'un ouvrage en béton armé……..31
Figure 2.2 : Schéma du choix d'investigation……32
Figure 2. 3 : Schéma des investigations non destructives.....33
Figure 2.4 : Principe de la détection par fenêtre……....34
Figure 2.5. Représentation schématique d'un scléromètre…….35
Figure 2.6 Pénétromètre…….36
Figure 2.7 : Graphique enrobage-carbonatation…..40
Figure 2.8 : Courbe du facteur a par rapport le temps……....40

### CHAPITRE 3 : Contrainte et réparation

Figure 3.1 : Dégagement des armatures……43
Figure 3.2 : Renforcement au moyen de béton projeté……..44
Figure 3.3 : Techniques de projection……45
Figure 3.4 Mortier Adhésif……67
Figure 3.5 : Un mélange onctueux d'un mortier adhésif……..68

## Liste des tableaux

## CHAPITRE 1 : BETON ARME ET CORROSION

## CHAPITRE 2 : CARACTERISATION ET DIAGNOSTIC DES STRUCTURES EN BETON ARME

## CHAPITRE 3 : CONTRAINTE ET REPARATION

Tableau 3.1 : Principes et méthodes de réparation applicables aux matériaux de réparation . **47**

Tableau 3.2 Raccordement de la protection cathodique ..... **62**

# INTRODUCTION GENERALE

Les structures en béton armé représentent une part majoritaire du patrimoine dans le domaine des infrastructures de transport, de l'énergie ou de l'hydraulique mais aussi dans celui des bâtiments et des monuments historiques. [1]
Les causes de dégradation peuvent être différenciées selon leur origine, à savoir les causes de nature chimique (carbonatation, corrosion, etc.), de nature physique (cycle gel-dégel, retrait, etc.) et de nature mécanique (surcharge, séisme, explosion, incendie, etc.) D'autres erreurs sont associées à la planification, au calcul et à l'exécution.

La structure en béton armé est menacée non seulement par les charges qui lui sont imposées, mais aussi par l'environnement dans lequel elle est construite. D'une manière générale, la structure de base montre des signes de détérioration, qui peuvent être observés assez rapidement. Les dégradations peuvent aller d'une simple fissuration latente à un événement réel conduisant à une rupture partielle ou totale de la structure. [2]

Tout devient plus délicat lorsque les signes ne sont observés qu'après un certain seuil de dégradation, représente surtout un stade plus ou moins avancé de la maladie. Et par conséquent, la présence de corrosion est difficile à diagnostiquer à l'œil nu. Ensuite, il est nécessaire de recourir à des méthodes d'essais destructifs ou non destructifs. Enfin, du point de vue de la modélisation, il semble clair que le résultat de tout calcul dépend fortement de l'ajustement du modèle particulier utilisé.

La corrosion qui cause de si graves dommages à nos structures en béton armé n'est pas prise au sérieux. Cela peut être dû au fait que de nombreux ingénieurs et techniciens n'ont pas mené de recherches sérieuses pour évaluer les dommages structurels avant de commencer les travaux de maintenance. Soit parce qu'ils ne se sont pas familiarisés avec le phénomène de corrosion et les processus pour y faire face, soit parce qu'ils se fient uniquement à la détérioration visuelle d'un aspect structurel comme la rouille, les suintements, la rupture du béton, les fissures, etc. [3]

# CHAPITRE I : LES PATHOLOGIES DUBETON ARME : CAUSES ET CONSEQUENCES

## 1.1 Historique du béton armé :

Le premier type de béton est apparu dans la première moitié du XIXe siècle lorsque la chaux hydraulique (un liant utilisé à l'époque) a été remplacée par le ciment Portland. Vers 1870, des barres d'acier sont insérées dans le béton pour compenser sa faible résistance à la traction, ce qui donne du béton armé ; cependant, ce n'est qu'en 1900 que le béton armé remplace progressivement les structures métalliques dans le génie civil. La première théorie du calcul statique apparaît. 30 ans plus tard et les progrès du XXe siècle ont fait du bétonarmé le principal matériau de construction utilisé aujourd'hui.[3]

## 1.2 Les pathologies de béton armé : causes et conséquences :

L'érosion physique et chimique continue des structures placées dans un environnement plus ou moins agressif au cours du temps, est la principale cause de dégradation du béton. La dégradation peut provenir de défauts initiaux, qui peuvent être dus à une mauvaise conceptionou à une mauvaise mise en œuvre du béton. [4]

### 1.2.1 Les causes physiques de dégradation :

Usure : L'usure s'accompagne d'une perte de matière causée par des éléments de friction abrasifs ou le passage répété de piétons, de véhicules et de chariots industriels.
Érosion : Perte de matière causée par la friction entre les solides et les fluides contenant des particules solides en suspension et en mouvement.
Cavitation : L'abrasion de la structure hydraulique, qui se caractérise par la formation de boules de vapeur lorsque la direction de l'écoulement rapide de l'eau change soudainement, ce qui entraînera une perte de masse.
Impact : Le béton éclate sous l'impact des équipements et outils de transport ou de levage.

Surcharge : Ce sont des structures qui supportent une surcharge qui provoque la fissuration etl'éclatement du béton.

Incendie : Par exemple, une augmentation de la température lors d'un incendie

peut provoquer l'éclatement du béton.

Cycle de gel-dégel : Après un grand nombre de cycles de gel-dégel, une partie du béton va se désintégrer et se désintégrer en surface. C'est le cas des structures de montagne et des chambres froides. [4]

### 1.2.2 Les causes chimiques de dégradation :

Réaction alcaline ou dégradation du béton : Lors de la mise en place en milieu humide, la réaction entre la solution interstitielle du béton alcalin et certains granulats, un gel gonflant apparaît du fait du micro-gonflement et de l'éclatement du béton.

Réaction sulfate : Le sulfate provient principalement de l'environnement extérieur. Ces ions ne sont pas passifs vis-à-vis de la matrice cimentaire et peuvent conduire à la formation de certains composés gonflants, tels que l'étrangéité, le gypse et la portite bizarre. Ces composés font gonfler le béton, créant une tension dans celui-ci, ce qui peut provoquer des fissures.

Corrosion : L'érosion des matériaux par des réactifs chimiques. Sur les métaux, la corrosion est l'oxydation.

### 1.2.3 Les autres causes de dégradation des bétons :

Nous avons vu qu'en raison de l'érosion physique et chimique des bétons, l'environnement dans lequel ils se trouvent va se dégrader. Certaines raisons, principalement dues à une mauvaise mise en œuvre, participeront également à la dégradation du béton :

Mauvais positionnement des renforts

Placer la barre d'armature (généralement de l'acier) trop près de la finition du béton pendant leprocessus de coulée finira par provoquer des fissures en surface.

Le béton utilisé est de mauvaise qualité

Un béton à trop faible teneur en ciment et à faible vibration présentera des défauts d'aspect : nids d'abeilles, fissures, fissures superficielles et trous laissant des barres d'acier visibles.

Trop de vibrations

Un temps de vibration excessif entraînera la ségrégation du béton, entraînant une mauvaise répartition de la composition. Une répartition inégale des forces peut provoquer des fissures etun élancement dans le béton.

Manque de durcissement du béton

Par temps chaud et venteux, la cure du béton est essentielle. Sans protection de

surface, lasurface du béton deviendra de la poterie.

Cycle d'humidité/sécheresse

Des cycles répétés d'humidité/sécheresse peuvent modifier la taille du béton, provoquant des fissures et la corrosion de l'acier.

La corrosion est provoquée par l'interaction physico-chimique entre le matériau et son environnement, conduisant à des modifications des propriétés du métal, généralement accompagnées d'une dégradation fonctionnelle de ce dernier (modification de ses propriétés mécaniques, électriques, optiques, esthétiques, etc.)

Voici quelques photos d'ouvrages en béton armé dégrades par la corrosion d'armatures :



**Fig. 1.1** Ouvrage concerné par la corrosion du béton en milieux marin. [5]



**Fig. 1.2** Ouvrage d'un Parking d'aéroport concerné par la corrosion du béton. [6]



**Fig.1.3** Au niveau des modillons au premier plan, des épaufrures laissent apparaître les aciers touchés par un phénomène de corrosion actif. [7]

## 1.3 Généralité sur la corrosion :

### 1.3.1 Définition :

La corrosion fait référence à la détérioration causée par la réaction chimique entre les matériaux et les oxydants (la plupart de l'oxygène et des cations H +). Les effets mécaniques purs doivent être exclus (il ne s'agit pas, par exemple, de rupture sous impact), mais la corrosion peut se combiner avec des effets mécaniques et produire une corrosion sous contrainte et une fatigue par corrosion. De même, elle implique certaines formes d'usure de surface, qui peuvent être causées à la fois par des raisons physico-chimiques et mécaniques.

### 1.3.2 Les types de corrosion :

**Corrosion uniforme** :

Il s'agit d'une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface. Cette attaque a été observée sur des métaux exposés à des environnements acides.

**Corrosion galvanique ou corrosion bimétallique :**

Elle est due à la formation de cellules électrochimiques entre deux métaux aux potentiels de corrosion différents. Le métal avec le potentiel de corrosion le plus négatif subira une corrosion accélérée causée par un autre métal.

**Corrosion spongieuse :**

Elle est due à la différence de disponibilité en oxygène entre les deux parties de la structure, résultant en des cellules électrochimiques. Cette attaque sélective sur les métaux a été observée dans des fissures et d'autres endroits qui ne sont pas facilement exposés à l'oxygène.

**Corrosion sous contrainte** :

Il s'agit d'une fissuration du métal provoquée par l'action combinée d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique.

Dans la plupart des cas (couples galvaniques, crevasses, piqûres, etc.), la formation de pieux corrodés est à l'origine de la corrosion.

Les cellules de corrosion sont des cellules électrochimiques formées lorsque deux parties d'une structure ont des potentiels différents. La différence de potentiel est généralement causée par l'hétérogénéité du matériau ou du milieu environnant. Surface Ensuite, l'acier est composé d'un grand nombre de micro-batteries, elles-mêmes constituées d'une région dite anodique qui libère des électrons et d'une région cathodique qui consomme des électrons.
En milieu aqueux, le processus de corrosion électrochimique de l'acier peut être décrit de manière simplifiée à travers deux réactions électrochimiques fondamentales qui se produisent simultanément.

Les ions fer ferreux Fe2+ traversent la solution et peuvent ensuite être oxydés en ions ferriques Fe3+. Dans la région cathodique, les électrons générés sont consommés pour maintenir l'équilibre des électrons. La réaction cathodique correspondante est la réaction de l'oxygène dissous dans l'eau (3a) ou la réaction de réduction des protons et la libération d'hydrogène (3b) : $O2 + 2H_2O + 4e - 4OH -$ (3a) [8]

Lorsque l'effet synergique des ions ferreux et des ions hydroxyde le permet, les ions hydroxyde OH- formés dans la solution peuvent se combiner avec des ions ferreux Fe2+ et précipiter à la surface de l'acier sous forme d'hydroxyde ferreux :

$$Fe^{2+} + 2OH^{-}Fe(OH)_2$$

La réaction chimique mentionnée ci-dessus se produit parce que la barre d'acier est rouillée lorsqu'elle est exposée à l'atmosphère pour la première fois avant d'être mise dans le coffrage. Lorsque du béton frais est placé autour de ce type d'acier, l'eau mélangée pénètre dans les trous de rouille, où se forme progressivement de la ferrite de calcium hydratée ($4CaO, Fe2O3, 13H20$). Mais surtout, cette eau réagit avec l'acier métallique et forme une fine couched'hydroxyde de fer [$Fe$ ($OH$) 2] et de calcium ($Ca$ ($OH$) 2]) dessus.

Tous ces produits à proximité de l'acier font que la solution interstitielle de béton a un pH élevé d'environ 13.

Par conséquent, l'eau de gâchage du béton peut se former autour du produit en acier, le protégeant ainsi par passivation. Plus précisément, sous la rouille, le cadre est recouvert d'une fine couche protectrice de produit blanc, à base de ferrite et d'hydroxyde de calcium.

Si l'agent de gravure pénètre dans le béton et provoque une nouvelle réaction chimique, abaissant ainsi le pH du béton, cette protection disparaîtra. [9]

### 1.3.3 Les ouvrages concernés par la corrosion des armatures :

Les structures affectées par la corrosion des barres d'acier en béton sont :

**Immeuble :**

Acrotères et balcons, dans toutes les ambiances, éléments verticaux et terrasses, en milieu industriel et marin. Ce sont bien sûr les éléments les plus sensibles du bâtiment, soit parce qu'ils sont minces, soit parce qu'il est difficile de maintenir une couverture adéquate.

**Bâtiments industriels :**

Piliers et dalles. En effet, ces éléments sont souvent exposés à des réactifs chimiques. Les poutres sont également un élément particulièrement sensible dans les bâtiments industriels carelles supportent parfois des dalles de plancher. Certaines personnes sont parfois dans un état très surprenant.

**Place de parking :**

Poutres et dalles en milieu marin ou montagnard. Dans les deux cas, cela est lié à la présencede chlorures (provenant respectivement de l'eau de mer et du sel de déglaçage). Il est à noter que de nombreux planchers sont précontraints, augmentant ainsi le risque de corrosion.

**Les composants de la structure préfabriquée :**

Il ne semble pas y avoir de problèmes majeurs à signaler dans cette section,

probablement parce que le béton a été mieux pris en charge et mieux mis en œuvre. Cependant, par exemple, les poteaux téléphoniques semblent inquiéter. Il faut savoir qu'il existe en France un immense pole en béton armé (un pour 2 personnes environ) dont le plus ancien a plus de 60 ans.

En raison de l'utilisation de coagulants à base de chlorure de calcium dans les années 1960 et 1980, il existe également des pathologies importantes qui affectent divers éléments architecturaux. Cela implique des panneaux muraux extérieurs, des garde-corps, des pots de fleurs, etc.

**Ponts et ouvrages :**

Dans ce type d'ouvrage, il semble que les zones les plus sensibles soient le tablier, les supports de superstructure et les équipements de tablier (dont le sel de déglaçage a un impact important).

**Réservoir (souterrain, hors sol, hors sol) :**

Le principal problème de ces ouvrages est lié aux fuites d'eau, qui sont soit dues à l'existencede fissures (raisons diverses : thermiques, mécaniques, etc.) chlore). Chimie).

Pour les structures existantes présentant des fissures ou des fuites, les réparations comprennent les défauts de scellement ou l'installation de matériaux imperméables.

**Silo :**

Les silos de stockage de matériaux granulaires ou pulvérulents (grains, ciment, etc.) sont fortement contraints, notamment lors du chargement et du déchargement. Ces contraintes peuvent provoquer des fissures, qu'elles soient verticales ou horizontales. Ceux-ci peuvent être à l'origine d'infiltrations d'eau, entraînant la corrosion des barres d'acier.

**Refroidisseur d'air industriel :**

Ces structures sont soumises à des environnements difficiles (vapeur entraînée ou brouillard d'eau sous forme de gouttelettes d'eau, soleil extérieur, pluie ou gel) qui peuvent créer des contraintes qui provoquent des fissures. De plus, le fort gradient d'eau est à l'origine

de transfert de vapeur d'eau, qui peut être à l'origine de la détérioration du béton

**Cheminée :**

Les cheminées (notamment les cheminées industrielles) doivent résister à des environnementstrès sévères, notamment acides (acide sulfurique et acide chlorhydrique). Par conséquent, d'une part, l'alcalinité du béton est neutralisée, et d'autre part, en raison de l'attaque des sulfates (par formation de gypse), le fût apparaîtra. Cette attaque est parfois profonde et généralement irrégulière en fonction de la hauteur.

**Structure portuaire :**

Ceux situés au bord de la mer ont été attaqués par le chlorure. La résistance à la corrosion du béton est liée à la corrosivité de l'environnement (zone de marée, éclaboussures, éclaboussures). Les défauts d'enduit ou de qualité du béton sont immédiatement mis en évidence.

**Conduite en béton armé et précontraint :**

La plupart sont enterrés, et des fissures surviennent lorsque la protection du béton n'est plus suffisante (carbonisation, présence de chlorures).

**Repère historique :**

Il faut aussi signaler que les monuments historiques (églises ou autres ouvrages de Perret ou de Le Corbusier), ou bâtiments en béton armé, ont de plus en plus de limitations, notamment en termes d'entretien.

De plus, la pathologie spécifique, du fait de ses propres composants (réaction alcaline, ettringite retardée, etc.) est un cas particulier, qui peut provoquer diverses maladies (fissuration, déformation). [8]

### 1.3.4 La corrosion des aciers dans le béton :

### 1.3.4.1 Présentation générale :

La haute alcalinité dans le béton, offre une excellente protection contre la corrosion pour les barres d'acier ; Dans ces conditions de pH, l'acier est protégé par la formation d'un filmadhésif extrêmement fin appelé film de passivation, qui peut être constitué de divers oxydes.

En présence d'eau et d'oxygène, le film est détruit par diverses substances telles que les chlorures, les sulfates et le dioxyde de carbone ; Le métal se dépassive et devient sensible à la corrosion avec le temps. Formation de nouveaux oxydes. Oxydes au moins deux fois le volume de fer d'origine (six fois plus grand pour certains oxydes), ce qui conduit à la formation de fissures dans le béton, accélère le processus de corrosion en favorisant la diffusion d'oxygène et de substances corrosives.

La corrosion des barres d'acier est le résultat de processus électrochimiques et ne se produit que dans certaines conditions, car pour corroder l'acier, les deux doivent être donnés:

Électrolytes à conductivité ionique non négligeable

Une quantité suffisante d'oxygène atteint le quartier catholique ;-La présence d'agents agressifs.

### 1.3.4.2 Processus de la corrosion :

Les processus de base de la corrosion des aciers dans le béton sont illustrés à la figure

**1.5.Processus de corrosion :**

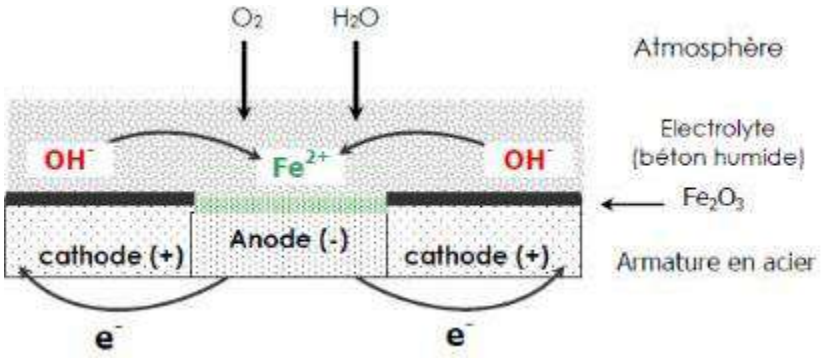



**Fig.1.4** : Représentation schématique des processus de corrosion de base des aciers dans le béton [9]

L'agent corrosif pénètre dans l'environnement puis déclenche une oxydation qui se développe et donc peut fissurer le revêtement. L'oxygène peut diffuser à travers le réseau poreux dans le béton, se dissoudre dans la solution dans les pores et finalement atteindre la surface des barres d'acier. Sur cette surface, dans le quartier catholique, l'oxygène est généré après une réaction électronique.

Dans la plupart des cas, il s'agit d'une réaction cathodique liée à la corrosion de l'acier d'armature dans le béton, mais dans les bétons carbonatés à faible pH (89), selon la réaction, l'eau peut être réduite en hydrogène : $2H20 + 2e - H2 + 20H - (1\ ou\ 5)$

Quelle que soit la réaction cathodique impliquée, la production d'ions hydroxyde augmentera le pH de la solution d'espacement horizontal dans la zone cathodique.

La réaction d'anode correspondante est basée sur la réaction (2) pour dissoudre l'acier. Cela conduit à une réduction de la section transversale de l'acier, qui peut éventuellement se rompre.

Les ions Fe2+, un produit intermédiaire de corrosion, s'oxyderont en Fe3+ dans certaines conditions, s'accumuleront à la surface de l'acier ou se dissoudront dans la solution interstitielle, et même diffuseront à des endroits éloignés des barres d'acier selon les caractéristiques environnementales.

Dans la solution interstitielle de béton généralement riche en oxygène et à pH élevé, les ions $Fe2 +$ peuvent être retenus sous forme de $Fe\ (0H)^2$ ou oxydés en ions $Fe3 +$ puis hydrolysés en Fe $(0H)^3$ pour se former sur la surface en acier Un mince film de passivation retarde la dissolution du fer. Dans ce cas, l'acier est bien protégé et il n'y aura pas de dommages de corrosion détectables.

Dans certaines conditions, lorsque le béton a été carbonaté et que le pH de la solution interstitielle descend en dessous de 9 ou lorsqu'une masse suffisante d'ions chlorure (Cl-) pénètre dans le béton et est saturée d'eau, la barre d'acier peut continuer à sectionner Diminuer, les barres d'acier peuvent casser. Ce procédé est préjudiciable à la longévité de la structure et est bénéfique lorsque le béton est saturé d'eau car il facilite l'évacuation des ions $Fe^{2+}$ de la surface de l'acier. Ces ions peuvent alors migrer à la surface du béton et y rouiller, mais ces dommages de corrosion n'ont pas d'effet significatif sur le revêtement du béton, ils peuvent même améliorer l'adhérence du béton à l'acier.

Lorsque le taux de corrosion de l'acier est très élevé et que des produits de corrosion qui ne peuvent pas être évacués de la zone de corrosion s'accumulent sur la surface de l'acier, la corrosion devient nocive. Cela peut se produire si la solution interstitielle est riche en oxygène et en substances corrosives et que le revêtement de béton n'est pas suffisamment humide.

Ensuite, les ions Fe2+ partiellement dissous peuvent être oxydés et convertis en oxyde de fer hydraté (Fe2O3, H2O), puis déposés avec l'oxyde et l'hydroxyde ferreux à l'interface acier-béton. Le volume du produit de corrosion est de 2 à 6 fois le volume du métal. Une contrainte de dilatation est générée à l'interface. Plus l'acier se corrode, plus la contrainte est importante. Lorsqu'elle devient supérieure à la résistance à l'étirement, le revêtement se fissure. Ceux-ci Les fissures accéléreront la pénétration des substances corrosives, accélérant ainsi le processus de corrosion. [10]

### 1.3.4.3 Dépassivation des armatures :

Si l'acier a été préalablement recouvert d'un produit de passivation (cas des bétons résistants), cette protection est le plus souvent altérée par l'introduction de deux substances simultanées possibles : le dioxyde de carbone CO2 (carbonatation) et l'ion chlorure Cl- (chloration) en excès Au niveau des renforts. Ensuite, la passivation se produit.

Les deux phénomènes de carbonatation et de chloration s'influencent mutuellement, car la carbonatation peut affecter la diffusion du chlorure dans le béton en modifiant la structure du réseau poreux. En effet, après carbonatation, une diminution de la porosité totale et une redistribution de la taille des pores ont été observées, rendant la pénétration du chlorure plus difficile.

Le mécanisme de passivation comprend les étapes suivantes :

- La couche passive est détruite localement là où la teneur en chlorure ou en dioxyde de carbone est très forte ;
- De la rouille se forme là où la passivation a disparu ;
- La rouille se transforme en des oxydes (ou hydroxydes) poreux si la teneur en oxygène est assez élevée.

Lorsque le pH du béton est inférieur à environ 9, la teneur critique en chlorures et carbonates qui provoquent la passivation de l'acier est très faible, ce qui équivaut à l'eau potable naturelle. Par conséquent, en pratique, ce PH est généralement considéré comme une valeur critique pour la passivation de l'acier. [11]

**LA CARBONATATION :**

La carbonatation se produit par réaction du CO2 avec les produits d'hydratation du ciment : silicate de calcium hydraté (CSH) et hydroxyde de calcium (CH) sont transformés en carbonate de calcium CaCO3. La carbonatation réduit l'eau interstitielle. Le taux de carbonatation dépend de nombreux facteurs tels que la concentration en CO2, la teneur en eau, la perméabilité, le type de liant et la température.

En présence de bases alcalines, telles que $Na0H$ ou $K0H$, la solubilité de la chaux est relativement faible et la réaction peut se ralentir.

Cependant ces bases alcalines se carbones elles aussi :

$CO_2 + 2X0H\ X2CO_3 + H2O$ ..... (2 ou 7)

Avec X = Na ou K

La carbonatation des bases alcalines Augmente la solubilité de la chaux qui peut alors se carbonner en plus Grande quantité :

X2CO3 + Ca (OH)2 CaCO3 + 2XOH (8)

Avec X = Na ou K

La carbonatation est un phénomène progressif qui, avec le temps, atteint des couches de plus en plus importantes. Le taux de carbonisation est fonction de nombreux paramètres dont les plus importants sont la perméabilité du milieu environnant et le taux d'humidité relative.

Le taux de carbonatation est compris entre 40 % et 80 % avec l'humidité la plus élevée, et 60% est considéré comme la valeur la plus critique. Dans un environnement sec, il n'y a pas assez d'eau pour dissoudre le $CO_2$, et dans un environnement très humide, où le béton est saturé, la diffusion du $CO_2$ sera fortement ralentie.

La teneur en cendres volantes (> 30%) et en scories (> 50%) dans le béton est très élevée, ce qui peut accélérer considérablement sa vitesse de carbonisation. Par conséquent, la carbonisation commence à la surface du béton et implique une certaine épaisseur du matériau (appelée profondeur de carbonisation). [11]

**LES IONS CHLORURES :**

Les structures en béton armé sont soumises à la pénétration de substances chimiques tellesque les chlorures, qui conduisent à leur dégradation due à la corrosion de l'armature. La réduction des incertitudes sur les propriétés du béton permet une meilleure prédiction de ces phénomènes et une optimisation de la maintenance. Dans le cas des ouvrages à grande échelle

tels que les ouvrages portuaires et maritimes, la caractérisation de la variabilité spatiale du mécanisme de dégradation est donc un sujet important, soutenu par le développement de méthodes de surveillance de la santé structurelle (SHM). Cet article est destiné à contribuer à la "aide à la décision pour la mise en œuvre de tels systèmes, et ce à travers une analyse de sensibilité de la probabilité de défaillance dans le SLS de l'initiation de la corrosion par pénétration de chlorures des structures en béton armé vis-à-vis à la variabilité spatiale de ses paramètres. Les résultats obtenus suggèrent que la caractérisation de cette variabilité spatiale est généralement inutile afin d'obtenir une précision de la probabilité de défaillance et qu'il est préférable de concentrer les efforts sur la caractérisation de la corrélation entre la concentration surfacique moyenne et la diffusivité moyenne des chlorures à diriger.[11]

Le chlorure dans le béton peut provenir de deux sources différentes. Ils sont disponibles en mélangeant : De l'eau chlorée ou des granulats contaminés. Ils proviennent de l'environnement (atmosphère marine, sels de déglaçage, produits chimiques) et diffusent dans le béton. Le chlorure existe sous deux formes spécifiques :

- Chlorure libre dissous dans la solution interstitielle ;
- Le chlorure piégé ou lié se combine avec du ciment hydraté et ajouté ou est physiquement adsorbé sur la paroi des pores.

Les ions chlorure qui pénètrent dans le béton peuvent réagir chimiquement avec l'aluminate tricalcique (C3A dans la nomenclature des cimentiers) pour former du monochloroaluminate hydraté ($C3A.CaCl2.10H2O$), relativement stable dans le béton. La concentration en hydroxyde dans la solution interstitielle a une influence significative sur la proportion de chlorure lié : plus la concentration en hydroxyde est élevée, moins il y a de chlorure dans la solution. D'autre part, une augmentation de la température réduit la capacité de liaison des chlorures, normalement entre 40 et 50 % du chlorure total est combiné.

Seul le chlorure libre participe à la corrosion des barres d'acier. Le chlorure qui atteint les barres d'acier attaque l'acier initialement passivé dans certaines localités. Le film de passivation est localement détruit et expose la zone anodique dans laquelle l'acier se dissout.

La surface restante, toujourspassivée, correspond à la zone cathodique. L'espace de la zone cathodique est beaucoup plus grande que celui de la zone anodique et la profondeur de dissolution de l'acier augmente au lieu de la surface de l'acier, c'est-à-dire des cavités ou des cavernes former. Le mécanisme de cette corrosion est très compliqué car la composition de la

solution de piqûre interne et de la solution poreuse environnante a changé.

Dans la piqûre, les ions chlorure se combinent avec les ions hydrogène dans l'eau pour former de l'acide chlorhydrique. Fe2 + + Cl + H2O Fe0H + + H + Cl (9) H + Cl H + + Cl (10) Ces réactions acidifient la solution en cas de piqûres et réduisent drastiquement le pH entre 3, 8 et 5. Les ions chlorure régénérés restent actifs pendant tout le processus de corrosion et sont donc auto- catalysés. Les ions hydroxydes de la phase interstitielle du béton se combinent alors avec les ions fer-Fe2 + diffusant de la corrosion par piqûres, et la réaction cathodique est la même qu'avec la corrosion en l'absence de chlorure. [12]

Tant que la solution dans le forage est acide, la solution d'acier reste active et le forage devient plus profond.

Si la concentration en ions chlorure dans la solution interstitielle est trop faible, le film de passivation n'est pas endommagé, de sorte qu'une teneur en ions chlorure ou un rapport chlorure/concentration critique est présent. Hydroxyde exprimé en [Cl] / [OH]. Dès que le rapport [Cl] / [OH] dépasse la valeur seuil critique de 1, la solution devient instable : elle devient plus acide. Cette instabilité correspond à la formation de produits de corrosion qui ne peuvent protéger l'acier en présence d'oxygène. Cependant, si le rapport est inférieur à 1, le chlorure n'exerce aucune influence sur la solution, elle reste donc stable.

D'un point de vue pratique, les paramètres pouvant influencer la teneur critique en chlorures sont : la teneur en ciment (et le rapport eau/ciment), la valeur du pH, les propriétés du ciment (fixation des chlorures, etc.) et éventuels additifs (teneur en cendres), etc.), température moyenne du béton, teneur en oxygène et humidité. L'état d'oxyde initial du matériau de renforcement affecte également le niveau critique de chlorure. Avec 0,2% à 0,4% d'ions chlorure par rapport à la masse du ciment, la valeur seuil critique est considérée comme atteinte. A noter que la teneur en chlorures corrosifs après passivation n'a rien à voir avec la vitesse de corrosion du matériaude renforcement. [12]

### 1.3.4.4 Facteurs influant de la corrosion :

La résistance à la corrosion des barres d'acier dans le béton dépend des paramètres liés à l'acier et au béton et des propriétés présentes à leurs interfaces, elle est déterminée par la composition de la solution poreuse du béton et les propriétés métallurgiques du béton. " Les facteurs environnementaux de l'acier (humidité, température, dioxyde de carbone, ions chlorure) ne peuvent pas affecter directement le processus de corrosion, mais ils peuvent provoquer une dégradation du béton et accélérer la pénétration de substances corrosives, ce qui rend la solution des pores en contact avec l'acier le plus corrosif.

Lorsqu'ils atteignent les barres d'acier, les ions chlorure et le dioxyde de carbone corrode la plupart des structures en béton armé. La température et l'humidité, ainsi que d'autres facteurs pouvant dégrader le béton, jouent également un rôle important dans la corrosion de l'acier.Par conséquent, la corrosion de l'acier ne dépend pas d'un seul paramètre, mais de plusieurs paramètres, et l'interaction entre eux peut ou non provoquer la corrosion. Influence de la toiture L'épaisseur de la toiture en béton détermine le temps qu'il faut aux substancescorrosives pour atteindre l'acier. Parfois, la durée de vie utile de la structure peut être considérablement augmentée en augmentant l'épaisseur du revêtement, une barrière mécanique qu'elle peut pénétrer des substances impliquées dans la corrosion de l'acier, ralentir voire empêcher. [12]

**Influence de la composition du béton :**

Tous les facteurs qui régulent la dissolution des pores et la porosité du béton sont des facteurs qui peuvent ou non affecter la corrosion. Le type et la teneur en liants, en granulats minéraux et le rapport E/C (eau/ciment) déterminent les performances du béton. Le choix de la recette du béton et les propriétés de ses principaux composants sont un moyen d'améliorer la résistance à la corrosion du béton. La formulation du béton augmente sa compacité ou réduit sa perméabilité et a généralement un effet positif sur la résistance à la corrosion.

La valeur eau-ciment a une influence majeure sur la porosité du béton : plus elle est élevée, plus la porosité est importante, ce qui favorise la pénétration de substances corrosives et la corrosion des barres d'acier. Le rapport E/C est bien plus important que le type d'adhésif utilisé.

Dans le cas des additifs minéraux, de faibles quantités de cendres volantes et de poussières de silice ont généralement un effet bénéfique, car elles réduisent considérablement la perméabilité, le coefficient de diffusion et la conductivité du béton. Une quantité suffisante permet également de compenser largement les effets néfastes de l'abaissement du pH interne et de l'abaissement de la quantité d'aluminate tricalcique (C3A) induits par l'utilisation de ces additifs.

Influence de l'humidité :

L'influence de l'humidité ou du taux de saturation en eau du béton est importante, car le

taux de corrosion dépend fortement de ce taux, ce qui a un effet direct sur la conductivité, la résistance spécifique et la diffusion de l'eau. 'Oxygène. Si l'humidité est inférieure à 80%, l'oxygène peut facilement atteindre l'acier, mais la faible conductivité du béton augmente, mais la faible conductivité du béton limite le taux de corrosion. Plus l'humidité de l'air augmente, plus la conductivité du béton augmente, mais par contre la diffusion de l'oxygène vers le matériau de renforcement devient de plus en plus difficile. L'humidité relative la plus corrosive est de 70 à 80%. Dans le cas de structures ou de structures partiellement inondées, la corrosion de l'acier n'est généralement pas un problème majeur, car l'oxygène n'atteint presque jamais le matériau de renforcement.

Influence de la résistance spécifique du béton :

La résistance spécifique a une influence considérable sur la corrosion des tiges d'acier, car il existe un lien entre la corrosivité du béton et la résistance spécifique. La résistance électrique spécifique du béton est fonction de la composition de la solution interstitielle, de la microstructure du béton (taille et répartition des pores), de la teneur en humidité et en sel et de la température.

La valeur de résistance spécifique du béton est généralement comprise entre 103 et 107 Ohm/cm. Le tableau 2 montre la relation déterminée entre la résistance spécifique mesurée du béton et la probabilité de corrosion des barres d'acier ainsi que la probabilité de corrosion en fonction de la valeur de résistance spécifique.

Effet de l'oxygène : L'oxygène dissous dans la solution interstitielle est essentiel pour la réaction cathodique du processus de corrosion des barres d'armature en acier. Plus la teneur en oxygène est élevée, plus l'acier se dissout rapidement.

Autres agents agressifs Le sel dans l'eau qui pénètre dans le béton peut provoquer des produits de corrosion sur l'acier ; Par conséquent, les ions sulfate sont de nature similaire aux ions chlorure, et certains sels solubles (tels que le perchlorate, l'acétate et les halogénures autres que les chlorures) peuvent également être corrosifs pour les matériaux de renforcement. [13]

### 1.3.4.5 Conséquences des dommages dus à la corrosion des armatures :

Les taches de rouille et d'intempéries sont causées par la pénétration d'agents de démoulage dans le revêtement en béton et peuvent modifier l'aspect de la structure. D'autre part, des fissures et des fissures dans le béton inquiètent l'administrateur, car des fragments de béton peuvent être générés.

### 1.3.4.6 Corrosion généralisée :

La corrosion uniforme ou généralisée se produit en tout point du métal avec la même vitesse, ce qui conduit à une diminution régulière de l'épaisseur ou seulement à un changement de couleur (perte de brillance).

### 1.3.4.7 Corrosion locale par piqûres :

Dans certaines conditions environnementales, les métaux et alliages protégés par le film de passivation peuvent développer une corrosion par piqûres en cas de rupture du film local. Ces marques de morsure sont localisées à certains endroits sur la surface métallique et se développent et s'étalent de manière cachée : Au fond de la cavité qui se crée, l'hydrolyse des ions métalliques dissous augmente la teneur en acide et entretient ainsi la corrosion.

Corrosion inter granulaire :

Il s'agit d'une attaque sélective des joints de grains, qui se produit par hétérogénéité locale : par exemple, par la consommation d'un composant ou, au contraire, par l'accumulation de précipités lors du traitement thermique. Un amas partiel qui dissout la zone anodique.

Corrosion caverneuse :

Appelée aussi corrosion caverneuse, elle est basée sur la disponibilité différente de l'oxygène entre les deux zones de la structure métallique. Ensuite, il attaque les pièces métalliques difficiles d'accès pour l'oxygène.

Corrosion galvanique :

C'est la corrosion préférée de la phase la moins inerte de l'alliage, qui contient deux phases, ou la corrosion qui peut se produire entre au moins deux matériaux métalliques dans le même environnement. En matière de couplage, plus il y a de métal à l'échelle galvanique, plus la batterie formée a d'énergie à convertir. Le phénomène de corrosion s'intensifie à la fois

dans la cinétique de dégradation et dans la génération d'ions dans le milieu biologique. Inerte est l'anode et la partie la plus élevée est la cathode. Le rapport surface anode/cathode joue un rôle très important, il faut noter que plus l'anode est petite, plus la vitesse de dissolution est élevée, ce fait est très important en pratique dentaire, notamment lors du choix des alliages pour les structures.

Corrosion et dissolution sélective :

C'est l'oxydation des composants de l'alliage qui conduit à la formation d'une structuremétallique poreuse.[13]

### 1.3.4.8 La sécurité vis-à-vis des usagers :

Les débris de béton peuvent présenter un risque pour les personnes s'approchant ou manipulant la structure. Par conséquent, leur prévention et leur élimination doivent être traitées très soigneusement.

### 1.3.4.9 La stabilité de l'ouvrage :

L'essai sur éprouvette permet d'estimer la valeur d'adhérence de l'élément en béton avec armature corrodée. Il semble que la qualité du béton et le rapport revêtement/diamètre des barres d'armature n'affecteront pas la force d'adhérence résiduelle, même si le revêtement est cassé en raison de la corrosion de la barre d'armature et ne sera pas détruit.

Concernant les moments fléchissant et les efforts tranchants, les recherches expérimentales portent sur l'influence de la corrosion sur ces grandeurs mécaniques. Les résultats montrent que, pour prédire de manière conservatrice la résistance des éléments en béton armé, il suffit d'appliquer le modèle de calcul classique, en tenant compte de la section réduite de l'acier etde la section réduite du béton. Par conséquent, tant que la réduction de la section transversale du renfort est maintenue faible et que le revêtement reste cohésif, La corrosion des barres d'acier ne modifiera pas de manière significative la résistance au moment de flexion ou à la force de cisaillement.

Cependant, lorsque la corrosion atteint un stade avancé, des calculs plus précis doivent être effectués pour évaluer la résistance résiduelle de la structure. Ce document ne traite que des matériaux et ignore les problèmes structurels. [14]

## 1.4 Conclusion :

Lors de la phase « projet », lors des opérations de construction, ou lors de l'utilisation, l'interaction néfaste entre le bâtiment et son environnement est souvent sous-estimée.

Une étude menée par la « British Cement Association » montre clairement que plus de 50 % de la dégradation est due à la faible couverture en acier et au manque de prise en compte des facteurs environnementaux.

La mauvaise qualité du béton, les défauts de conception et la main-d'œuvre non qualifiée seraient responsables d'environ 25 % des défauts observés.

La Corrosion des barres d'armatures, qu'elle soit liée à la carbonisation ou à la diffusion des ions chlorure, qui sont le résultat des « défauts » qui viennent d'être déjà été évoqués, représente en Belgique, entre 85 à 95 % de cause de dégradation.

Il est particulièrement inquiétant de constater que plus de 50 % des réparations ont échoué après seulement 5 ans et que le processus de dégradation a recommencé.

# CHAPITRE 2 : CARACTERISATION ET DIAGNOSTIC DES STRUCTURES EN BETON ARME

## 2.1 Introduction :

Le béton est un matériau employé depuis des millénaires, mais ce n'est qu'au XIX siècle qu'il connait un grand essor notamment grâce au ciment de Portland et à Louis Vicat. Il aura fallu attendre la fin de ce siècle pour voir apparaitre 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.

C’est dans cette optique que s'inscrit le diagnostic d'un ouvrage. A partir du moment oùune pathologie est apparue, même si cela ne remet pas en cause la stabilité de l'ouvrage, il est important de diagnostiquer d'une part d'où vient le problème, mais à quel degré il affecte l'édifice.

Dans un second temps, il est nécessaire de supprimer le problème à la source et de réparer l'ouvrage. Le diagnostic est un moment clé lorsqu'il 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.

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.

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, pérennisé 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 continuelle 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.

### 2.1.1 Les étapes clés de processus de réparation et de protection selon la Norme EN1504

La solennité et abri des structures en récipient qui ont été endommagées ou détériorées requièrent front peuple une amicale par un avive approprié. Ensuite, intervient le spicilège des obligations et des méthodes de solennité et les exigences d'incessant légitimement à la Norme Européenne EN 1504-9. Cette battage a entre imperceptible de présenter divers conseils sur l'avènement et les procédures des fonctions de solennité et de abri du récipient, en inclusif l'habitude des produits et des systèmes Sika

Évaluation de l'état de la structure : L'évaluation des structures en béton endommagées ou dégradées ne doit être effectuée que par du personnel qualifié et expérimenté. Cette évaluation doit toujours inclure les aspects suivants :

L'état de la structure comprenant les défauts visibles, non visibles et potentiel

L'étude de l'exposition passées, actuelle et futur

Identification des causes de détérioration : Apres examen de la conception des méthodes et du programme de construction et étude des dégradations, il est possible d'identifier les "causes réelles" de chaque type et zone de dégradations.

Identifier les défauts et les dégradations mécaniques, chimiques ou physiques du béton.

Identifier les dégradations du béton dues à la corrosion des armatures

Choix des options pour la réparation et la protection : Pour la plupart des structures endommagées ou détériorées, le maître d'ouvrage dispos de différentes options qui décideront efficacement de la stratégie de réparation et de protection pour répondre aux exigences futures de la structure. Ces options comprennent :

Ne rien faire (pendant un certain temps).

Déclasser la capacité de la structure ou sa fonction

Prévenir ou réduire les causes de détérioration sans réparation ni amélioration.

Améliorer, renforcer ou remettre en état tout ou partie de la structure.

Reconstruire tout ou partie de la structure.

Démolir.

Facteurs importants à prendre en compte lors de l'étude de ces options :

Durée de vie attendue suite aux réparations et à la protection.

Durabilité, performance et exigences requises.

Répartition des charges avant, pendant et après les travaux de réparation.

Possibilité d'effectuer les réparations à l'avenir, y compris l'accès et la maintenance.

Coûts des options alternatives et des solutions possibles.

Conséquences et éventualité d'une défaillance structurale.

Conséquences et éventualité d'une défaillance partielle (chute de béton, infiltration d'eau, etc.).

Et d'un point de vue environnemental :

Besoin de protection contre le soleil, la pluie, le gel, le vent, le sel et / ou les autres polluants pendant les travaux.

Impact environnemental ou les restrictions sur les travaux en cours, plus particulièrement le bruit, la poussière, et le temps nécessaire pour réaliser les travaux.

Impact environnemental et esthétique sur la modification de l'aspect en fonction de la solution de réparation choisie

Choix des principes de de réparation et de protection appropriés : Afin de répondre aux exigences du maître d'ouvrage, les principes de réparation et de protection doivent être sélectionnés, avec la meilleure méthode de mise en œuvre.

Ces derniers doivent être :

Appropriés aux conditions et aux exigences du site, par exemple : Principe 3 "Restauration du béton".

Appropriés aux exigences futures et aux principes pertinents, par exemple : Méthode 3.1 "Application manuelle de mortier de réparation" ou 3.2 "Nouveau béton ou mortier coffré".

Définition et spécifications des produits et des systèmes Après avoir sélectionné les principes et les méthodes de réparation et de protection, les performances requises sont définies pour les produits, conformément aux parties 2 à 7 de la norme et à la partie 10 "Application sur site des produits et des systèmes, et contrôle de la qualité."

Il est important que tout ce travail d'évaluation et de spécification prenne en compte non seulement la performance à long terme du produit sur la structure, mais également que les matériaux de réparation proposés n'aient pas de réaction physique ou chimique entre eux ou avec la structure.

Le travail doit être réalisé avec les produits et les systèmes qui sont conformes à la partie pertinente de la norme EN 1504, par exemple : Tableau 3 de la norme EN 1504-3, point 7 : Compatibilité thermique, partie 1 Gel/dégel, etc.

Les conditions d'application et les limites pour chaque type de matériau devront également être spécifiées conformément à la partie 10 de la norme. Dans certains cas, des technologies ou des systèmes innovants qui ne sont pas prévus par la norme EN 1504 peuvent être nécessaires pour résoudre des problèmes spécifiques, pour tenir compte des restrictions environnementales ou pour être conforme aux réglementations incendie locales par exemple

Spécification des exigences de maintenance : Tout travail d'inspection et de maintenance qui sera réalisé pendant la durée de vie définie de la structure doit également être prévu.

Des registres complets de tous les matériaux utilisés au cours des travaux doivent être

fournis à titre de référence future à la fin de chaque projet

Quelle est la durée de vie prévue et quel est le type de dégradations des matériaux sélectionnés, (ex. farinage, décollement, effritement, décoloration ou décohésion) ?

Quelle est la fréquence d'inspection des structures ?

Quels systèmes de réparation de surface seront nécessaires dans le futur, quel accès pour réaliser les travaux et quand ?

Est-il nécessaire de surveiller la corrosion ? Qui est responsable de la mise en œuvre et du financement des travaux de maintenance et quand ? [15]

### 2.1.2 Gestion des ouvrages existant

#### 2.1.2.1 Évaluation technique des ouvrages d'art

Ce chapitre décrit la méthode d'évaluation technique, à la charge d'un agent qualifié.

Pour faciliter son contrôle, le monde est talé potentiellement en éléments et parties. Après monnaie bordereau les désordres et les défauts rencontrés, le visiteur les classe pendant lequel un procès-verbal. Les ouvrages sont placés fors pendant lequel une immatriculation verte, fors pendant lequel une immatriculation rouge. In fine, à chaque monde est attribué un indice d'état apparent qui permet de déterminer s'il y a nécessité d'une entremise à concis ou échappatoire terme.

#### 2.1.2.2 Indices de priorité

Lors de l'élaboration de plans d'action pour la conservation du patrimoine artistique, deux types de priorités doivent être pris en compte : les priorités techniques et les priorités socio- économiques.

Ce chapitre présente des indicateurs techniques prioritaires (dont la définition est expliquée en détail au chapitre III), qui permet d'ordonner les interventions selon leurs propres critères techniques, tandis que la socio économie peut déplacer l'urgence relative des différentes interventions vers des politiques, économiques et dimension sociale. ...

### 2.1.3 Domaine public

Ensemble des biens appartenant à une personne publique qui sont soit affectés à l'usage direct du public, soit affectés à un service public pourvu qu'en ce cas ils fassent l'objet d'UN aménagement indispensable à l'exécution démissions de ce service public. En font également partie les accessoires indissociables [16]

### 2.1.4 Domaine privé

– Ensemble des biens appartenant à une personne publique qui ne relèvent pas de son domaine public ou qui, bien qu'affectés à l'usage du public et appartenant à une personne publique, relèvent de ce domaine privé par détermination de la loi
(Exemple : chemins ruraux) [17]

## 2.2 Les principales étapes d'un diagnostic

La réalisation d'un diagnostic passe par quatre phases principales :
La problématique ;
Le recueil de données pour décrire la situation ;
L'analyse dynamique ;
La mise en perspective. [18]

### 2.2.1 Réalisation d'un diagnostic

Réaliser un diagnostic permet de mettre en évidence les problèmes que rencontre une entreprise et d'identifier ses axes d'améliorations pour gagner en compétitivité.

La première phase consiste à mener une analyse interne (méthode de management des organisations, efficacité des salariés, agencement des espaces de travail…) pour perfectionner et optimiser le fonctionnement à l'intérieur de l'entreprise.

La seconde phase est une analyse externe (clientèle ciblée, fournisseurs, forces concurrentielles présentes…) qui doit permettre de mener une stratégie d'entreprise cohérente et en accord avec son environnement La Figure 1 ci-dessous résume le processus d'un diagnostic :

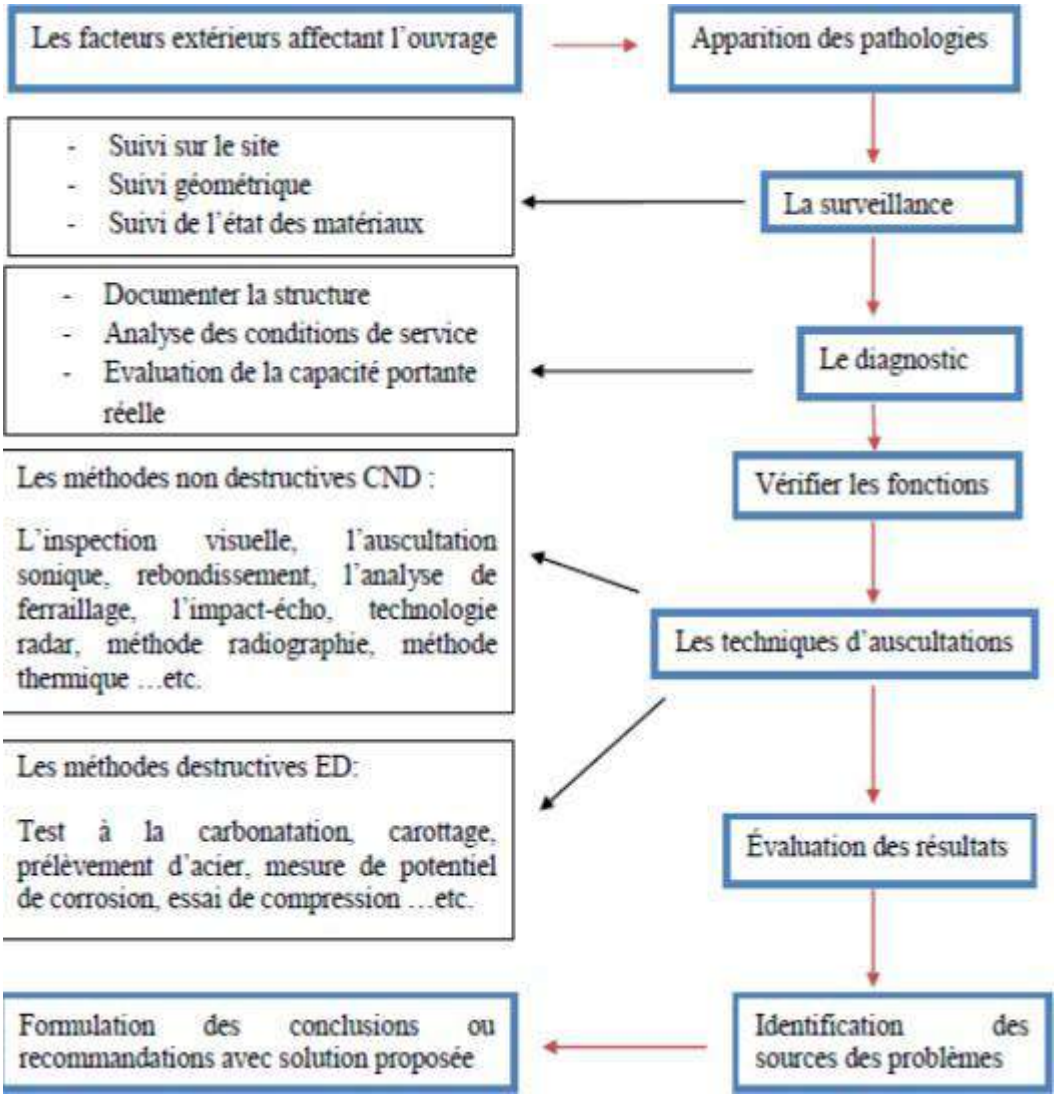



**Figure 2.1** : Schéma des étapes de diagnostic d'un ouvrage en béton armé. **[18]**

### 2.2.2 Choix des investigations

On distingue trois grands types de démarches : La démarche expérimentale associée à la méthode expérimentale. La démarche clinique associée à la méthode clinique. La démarche d'enquête psychosociologique associée à la méthode d'enquête La Figure 2 ci-dessous résume le choix des investigations

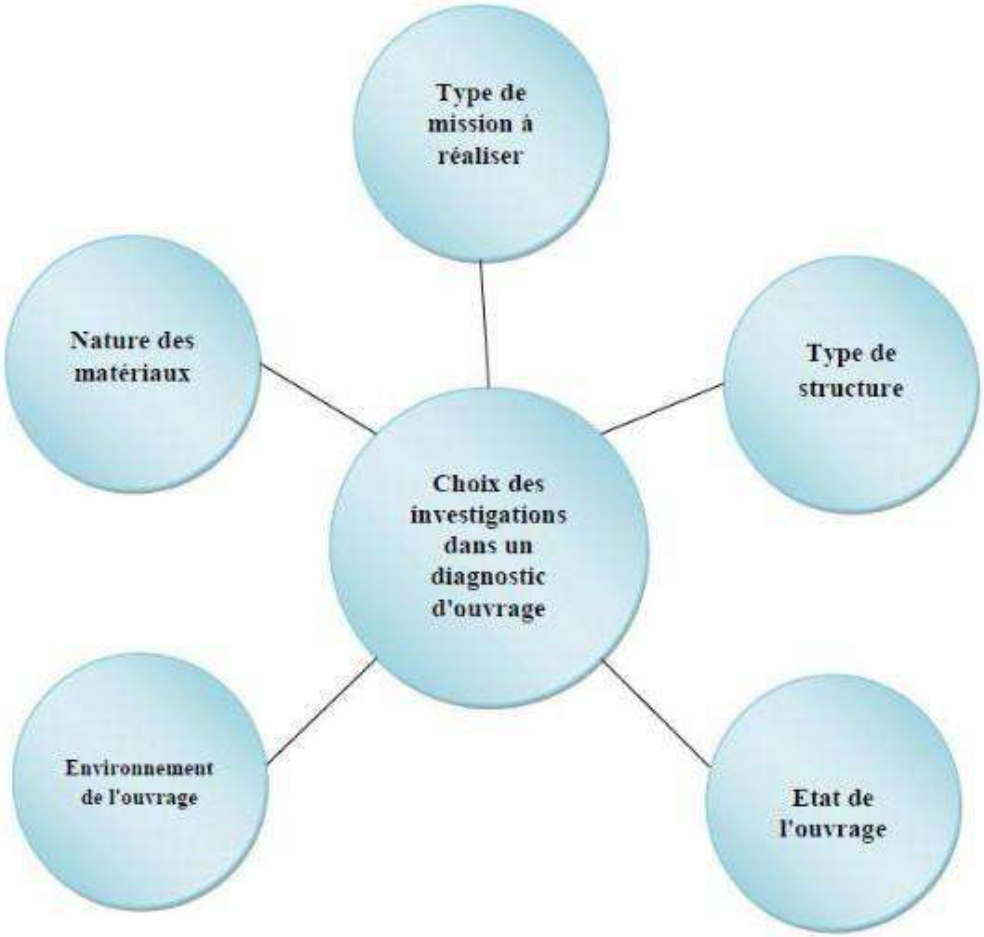



**Figure 2.2** : Schéma du choix d'investigation [19]

Il y a plusieurs manières de mener une investigation en sciences : l'observation

L'expérimentation

La recherche documentaire

La modélisation

La réalisation matérielle d'un objet. Dans les modules proposés, nous utiliserons surtout l'observation et l'expérimentation. [19]

### 2.2.3.1 Investigations non destructives

Le principe de ces méthodes de diagnostic réside dans le fait que l'on analyse l'ouvrage ouune partie de l'ouvrage sans porter atteinte à son intégrité.

Ceci est à privilégier dans différents cas, par exemple les bâtiments classés monuments historiques, pour lesquels il est difficile de faire accepter aux architectes des

bâtiments

D'Algérie qu'il soit utile d'effectuer des prélèvements de la structure pour pouvoir la caractériser.

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. Pour les ouvrages en béton armé, il existe différentes méthodes non destructives La Figure 3 ci-dessous résume les investigations non-destructives [19]

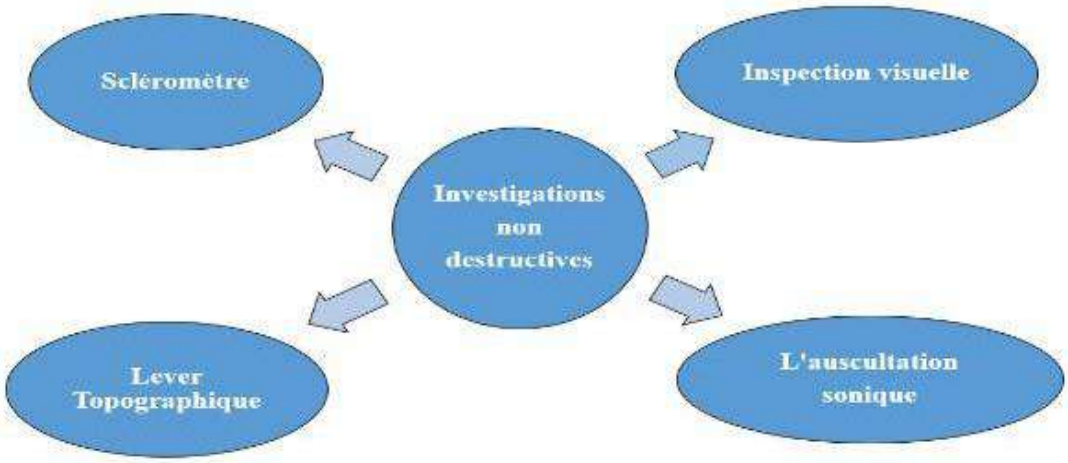



**Figure 2.3** : Schéma des investigations non destructives **[19]**

### 2.2.3.2 Relevé visuel

Le principe du diagnostic visuel est d'aller sur le site pour voir et détecter tous les signes dedétérioration et d'identifier toutes les sources potentielles de désordres tels que : 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 ainsi que les zones de mousses ou de végétation. Les zones de faïençage. Les éclats de béton en formation ou profonds ainsi que la présence d'aciers apparents. Les zones de ségrégation. Tous ces éléments doivent être répertoriés sur des plans.

### 2.2.3.3 L'analyse de ferraillage

Le détail du ferraillage peut se façonner à l'encouragement d'un pachomètre de perfection Ferroscan. Il permet d'absorber la positon scrupuleuse des montants d'armatures, de dodeliner l'enrobement et de favoriser une soupçon du laize de la constitution.

L'effluve d'activité repose sur l'décret d'une perte aimantée par l'bombardier.

Le pachomètre détecte la circulation de ce lopin aimanté aussi que les modifications du retentissement aimanté induite par l'idée d'aciers. Ainsi, l'bombardier longueur la contrepèterie magnétoélectrique due à l'idée d'éléments ferromagnétiques, les armatures.

La spécification de la laize et de l'enrobement repose sur l'histoire que principalement une constitution a une laize importante, principalement l'excitation bulletin par le bombardier sera importante. A contrario, principalement la hauteur d'enrobement sera importante, principalement l'excitation sera faible. Ainsi, la dimension de collision envers ce bombardier est limitée (fréquemment de l'accumulation de 10 à 15 centimètres conformément la perfection de bétons et la perfection d'armatures).

La détection des bords est tellement intéressante pour les pièces longues que nous voulions une vue globale de l'armure. En fait, les trouvailles peuvent mesurer jusqu'à quarante mètres de long. Ce type de mesure permet d'obtenir les différences de distance entre le renfort ainsi que les revêtements correspondants. La deuxième méthode consiste à localiser l'acier dans des carrés de deux pieds carrés par incréments de six pouces, d'abord dans le sens horizontal, puis dans le sens longitudinal.

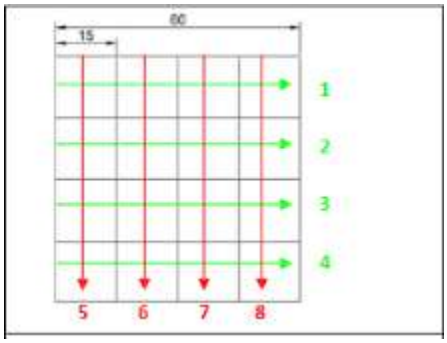



**Figure 2.4** : Principe de la détection par fenêtre **[19]**

### 2.2.3.4 L'auscultation sonique

Ces mesures visent à caractériser l'état d'altération et l'homogénéité physique du béton composant les structures d'un ouvrage. 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. La méthode consiste à mesurer la vitesse de propagation d'ultrasons

traversant le matériau à l'aide d'un générateur d'ondes et d'un récepteur. Globalement, plus la vitesse de propagation est élevée et les incertitudes faibles, plus le matériau est de bonne qualité, à savoir homogène **[20]**

### 2.2.3.5. Scléromètre :

L'essai au scléromètre est destiné à mesurer la dureté superficielle du béton pour évaluer l'homogénéité surfacique de sa qualité sur un ouvrage. Il consiste à projeter une masse donnée contre un parement par l'intermédiaire d'un ressort. La réaction résultant du choc donne l'indice sclérométrique qui est corrélé en fonction de l'inclinaison de la surface, La Figure 5 explique le principe du scléromètre. Cet essai est peu couteux, simple et rapide mais ne peut être utilisé que de manière qualitative sur des bétons anciens, de nombreux paramètresinfluençant le résultat (carbonatation par exemple) **[21]**

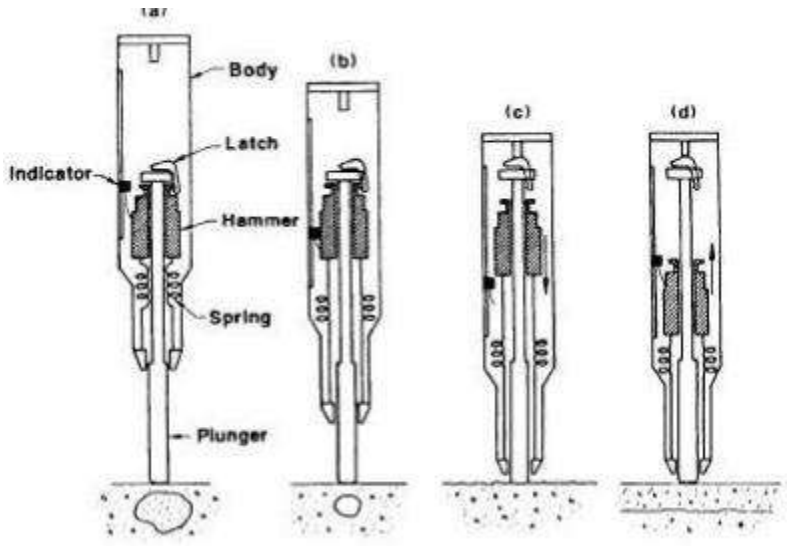



**Figure 2.5** Représentation schématique d'un scléromètre **[21]**

### 2.2.4.1 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 connaitre la nature des matériaux présents leurs caractéristiques mécaniques et chimiques. L'évaluation en laboratoire commence généralement par une description des échantillons (types, dimension, provenance, etc.) Les techniques les plus fréquemment mises en œuvre sont :

La mesure de la profondeur de carbonatation : elle est mesurée à l'aide d'un indicateur

de pH phénolphtaléine ou alizarine qui virent respectivement de l'incolore au rouge et du rouge au pourpre. L'analyse microscopique : elle permet l'identification des composants et de leurs proportions initiales, une estimation du rapport E/C, la mise en évidence de réactions secondaires (carbonatation, sulfates, alcali-granulats) et de rendre compte de certaines agressions chimiques.

Des essais mécaniques : des facteurs tels que la porosité de surface ou à cœur et l'absorption d'eau sont des renseignements utiles pour cerner les mécanismes mis en jeux dans la détérioration des bétons

Des essais chimiques : le dosage des chlorures permet souvent d'expliquer la dégradation des armatures pour des ouvrages soumis aux sels de déverglace ou dans un environnement marin **[22]**

### 2.2.4.2 Carottage d'éléments en béton armé

L'utilisation d'un noyau en béton armé peut servir à plusieurs fins. Dans les chaussées routières, permettre d'abord des essais géotechniques au sol en place, tels qu'un pénétromètre ou une perceuse, pour caractériser le sol sous la structure dans le cadre d'un processus d'amélioration pour créer ou reconstruire la texture La Figure 6 ci-dessous résume



**Figure 2.6** Pénétromètre [23]

Afin de pouvoir déterminer les propriétés chimiques et mécaniques d'un élément en béton du bâtiment en réalisant des essais de pression sur les échantillons prélevés, mais aussi des analyses chimiques et microscopiques pour déterminer les différents composants et leurs quantités. Le ciment et le rapport E/C ont été utilisés Déterminer les propriétés des couches

Constitutives de l'élément (épaisseur de l'enduit, support, béton, etc.) La norme NF EN 13791 de septembre 2007 donne deux méthodes pour l'évaluation de la compression résistance sur site des pièces et éléments préfabriqués en béton.

La méthode à utiliser varie en fonction du nombre d'éléments de carottage de l'ouvrage considéré, mais elle permet dans tous les cas d'estimer la classe de résistance du béton. Cette méthode nécessite l'utilisation d'un carottier et elle peut être nécessaire de déterminer le renforcement de l'élément à l'avance, afin d'éviter que les aciers contenus dans l'âme jouent un rôle important, par contre les résistances à la compression obtenues se déforment dans une âme dans laquelle se trouve l'acier. Pour les mêmes raisons il faut éviter de percer un élément dans une fissure. [23]

### 2.2.4.3 Prélèvements d'acier :

Le prélèvement d'acier peut s'avérer utile notamment lorsqu'un recalculé d'une structure est demandé. Dans ce cas, il est important de connaitre les aciers présents dans un ouvrage. Ainsi, en prélevant des aciers, cela permet de déterminer leur type, que ce soit des aciers Haute Adhérence, lisse, TOR, etc. mais aussi leurs caractéristiques mécaniques telle que la limite d'élasticité de l'armature.

Tous ces éléments sont nécessaires afin de pouvoir déterminer quelles sont les charges pouvant s'appliquer sur l'élément et s'il est nécessaire de prévoir de renforcer la structure soit avec des tissus de fibre de carbone ou par ajout d'armatures afin de pouvoir répondre aux besoins du client ou des utilisateurs. Le prélèvement d'aciers peut se faire par tronçonnage de l'armature, après l'avoir préalablement dégagé du béton adjacent. Il est préférable de le faire dans des zones saines pour ne pas risquer de fragiliser encore plus la structure à cet endroit.

Il peut parfois s'avérer utile de prélever localement des armatures dans des zones touchées par des pathologies, telle que la corrosion des armatures afin de pouvoir déterminer son avancement ainsi que la section restante d'acier pouvant être exploité afin de déterminer les quantités d'armatures nécessaires à rajouter pour redonner à l'élément au minimum sa section d'acier initiale.

### 2.2.4.4 Potentiel de corrosion :

La mesure du potentiel de corrosion ne peut se faire que si le ferraillage est continu et

s'il n'y a pas de revêtement de surface pouvant agir comme isolant. Si le ferraillage est discontinu, il est toujours possible de mettre en place des pontages électriques. Le principe de la mesuredu 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 interstitielle du béton l'électrolyte contenu dans l'électrode de référence et la solution.

Une fois les branchements faits, il faut réaliser les mesures des potentiels des zones auscultées en déplaçant l'électrode de référence. 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%)

Cependant, il est important de noter le fait que différents paramètres peuvent influer surles résultats obtenus, tels que :

- L'hygrométrie de surface, il peut y avoir une diminution de 100 mV entre une mesure sursurface humide et une mesure quand c'est sec
- Pour des milieux agressifs comme la présence de chlorures, la conductivité est augmentée etles potentiels sont plus négatifs
- Lorsque le béton est carbonaté, les potentiels sont plus positifs.
- En effectuant ainsi des mesures en de nombreux points d'un élément, il est possible d'effectuer une cartographie complète de la probabilité de corrosion.

### 2.2.4.5 Test à la carbonatation :

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

La phénolphtaléine est un composé organique de formule C20H14O4. 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 déprotonée (milieu basique).

La couleur que prend la phénolphtaléine dépend du pH. Elle sera rose pour un pH compris entre 8 et 12 et incolore au-delà et au-deçà de cette zone de virage. Cet essai se réalise généralement sur une coupe fraiche de béton. Il faut y pulvériser la solution de phénolphtaléine, si la phénolphtaléine 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 phénolphtaléine 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 afinde 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 Ferroscan.

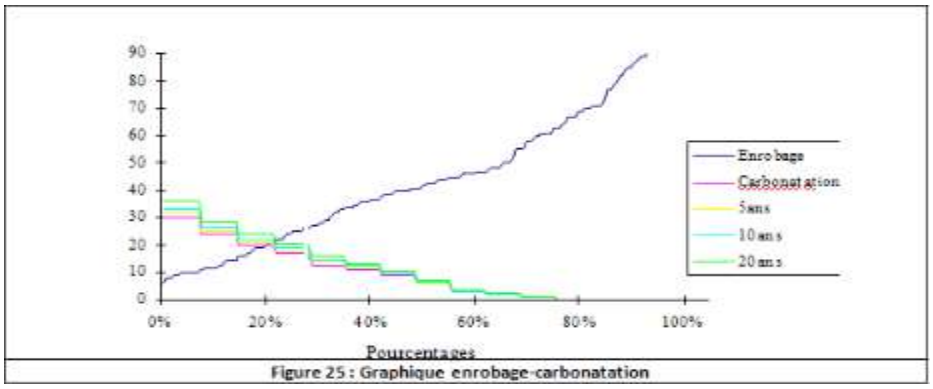



**Figure 2.7** : Graphique enrobage-carbonatation [24]

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 avt, 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 ».

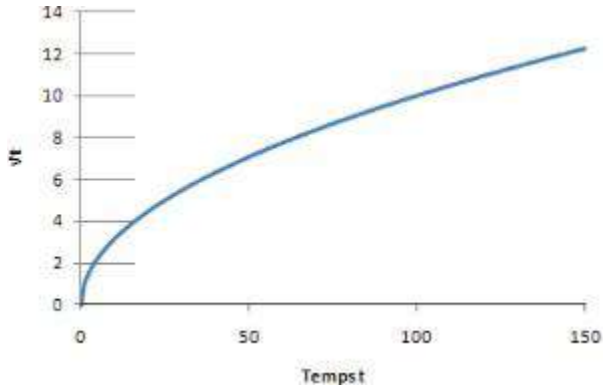



**Figure 2.8** : Courbe du facteur a par rapport le temps **[24]**

## 2.3 Conclusion :

Dans cette section, nous avons vu l'importance du diagnostic dans la reconstruction d'une structure, ainsi que les différents moyens disponibles pour la réaliser, ce qui est une étape importante vers l'identification des différents types de structures et de corrosion dont souffre la structure. Il permet également de prédire l'évolution de ces troubles et d'évaluer les causes deces problèmes. Le but ultime du diagnostic est de donner une conclusion complète sur les principes qui guident les chercheurs et les bureaux d'études dans le choix des méthodes de protection et de réparation des ouvrages en béton pour obtenir un résultat satisfaisant.

# CHAPITRE 3 : Réparation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion

## 3.1 Introduction

La réparation d'un ouvrage est la deuxième étape dans le processus de réhabilitation d'ouvrages en béton armé. C'est l'étape nécessaire pour redonner d'une part les sections d'origine de l'acier et du béton, mais aussi pour rétablir les caractéristiques mécaniques des différents éléments concernés. C'est-à-dire de redonner la possibilité à la structure de reprendre au mieux les efforts qui lui sont appliqués.

## 3.2 Réparation d'un ouvrage en béton armé

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)
Ces différentes méthodes seront par la suite décrites.

### 3.3.1 Le ragréage

La méthode de ragréage est généralement utilisée lorsque la technique traditionnelle de réparation des bétons est relativement faible.

Ceci s'explique par le fait que ce type de réparation n'a besoin que de très peu de matériel,mais est assez longue et nécessite beaucoup de main-d'œuvre.

Lorsque les surfaces à importantes, on privilégiera plutôt le béton projeté, plus rapide, mais nécessitant une part matérielle. On privilégiera plutôt le béton projeté, plus rapide, mais nécessitant une part plus importante de matériel.

La préparation de surface est une étape très importante pour la pérennité des réparations, elle doit être effectuée avec soins. Il s'agit dans un premier temps d'éliminer toutes les zones présentant une faible cohésion sur l'élément à reprendre.

C'est-à-dire qu'il faut vérifier chaque zone, afin de voir s'il n'y a pas de décollement du béton, de la fissuration apparente, des épaufrures, etc. Les zones de ségrégation doivent elles aussi être éliminées. S'il y a présence d'un phénomène de corrosion des armatures, il est nécessaire de dégager les aciers corrodés jusqu'à ce qu'une zone saine apparaisse. Pour être sûr de pouvoir effectuer une bonne réparation, il est d'usage d'obtenir un dégagement comme le montre le schéma suivant :

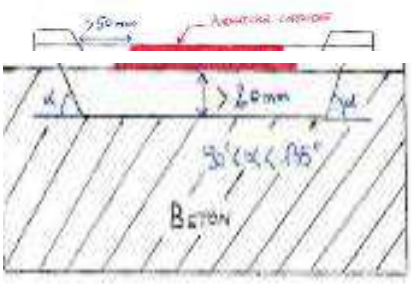



**Figure 3.1** : Dégagement des armatures **[24]**

Une fois les armatures corrodées dégagées, il faut les nettoyer afin d'enlever toute trace de corrosion. Dans certains cas, la perte de section de l'acier peut s'avérer être très élevée, il estalors nécessaire de remplacer l'armature, soit par découpage de la zone atteinte et soudage d'une armature équivalente, soit en scellant une nouvelle armature dans le parement.

Il est important qu'après cette opération, la section d'armatures soit au moins égale à celle présente initialement dans l'élément de la structure concernée.

Afin de limiter les risques d'apparition de la corrosion, les armatures doivent être passivées par application d'un produit convenablement choisi. Cette application peut se méthodes (par brossage, par application au pinceau, etc.)

Une fois les étapes précédentes réalisées, il est possible de commencer le ragréage. Il s'agit de reconstituer manuellement l'enrobage de béton à l'aide d'un mortier de réparation convenablement choisi par une entreprise possédant les compétences nécessaires. Il peut être intéressant de choisir de mettre des inhibiteurs de corrosion directement dans la formulation de ce mortier afin de limiter au maximum l'apparition de corrosion dans les zones réparées.

Dans tous les cas le mortier utilisé doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Tenue verticale sans coffrage
- Montée en résistance rapide et de résistance mécanique supérieure au béton support

- D'adhérence supérieure ou égale à la cohésion du support
- D'imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs

De coefficient de dilatation thermique et de module d'élasticité équivalente au béton support, de bonne protection des aciers.

Les produits doivent être conformes à la norme NF P 18-840 ou être admis à la marque «NFProduits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique».

### 3.3.2 Le béton projeté

La réparation à l'aide de béton projeté consiste à piquer les zones dégradées et à projeter sur l'ensemble de l'ouvrage du béton figure 10.

Il existe deux méthodes d'application du béton projeté : soit par voie humide, soit par voie sèche. La seule différence entre ces deux méthodes réside dans le moment où l'on ajoute l'eau. Pour le béton projeté par voie sèche, l'eau est ajoutée au dernier moment au niveau de la lance alors que par voie humide, l'eau est introduite lors du malaxage du béton**[24].**



**Figure 3.2** : Renforcement au moyen de béton projeté **[24]**

Faut distinguer deux techniques de projection, suivant le moment d'introduction de l'eau dans la chaîne : par voie sèche avec ou sans pré-mouillage : l'eau est introduite au niveau de la lance. Par voie mouillée : l'eau est introduite au malaxage du béton.

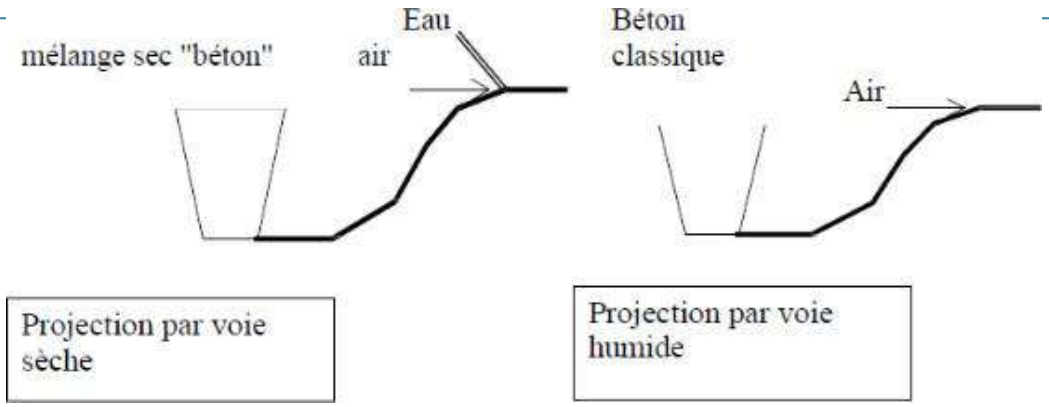



**Figure 3.3** : Techniques de projection, **[24]**

### 3.3.2.1 Projection par voie sèche et par voie humide

Il existe principalement deux techniques de projection du béton. Elles se différencient par rapport à l'emplacement de l'introduction de l'eau de gâchage dans le matériau.

Il y a tout d'abord la méthode de projection par voie humide, le béton gâché est transporté jusqu'à la lance soit par pompage soit par de l'air comprimé.

Il y a ensuite la méthode de projection par voie sèche pour laquelle le mélange de ciment et de granulats, non additionné d'eau au moment du malaxage, est propulsé par de l'air comprimé, l'eau étant ajoutée au dernier moment, en bout de lance.

Le choix de la technique à utiliser dépend de différents paramètres tels que la nature des matériaux utilisés, de la nature des travaux à effectuer ou encore des habitudes de l'entreprise.

Le principe de la projection reste le même selon la méthode employée. Il consiste à :

Malaxer, homogénéiser les matériaux à l'état sec ou humide

Les transporter par canalisation, rigides ou souples, grâce à des pompes mécaniques ou à del'air comprimé

À projeter plus ou moins violemment, grâce à de l'air comprimé ; le matériau sur lessupports à revêtir.

Cependant, selon la méthode utilisée les résultats vont présenter quelques différences. Par voie sèche, on obtiendra une résistance plus élevée que par voie humide du fait du faible rapport E/C. Mais on aura une capacité de production plus limitée, un dégagement de poussière plus important, mais surtout un risque de détérioration d'un support fragile.

Dans tous les cas, cette surépaisseur de béton est moins poreuse, plus durable et peu sensible aux attaques chimiques.

Le béton projeté n'étant pas encore carbonaté, il stoppe l'évolution de la carbonatation, le temps d'être lui-même complètement carbonaté. Il empêche également la pénétration d'humidité grâce à sa faible porosité, ce qui protège les armatures de la corrosion. De plus, il est possible d'ajouter des inhibiteurs de corrosion dans la formulation du béton, ce qui permet de rendre plus pérennes les réparations effectuées.

### 3.3.2.2 Mode Opératoire :

Tout comme pour la méthode de réparation par ragréage, il est nécessaire d'effectuer une préparation de la surface avec soins. Il s'agit dans un premier temps d'éliminer toutes leszones présentant une faible cohésion sur l'élément à reprendre. C'est-à-dire qu'il faut vérifier chaque zone afin de voir s'il n'y a pas de décollement du béton, de la fissuration du béton, des épaufrures, etc. Les zones de ségrégation sont aussi à éliminer.

S'il y a présence de phénomène de corrosion des armatures, il est nécessaire de dégager les aciers corrodés jusqu'à ce qu'une zone saine apparaisse. Pour être sûr de pouvoir effectuer une bonne réparation, il est d'usage d'obtenir comme dans le cas du ragréage l'espacement suivant:

Une fois les armatures corrodées dégagées, il s'agit de les nettoyer afin d'enlever toute la corrosion. Dans certains cas, la perte de section de l'acier étant très élevée, il est nécessaire de remplacer l'armature, soit par découpage de la zone atteinte et soudage d'une armature équivalente, soit en scellant une nouvelle armature dans le parement. Il est important qu'après cette opération, la section d'armatures soit au moins égale à celle présente initialement dans l'élément de la structure concernée

Dans le cadre de béton projeté par voie humide, il est possible d'appliquer un passivant sur les armatures réparées afin de limiter les risques d'apparition de la corrosion.

Cette application peut se faire par différentes méthodes (par brossage, par application au pinceau, etc.). Ceci n'est pas possible lorsque l'on projette le béton par voie sèche, car arrivant plus rapidement sur l'élément concerné, la protection serait abimée et ne remplirait plus ses fonctions.

### 3.3.2.3 Matériaux utilisé :

Dans le cadre de la réparation d'ouvrages en béton armé, le béton ou le mortier utilisé doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Tenue verticale sans coffrage
- Montée en résistance rapide et de résistance mécanique supérieure au béton support
- D'adhérence supérieure ou égale à la cohésion du support
- D'imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs
- De coefficient de dilatation thermique et de module d'élasticité équivalente au béton support
- De bonne protection des aciers

Les produits doivent être conformes à la norme NF P 18-840 ou être admis à la marque « NFProduits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique ».

| Principe | Exemples de méthodes basées sur les principes |
|---|---|
| **Principes et méthodes relatifs aux défauts dans le béton** | |
| **3. Restauration du béton** | 3.1. Application manuelle de mortier |
| | 3.2. Nouveau béton ou mortier coffré |
| | 3.3. Pulvérisation de béton ou mortier |
| | 3.4. Remplacement d'éléments |
| **4. Renforcement structural** | 4.1. Ajout ou remplacement de barres de renforcement incorporées ou externes |
| | 4.2. Ajout d'armature ancrée dans des trous pré-creusés ou sciés |
| | 4.3. Collage d'une plaque de renforcement |
| | 4.4. Ajout de mortier ou de béton |
| | 4.5. Injection dans les fissures, les vides ou les interstices |
| | 4.6. Colmatage des fissures, des vides ou des interstices |
| | 4.7. Précontrainte (précontrainte par post-tension) |
| **5. Augmentation de la résistance physique** | 5.1. Revêtement |
| | 5.2. Imprégnation |
| | 5.3. Ajout de mortier ou de béton |
| **Principes et méthodes relatifs à la corrosion de l'armature** | |
| **7. Préservation ou restauration de la passivité** | 7.1. Augmentation de la couche avec du mortier ou du béton supplémentaire |
| | 7.2. Remplacement du béton pollué ou carbonaté |
| | 7.3. Ré-alcalinisation électrochimique du béton carbonaté |
| | 7.4. Ré-alcalinisation du béton carbonaté par diffusion |
| | 7.5. Extraction électrochimique des chlorures |

**Tableau 3.**1 : Principes et méthodes de réparation applicables aux matériaux de réparation **[24]**

- Il existe 3 familles de techniques :
- La réparation traditionnelle : remplacement du béton carbonaté ou pollué par les chlorureset des armatures corrodées ;
- Les traitements électrochimiques : protection cathodique, protection galvanique, réalcalinisation, déchloruration ;
- La mise en œuvre d'inhibiteurs de corrosion depuis la surface du béton.

**Réparation traditionnelle**

Cette réparation est la plus classique.
Enlever le béton d'enrobage non adhérent dans la zone dégradée et dégager les armatures corrodées à traiter, par un moyen mécanique ou chimique.

Le dégarnissage doit être effectué jusqu'à ce que l'acier sain soit mis à nu sur une longueur d'au moins 50 mm Les armatures doivent être dégagées sur la totalité de leur circonférence.

De nombreuses techniques permettent l'enlèvement du béton dégradé : burinage, repiquage, bouchardage, décapage à l'eau à haute pression, sablage à sec ou humide, ponçage, décapage thermique, décapage chimique.

L'importance de cette préparation est fonction de la profondeur de carbonatation du béton ou des profils de concentration des chlorures.

Éliminer l'intégralité des parties corrodées sur toute la surface des armatures par brossage métallique, repiquage, sablage ou grenaillage, ainsi que toutes poussières résiduelles ou souillures, soit par lavage à l'eau, soit par brossage, aspiration ou soufflage à l'air.

Remplacer les armatures corrodées ou mettre en place des armatures complémentaires par recouvrement, scellement ou soudure : cela va restituer la section d'armature initiale, en tenant compte des longueurs d'ancrage et de recouvrement nécessaires afin de redonner à l'ouvrage sa capacité structurelle. Les armatures peuvent recevoir une protection contre la corrosion par application sur toute leur surface d'un revêtement adapté (inhibiteur anodique, résine synthétique …).

Lorsque la partie d'ouvrage est exposée à un environnement particulièrement agressif ou si l'épaisseur d'enrobage nécessaire ne peut pas être respectée, il peut être mis en place des armatures inox de nuance adaptée.

Reconstituer le béton d'enrobage afin de retrouver la géométrie de la structure : ragréage manuel ou mécanique, béton coulé, béton projeté…

Les armatures sont ainsi protégées par passivation grâce à l'alcalinité du nouveau béton d'enrobage.

NOTA : la zone reconstituée qui bénéficie d'un pH élevé après mise en œuvre du nouveau béton d'enrobage devient une cathode forte au regard des bétons anciens environnants qui deviennent des zones anodiques où il y a risque de corrosion. C'est le phénomène dit d'anode induite.

**Traitements**

**électrochimiques**

**Protection cathodique**

La protection cathodique à courant imposé consiste à diminuer à l'aide d'un courant électrique (2 à 20 mA/m2) le potentiel électrique de corrosion de l'armature jusqu'à une valeur seuil (potentiel de protection) pour laquelle la vitesse de corrosion de l'acier est négligeable. Cette technique permet de restaurer la passivité des armatures, elle est installée de manière définitive et donc protège la structure en permanence.

Les dimensions des anodes et la capacité du générateur de courant sont définies en fonctiondes dimensions des armatures (diamètres, longueurs) et des surfaces à traiter.

Il convient de rétablir, préalablement au traitement, la continuité électrique des armatures etparfois, de protéger la surface du béton après traitement pour éviter de nouveaux désordres.

Un générateur électrique impose un courant qui circule de l'anode (pôle positif : treillis en titane ou en carbone disposé sur toute la surface de la zone à traiter et enrobé par un matériauà base de liants hydrauliques) vers l'armature (pôle négatif : cathode).

**Protection galvanique**

Une anode active dite sacrificielle est placée sur le parement de la surface à traiter (film de zinc, …) ou dans l'enrobage (pastille de zinc). Elle est connectée aux armatures. Il se crée ainsi un courant galvanique sans alimentation électrique. L'électrolyte (eau contenue dans la capillarité du béton et dans les hydrates des pâtes de ciment) assure la bonne conductivité électrique entre l'anode et la cathode.

**Réalcalinisation**

Ce traitement électrochimique du béton consiste à introduire sous l'effet d'un courant électrique des alcalins (Na+ou K+) dans la zone d'enrobage des armatures. Il va permettre de redonner une alcalinité élevée au béton qui a été carbonaté et donc stopper la corrosion des armatures. Le traitement est réalisé avec une densité de courant imposé de 0,5 à 1 A/m2 et dure une à deux semaines.

Il induit une électrolyse autour des armatures qui contribue à la création d'OH- et à laremontée du pH à des valeurs supérieures à 10.

Les étapes du traitement :

Projection d'une première couche de pâte associée à une solution électrolytique adaptée;

Mise en place d'un treillis anodique métallique (acier ou titane) sur des baguettes isolantesfixées au parement ;

Connexion du treillis à l'anode ;

Projection d'une deuxième couche de pâte ;

Raccordements électriques au générateur de courant continu ; Humidification régulière de la pâte par l'électrolyte ou par l'eau ;Suivi des tensions et courants ;

Dépose de l'ensemble de l'installation.

**Déchloruration**

La déchloruration est une technique de traitement électrochimique qui consiste à extraire

les chlorures et produire des ions hydroxydes (OH–) situés dans la zone d'enrobage qui protège les armatures, afin de freiner la propagation de la corrosion.

La totalité des chlorures ne peut pas être extraite, il convient de s'assurer que la teneur résiduelle en chlorure au droit des armatures est inférieure aux valeurs limites admissibles (0,4 % du poids du ciment).

Ces traitements peuvent être réalisés :
À l'aide d'un générateur électrique qui impose un courant continu (tension 40 V) circulant de l'anode vers l'armature. Si nécessaire, la déchloruration et la réalcalinisation sont effectuées l'une après l'autre ou simultanément ;
À l'aide d'une anode active (grille d'acier ou en titane) directement reliée à l'armature. Il y a création d'un courant galvanique.

Dans ce cas la réalcalinisation et la déchloruration peuvent être effectués en même temps.Pour les deux procédés, une couche de pâte imbibée d'une solution électrolyte adaptée est appliquée à la surface de la zone de béton à traiter. Elle doit être humidifiée régulièrement pour permettre la circulation du courant. Ces traitements sont temporaires, leur durée d'application est de quelques semaines.

Il convient préalablement d'assurer une continuité électrique entre les armatures.

Inhibiteurs de corrosion :
Les inhibiteurs de corrosion sont appliqués à la surface des bétons à traiter. Ils vont migrer dans la zone d'enrobage vers les armatures, assurant ainsi leur protection contre la corrosion en abaissant la vitesse de corrosion de l'acier.

L'inhibiteur est appliqué directement sur la surface du béton après préparation du support (enlèvement de la laitance, des salissures, des revêtements éventuels…), par pulvérisation sous forme liquide en plusieurs passes ou par application directe sous forme gélifiée. Il pénètre dans le béton par capillarité.

Cette technique permet de protéger les armatures de la corrosion sans avoir à purger le béton carbonaté et donc en conservant l'aspect initial du parement de l'ouvrage.

La pénétration des inhibiteurs au sein du béton dépend de nombreux paramètres dont la porosité du béton, le degré d'humidité, le niveau de carbonatation, la teneur en chlorures…
La technique fonctionne sous réserve d'une teneur limitée en chlorures dans le béton et fonctionne d'autant mieux pour les armatures faiblement enrobées.

Souvent le traitement doit être complété par la mise en œuvre d'un revêtement de protection.

NOTA : les inhibiteurs de corrosion peuvent aussi être incorporés dans le béton frais lors de la construction d'ouvrage neuf. Ils sont plus efficaces en présence d'un phénomène de carbonatation qu'en présence de chlorures. [25]

## 3.4 Protection des ouvrages en béton :

Après avoir diagnostiqué les différentes pathologies, puis réparer la structure, il peut être utile de prévoir une protection des ouvrages afin de rendre pérennes les réparations afin d'éviter l'apparition rapide de nouvelles pathologies semblables.

Il existe un grand nombre de protections possible.
Elles sont à choisir selon ce contre quoi il est nécessaire de protéger la structure. Leschéma suivant recense les principales méthodes existantes :

Chacune de ces méthodes permet soit de redonner au béton de bonnes caractéristiques mécaniques et chimiques soit de les protéger contre des attaques extérieures.

Dans tous les cas cela permet à la structure concernée de rallonger sa durée de vie ainsique ses capacités à absorber les attaques de l'environnement extérieur et de la vieillesse.

### 3.4.1 Le revêtement imperméabilisant :

Les revêtements de surface, permettant de protéger la structure contre les attaques, sont décomposés en différentes catégories, elles sont décrites dans la suite. Chaque type de revêtement a son propre mode d'application.

Les revêtements imperméabilisants sont généralement des systèmes multi couches

appliqués à titre curatif. Leur fonction principale est de pallier aux désordres affectant la structure en ayant par exemple une fonction d'imperméabilité à l'eau liquide.

Il est nécessaire qu'ils aient une élasticité suffisante afin de pouvoir résister à la fissuration du support.

Le DTU définit le mode opératoire d'application de ces revêtements.

Les produits utilisés doivent être choisis en fonction des pathologies répertoriées lors du diagnostic. Les produits doivent satisfaire à la norme NF 84-403 quant à leurs caractéristiques (maintien de l'aspect, imperméabilité, isolation thermique).

**LES PEINTURES :**

La mise en peinture peut avoir différentes fonctions :

Elle permet d'améliorer l'esthétique de l'ouvrage, par la mise en couleur ou la création de motifs décoratifs, en vue de lui donner un aspect particulier, ou d'homogénéiser, lorsque nécessaire, la teinte de ses parements,……..

Son but peut être d'augmenter le confort et la sécurité des usagers, tout en facilitant le nettoyage (exemple : revêtement des tunnels),

Elle permet aussi de participer à la sécurité de l'ouvrage (exemple : balisage des pylônes).

Mais avant tout chose, elle permet de contribuer à la protection du béton. En effet, la mise en place d'un système de peinture en couche mince, dans la mesure où il apporte une amélioration de l'imperméabilité du support peut permettre de ralentir la pénétration de l'humidité extérieure et d'améliorer ainsi la durabilité du béton.

Il est à noter qu'il existe une procédure de qualification concernant les systèmes de peinture pour béton de génie civil.

Elle donne des notions sur des critères d'adhérence, d'aspect et plus généralement sur des considérations d'ordre esthétique.

Cependant, elle ne se prononce pas sur des critères visant à apprécier la capacité effective à remplir une fonction de protection. L'ensemble de cette procédure est décrit dans le guide [26]

**LES LASURES :**

Les lasures peuvent être utilisées pour conserver ou mettre en valeur la texture du parement en béton. Il existe des lasures incolores, mais aussi colorées. L'avantage par rapport aux peintures [12]

**LES REVÊTEMENTS MINCES :**

Sont inclus dans cette catégorie :

Les revêtements plastiques épais contenant généralement des éléments à base de résinesacryliques ou polyuréthannes

Les revêtements d'imperméabilité à base de résine acrylique

Les revêtements divers à base de polyuréthane [26]

**LES ENDUITS DE FAÇADE :**

On distingue deux catégories dans les enduits de façade :

Les enduits traditionnels, exécutés selon le DTU 26.1 en trois couches distinctes

Les enduits monocouche prêts à l'emploi.

Dans tous les cas ce sont des enduits à base de liants hydrauliques et ou de chaux aérienne.[26]

## 3.4.2 Les inhibiteurs de corrosions

Les inhibiteurs de corrosion sont des éléments chimiques permettant de ralentir, voire de stopper le processus de corrosion des métaux sur lesquels ils sont appliqués. Généralement ils sont ajoutés en faible concentration dans le milieu corrosif.

Il est important de noter que ne sont pas inclus dans cette catégorie de produit les éléments présents dans un alliage de métaux tel que le chrome par exemple.

Il existe différents modes d'action des inhibiteurs de corrosion selon leur catégorie. Chaque type réagira différemment selon le milieu dans lequel il se situe. Par exemple, l'inhibiteur

peutrecouvrir la surface du métal par adsorption et ainsi réduire les surfaces de réaction élémentaires.

Dans un autre cas, il peut former des composés avec le métal et le liquide environnant et modifier ainsi les réactions d'interface. Dans tous les cas la vitesse de corrosion est ainsi ralentie, voire annulée. Cependant pour généraliser, la corrosion étant un processus électrochimique, l'action de l'inhibiteur se fera au niveau des étapes de réaction électrochimique.

Les fonctions principales d'un inhibiteur de corrosion sont les suivantes :

Avoir une action rapide et vérifiable Être efficace durant de nombreuses années

De pénétrer suffisamment les couches de béton même dans le cas de béton très hétérogène par nature

D'abaisser la vitesse de corrosion du métal, sans en affecter ses propriétés mécaniques et chimiques ainsi que celles de son milieu environnant

De prendre en considération le milieu (basique, neutre dans le cas de la carbonatation, voir acide dans le cas de la présence de chlorures) dans lequel il sera afin d'être compatible avec celui-ci ainsi qu'à la température d'utilisation D'être en concentration suffisante pour être efficace De ne pas être toxique Comme il a été souligné plus haut, il existe différentes catégories d'inhibiteurs de corrosion. Il est possible de les classifier selon leur mode d'action, à savoir :

Les inhibiteurs anodiques qui agissent en diminuant le courant sur la partie anodique de la surface du métal. Cependant, il y a un risque uniquement si son action n'est pas totale sur l'élément, cela peut entrainer localement une augmentation de la densité de courant et ainsi conduire à un processus localement plus intense de corrosion qu'en l'absence d'inhibiteurs de corrosion.

Les inhibiteurs cathodiques agissent en augmentant la surtension au niveau de la cathode et ainsi réduisent le courant de corrosion. Les inhibiteurs cathodiques ne stoppent jamais le processus de corrosion, mais ils n'ont pas le désavantage des inhibiteurs cathodiques, à savoir la corrosion localisée.

Les inhibiteurs mixtes cathodiques. Qui ont eu à la fois les propriétés des inhibiteursanodiques et cathodiques.

Concernant la mise en œuvre d'un inhibiteur de corrosion, il est important avant de l'appliquer de préparer la surface du béton, à savoir éliminer la peinture ou autre revêtement.

Une fois la surface prête à recevoir le produit, l'application se fait directement sur la surface du béton à l'aide d'un rouleau ou d'un pulvérisateur.

Il faut veiller à ce que les consommations mises en œuvre soient conformes aux préconisations. Pour les inhibiteurs de corrosion sous forme liquide, l'application se fait en plusieurs passes. Pour les inhibiteurs de corrosion sous forme gélifiée, l'application se fait en une seule fois. Pour les inhibiteurs de corrosion sous forme gélifiée, l'application se fait en une seule fois.

Il faudra par la suite vérifier que les quantités minimales d'inhibiteurs de corrosion au niveau des armatures soient atteintes. Cette vérification peut se faire par prélèvement d'échantillons représentatifs de l'ouvrage ou par le suivi des mesures de potentiel ou de courants de corrosion. Les zones devant recevoir ce type de produit sont les endroits n'ayant pas été repris.

En effet, généralement lorsque les bétons sont dégradés par le processus de corrosion, il estd'usage d'insérer un inhibiteur de corrosion dans la formulation du béton de ragréage ou de béton projeté. Ainsi, les inhibiteurs de corrosion constituent un moyen de lutte contre la corrosion des métaux. Ceci étant possible car le traitement se fait par l'intermédiaire du milieu corrosif et non pas sur le métal lui-même. Cela permet d'éviter de mettre à nu les armatures pour l'application de ce type de produit.

### 3.4.3 La déchloration

Au fil du temps et selon l'environnement ambiant, des éléments chlorures présents dans l'atmosphère pénètrent dans le béton. Ces éléments favorisent l'apparition et le développement de la corrosion des aciers dans le béton armé. Ce phénomène est amplifié lorsque la présence de chlorures est importante par exemple pour les milieux salins, mais aussi dans le cadre de la réfection des bétons du bâtiment « La Saline » de la Compagnie des Salins du Midi et des Salines de l'Est. Cela étant dû directement à l'activité qu'abrite ce bâtiment.

Le principe de la déchloration est d'extraire ces éléments chlorures du béton afin de limiter leur impact sur les armatures présentent dans l'élément. Pour ce faire, l'extraction des chlorures nécessite de polariser une armature aux alentours du parement en utilisant une anode placée sur le parement et enrobée d'un électrolyte. Ainsi peut circuler un courant de polarisation, de l'anode vers la cathode (l'armature).

Pour l'heure, il existe principalement deux techniques d'extraction des chlorures. Par courant imposé, lorsqu'un générateur électrique est placé entre l'anode et l'armature, ou par courant galvanique lorsqu'un alliage jouant le rôle d'anode est directement relié à l'armature.

Cependant, cette méthode est réalisable seulement dans les cas où il existe une continuité électrique des armatures, il est toujours possible de relier électriquement les armatures isolées à l'aide de pontages électriques. Il est aussi nécessaire d'avoir procédé à la réfection des parements avant l'application de la réalcalinisation afin d'éviter toute forme d'hétérogénéité.

L'action possible de ce traitement est limitée à l'enrobage des armatures.

Il n'est pas possible d'extraire les chlorures au-delà du premier lit d'armatures.

Dans le cas d'utilisation du système par courant imposé, le principe de mise en œuvre est lesuivant :

Projeter une couche de pâte (cellulose ou de laine de roche) sur laquelle on appliquera une solution électrolytique (carbonata alcalin) Mettre en place un treillis anodique métallique sur des baguettes parement Connecter les fils de l'anode au treillis Projeter une deuxième couche de pâte isolante, Effectuer les raccordements électriques au générateur de courant continu ayant une tension réglable de 10 à 48 volts Humidifier périodiquement la pâte par l'électrolyte Effectuer un suivi des tensions et courants ainsi que des prélèvements d'échantillons en cours de traitement afin d'effectuer des analyses sur l'efficacité du traitement Déposer l'ensemble de l'installation .Rincer la structure à l'eau basse pression.

Dans le cas d'utilisation du système anodique, le principe de mise en œuvre est le suivant:

Projeter une couche de pâte saturée en électrolyte sur le béton Mettre en place l'anode métallique fixée d'une part sur une baguette l'isolant du parement béton et d'autre part en contact avec la pâte saturée en électrolyte.Connecter l'anode au circuit électrique, c'est à partir de la que le traitement se met en route

Effectuer un suivi des tensions et courants ainsi que des prélèvements d'échantillons de béton pour analyser l'évolution du traitement Déposer l'ensemble de l'installation Rincer la structure à l'eau basse pression Afin de vérifier si l'extraction des chlorures est convenable, il est possible d'effectuer des prélèvements d'échantillons avant et après traitement pour pouvoir quantifier le résultat du traitement.

### 3.4.4 La réalcalinisation

Le principe de base de la réalcalinisation est de donner au béton un pH permettant de passiver les aciers. Initialement, le béton lors de sa mise en œuvre à un pH aux environs de 13.

Suite à sa carbonatation, le pH du béton diminue jusqu'aux environs de 9, à ce moment-là, les armatures ne sont plus protégées. Une réalcalinisation permet de redonner au béton son pH d'origine. Ce traitement est dit temporaire, car il dure généralement entre une et six semaines selon le degré d'avancement de la carbonatation.

Pour effectuer une réalcalinisation, il est nécessaire de polariser une armature aux alentours du parement en utilisant une anode placée sur le parement et enrobée d'un électrolyte. Ainsi peut circuler un courant de polarisation, de l'anode vers la cathode (l'armature).

Tout comme pour la déchloruration, il existe principalement deux techniques de réalcalinisation. Par l'armature, ou par courant imposé, lorsqu'un générateur électrique est placé entre l'anode et le courant galvanique lorsqu'un alliage jouant le rôle d'anode est directement relié à l'armature.

Cependant, cette méthode est réalisable seulement dans les cas où il existe une continuité électrique des armatures, il est toujours possible de relier électriquement les armatures isolées à l'aide de pontages électriques. Il est aussi nécessaire d'avoir procédé à la réfection des parements avant l'application de la réalcalinisation afin d'éviter toute forme d'hétérogénéité.

L'action possible de ce traitement est limitée à l'enrobage des armatures. Il n'est pas possible de réalcalinisé au-delà du premier lit d'armatures. Dans le cas d'utilisation du système par courant imposé, le principe de mise en œuvre est le suivant :

Projeter une couche de pâte (cellulose ou de laine de roche) sur laquelle on appliquera une solution électrolytique (carbonata alcalin) Mettre en place un treillis anodique métallique sur des baguettes parement Connecter les fils de l'anode au treillis-Projeter une deuxième couche de pâteIsolantes, fixées au parement.

Effectuer les raccordements électriques au générateur de courant continu ayant une tensionréglable de 10 à 48 volts Humidifier périodiquement la pâte par l'électrolyte Effectuer un suivi des tensions et courants ainsi que des prélèvements d'échantillons en cours de traitement afin d'effectuer des analyses sur l'efficacité du traitement Déposer l'ensemble de l'installation,Rincer la structure à l'eau basse pression.

Dans le cas d'utilisation du système anodique, le principe de mise en œuvre est le suivant:

- Projeter une couche de pâte saturée en électrolyte sur le béton
- Mettre en place l'anode métallique fixée d'une part sur une baguette l'isolant du parementbéton et d'autre part en contact avec la pâte saturée en électrolyte
- Connecter l'anode au circuit électrique, c'est à partir du traitement se met en route
- Effectuer un suivi des tensions et courants ainsi que des prélèvements d'échantillons debéton pour analyser l'évolution du traitement
- Déposer l'ensemble de l'installation
- Rincer la structure à l'eau basse pression

Afin de vérifier l'efficacité de la réalcalinisation, il est possible de procéder à des tests sur l'épaisseur de carbonatation avant et après traitement pour pouvoir comparer les résultats. Ce test se fait généralement à la phénolphtaléine.

### 3.4.5 La protection cathodique

Pour le cas du béton armé, la protection cathodique des armatures est un traitement, qui contrairement à l'extraction des chlorures ou la réalcalinisation, appliqué de façon permanente.

Il a pour but de ralentir, voire même d'arrêter la corrosion. Le principe est d'abaisser le potentiel électrochimique de l'armature jusqu'à une valeur seuil appelée potentiel de protection.

Lorsque cette valeur est atteinte, on peut considérer que la vitesse de corrosion dans l'acier est négligeable. Ceci peut se faire en polarisant une armature présente dans le béton avec une anode placée soit sur le parement soit dans l'enrobage. Puis il faut appliquer un courant de polarisation, circulant de l'anode vers l'armature.

De même que pour la réalcalinisation et l'extraction des chlorures, il existe principalement deux méthodes de réalisation. Soit par courant imposé, avec un générateur électrique placé entre l'anode et l'armature, soit par courant galvanique avec une anode sacrificielle directement reliée à l'armature.

Il est tout d'abord important d'effectuer des travaux préalables avant l'application de la protection cathodique. En effet, il est nécessaire d'éliminer le béton dégradé ainsi que les bétons de réparations antérieurs, car ils peuvent présenter une résistivité différente.

Il faut aussi enlever la rouille non adhérente sur les armatures ainsi que de rétablir une continuité électrique des aciers. Enfin, il est nécessaire de reconstituer l'enrobage tout en veillant à avoir une distance millimètres entre l'armature et le parement extérieur.

L'entreprise effectuant ces travaux doit procéder au calcul de dimensionnement des anodes ainsi que de la capacité du générateur. Cela a pour but de déterminer les caractéristiques de l'installation à mettre en œuvre telle que le type et les quantités d'anodes à mettre en place, le courant total nécessaire, etc. Ces paramètres sont directement fonction de la dimension des armatures à traiter.

Une note de calcul doit indiquer le nombre et l'emplacement des zones anodiques, la consommation en courant pour chaque zone, le type d'anode choisi, le nombre et l'emplacement des capteurs de surveillance et de contrôle.

Les étapes de la mise en œuvre de la protection cathodique sont les suivantes :

Forer des trous dans le parement en béton afin de mettre à nu des armatures et les connecterau réseau électrique.Les anodes sont soit plaquées à la surface du parement soit enfouies dans le béton, il estnécessaire de les enrober avec du mortier.Installer des capteurs afin de pouvoir suivre l'efficacité de l'installation Vérifier la continuité Mettre en service l'installation

**Tableau 3.2** Raccordement de la protection cathodique [29]

| | Revêtement imperméabilisant | Réalcalinisation<br>Extractiondeschlorures | Inhibiteur de corrosion | Protection cathodique |
|---|---|---|---|---|
| Avantages | Faible coût. | Passive à nouveau les aciers de manière durable. | Possibilité<br>d'application seule sur béton afin de protéger les aciers. | Empêche l'activité de<br>corrosion. |
| Inconvénients | Nécessite un revêtement résistant à la fissuration. | N'est efficace que<br>pour la partie située entre l'anode et la cathode.<br>Nécessite une purge du support et réparation des épaufrures.<br>Les armatures doivent former un<br>réseau électrique. | Efficacité contestée.<br>Difficulté de contrôle de mise en œuvre. Nécessite une<br>purge du support et réparation des épaufrures.<br>Les armatures doivent former un<br>réseau électrique si<br>forçage. | Nécessite une purge du support et réparation des épaufrures.<br>Les armatures doivent former un réseau électrique. |
| Contraintes phase travaux | Intempéries. | Installation conséquente. Réaliser des pontages entre toutes les armatures. | Installation<br>importante si forçage. Renforcement des contrôles de mise en place.<br>Réaliser des pontagesentre toutes les armatures si forçage. | Installation conséquente.<br>Réaliser des pontages entre toutes les armatures. |
| Durée de vieestimée | 10 ans. | 10 ans. | 10 ans si bonne application. | |

## 3.5 Utilisation des MAP et BAP dans la réparation :

La durabilité des bétons auto plaçant destinés à la réparation des infrastructures :

Le béton auto plaçant (BAP) se caractérise par une mise en place ne nécessitant aucune vibration, une grande déformabilité et une capacité de remplir des sections densément ferraillées avec des formes complexes.

L'emploi de ce type du béton dans la réparation des structures est lié directement à sa stabilité une fois mis dans le coffrage.

Par définition, la stabilité du béton est la capacité de sa pâte de ciment à maintenir en suspension les grosses particules de l'état plastique à l'état durci.

En effet, lorsqu'en prévoit une réparation, le principal objectif, outre celui de redonner à la structure ses qualités initiales, est de garantir la durabilité de l'intervention.

Cette dernière est assurée par le choix judicieux d'un matériau stable, imperméable et qui confère à la structure réparée des propriétés homogènes en adhérence.

Cette recherche vise à étudier pour plusieurs formulations, l'uniformité des propriétés de transport et de l'adhérence.

Cette dernière a fait l'objet d'une étude de vieillissement accéléré de cycles de gel-dégel et de séchage-mouillage. En premier lieu, l'effet de différentes combinaisons d'adjuvants et de liants (ciments) sur les propriétés de transport est étudié.

Les performances du béton à l'état frais et à l'état durci sont évaluées pour des mélanges contenants des ciments composés.

Ces derniers renferment une des deux combinaisons d'ajouts suivantes : fumée de silice-cendre volante ou fumée de silice-laitier.

En plus, cette étude a considérée deux groupes de mélanges ; le premier a un faiblerapport eau/liant (E/L =0,35) et le deuxième son rapport E/L = 0,42 contenant un agent de viscosité.

Avec ces deux limites de rapport eau/liant (E/L), cas de la plupart des réparations au Québec, le BAP semble avoir les mêmes propriétés microstructurale.

En effet, un rapport E/L supérieur à 0,42 génère plus de porosité et en conséquence la perméabilité du BAP augmente et lorsque ce rapport est inférieur à 0,35, le béton est surdosé en liant, augmentant ainsi la résistance à jeune âge avec un grand risque de fissurations thermiques et du retrait empêché.

Les essais portés sur le béton frais et durci ont mis en évidence l'apport bénéfique des ciments composés (ciment type 10 + fumée de silice + cendre volante ou laitier) et de l'agent de viscosité sur la stabilité du BAP à l'état frais.

Les qualités obtenues par ce dernier à l'état frais ont contribué favorablement à l'amélioration des propriétés du béton durci à savoir ; les résistances mécaniques, la résistance au gel-dégel et à l'écaillage et l'imperméabilisation du béton contre la pénétration des ions chlorurent.

L'uniformité des propriétés de transport du BAP ont été ensuite examinées suivant trois niveaux de stabilité statique obtenus par des mesures du tassement ; 0,3%, 0,5% et 0,8%. Cinq colonnes, de 1600 mm de hauteur, 300 mm de largeur et 300 mm de profondeur, sont fabriquées dont quatre en BAP et une en béton conventionnel.

Sur trois positions de la colonne, le bas, le milieu et le haut, on a étudié la résistance à la pénétration des ions chlorures par deux méthodes : perméabilité et migration.

Également, on a analysé la distribution des résistances en compression en deux positions de la colonne (le bas et le haut). Les résultats obtenus des essais de compression et de perméabilité ont montré une distribution uniforme de ces derniers en fonction de la hauteur, pour les cinq colonnes.

Exceptionnellement, l'essai de migration a révélé une valeur de coefficient de diffusion en haut représentant deux fois la valeur trouvée en bas de la colonne conçue avec un tassement égal à 0,8%. Ceci explique l'effet qui peut avoir la stabilité statique sur la distribution de réseau des pores et leurs connectivités dans la même structure.

Les résultats de l'adhérence obtenus sur des murets (ayant les dimensions suivantes ; 1600mm de hauteur, 1600 mm de largeur et 450 mm de profondeur) réparés avec trois bétons dont deux BAP et un béton conventionnel, montrent que globalement l'adhérence est uniforme sur tous les murets.

Les adhérences mesurées sur des murets réparés horizontalement (disposition horizontale du muret) avec du BAP ont une répartition uniforme. Or, cette réparation est quasi-impossibleavec le béton conventionnel.

Le vieillissement de l'adhérence est plus affecté par les cycles de séchage-mouillage, que par les cycles de gel-dégel. Enfin, il faut signaler que les structures étudiées, conçues (colonnes) ou réparées (murets) avec du BAP ont eu une qualité de parement meilleure que celle obtenue par le béton conventionnel.

Nous présentons quelques recommandations qu'on a jugées importantes par l'utilisationdu BAP de réparation dans diverses structures en béton : Choix de paramètres de mélanges :

Un rapport E/L de 0,42 nécessite un agent de viscosité pour augmenter la cohésion entre les différentes composantes du BAP.

À un dosage de 475 kg/m[indice supérieur 3] l'utilisation des ciments composés (provenant directement des cimenteries ou homogénéisés dans le malaxeur) améliorent la stabilité, la déformabilité et la perméabilité des BAPde réparation.

Les BAP avec E/L de 0,35 ne nécessitent pas un agent de viscosité pour la stabilité

Critères de performance des BAP de réparation à l'état durci :

L'essai de diffusion est considéré le mieux adapté pour les BAP dans l'estimationde perméabilité) Le ciment quaternaire s'avère avoir les plus faibles valeurs en diffusion et perméabilité Les ciments ternaire et quaternaire (ciments aux ajouts) améliorent les propriétésde transport (diffusion et perméabilité).

Un tassement de 0,8% affecte la diffusivité du BAP L'indice de ségrégation et la surface maximale du tassement sont de bonsindicateurs de stabilité.

L'essai de diffusion par migration représente un test fiable.

Le BAP possède plus d'avantages, surtout dans les réparations horizontales.

À 300 cycles de gel-dégel l'adhérence n'est pas affectée.

Entre 10 et 70 cycles de séchage-mouillage (un cycle équivaut 02 jours dans l'eau et 03 jours à l'air) l'adhérence diminue à faible intensité. La diminution de l'épaisseur de réparation, de 120 mm à 60 mm augmente l'adhérence.[13]

Utilisation du mortier Adhésif Plaçou Plâtre : MAP La colle adhésive dite MAP est un mortier en poudre à base de plâtre et de résine. De couleur blanche, elle est utilisée dans les travaux intérieurs sur mur et plafond pour :

Le collage de doublage polystyrène, laine de roche, laine de verre, polyuréthane, Le collage de doublage de plaque de plâtre avec la technique de plots de mortier, Ainsi que les petits travaux de rebouchage de trous.

En réalité, la colle MAP fait bien plus. Elle peut intervenir dans les travaux de collage, scellement et de rebouchage. C’est une colle multifonction puisqu’elle adhère à différents supports muraux.

L'utilisation du mortier MAP est un type de pose du placo. La plus courante reste la mise en place d'une ossature métallique.

**Support pour le MAP**

Le MAP est autant apprécié car il est multifonction. Si le MAP a été conçu spécialement pour le collage de plaques de plâtre à bords amincis avec ou sans isolant, il s'adapte à différents supports en intérieur. Pour la partie isolante, vous pourrez utiliser du mortier colle avec la laine de verre, laine de roche ou du polystyrène. Sur les murs ou les plafonds, le mortier adhésif s'utilise sur de nombreux supports :

- Mur en parpaing,
- Mur en brique,
- Du béton banché,
- Du béton cellulaire,
- Une cloison en carreaux de plâtre,
- Des anciens murs en mâchefer.

À partir du moment où le support est sain et sec, le mortier adhésif fera le travail. À savoir : reboucher, sceller ou coller des isolants / plaque de plâtre.

Vous ne devez pas poser de MAP sur des murs poreux, recouverts de papier peint ou de fibre de verre. Si c'est le cas, il est préférable de retirer l'ancien revêtement pour retrouver vos murs d'origine.

Prix au kilo du MAP

Pour le sac de MAP de 10 kg, comptez entre 0,62 et 1 euro le kg. Son prix au kilo oscille entre 0,32 à 0,44 pour les sacs de 25 kg.

Ainsi selon le conditionnement, le prix au kilogramme du MAP est quasiment doublé. Ainsi, préférez un sac de 25 kg de mortier adhésif




**Figure 3.4** Mortier Adhésif

Le MAP est un produit de la marque Plaçou. Les autres marques comme Semin ou Facilis ont l'appellation mortier adhésif.

Bien doser le MAP

Le mortier adhésif est conditionné en sac de 10 à 25 kg sous forme de poudre. Vous l'aurez compris, elle n'est pas prête à l'emploi, il faut falloir le gâcher. Pour cela, il faut connaître le bon dosage et la technique de mélange.

Le gâchage du mortier colle : MAP + EAU

La préparation du mortier colle est simple à mettre en œuvre. Pour le dosage du MAP, il vous faut de l'eau uniquement. Pour un sac de 25 kg de mortier colle, vous devez diluer avec 14 à 15 litres d'eau.

Comment faire du MAP ?

Pour effectuer le gâchage du mortier MAP, veillez à respecter cette préparation :

Dans un seau propre, puis versez de l'eau,

Puis ajoutez du mortier colle petit à petit,

Remuez le mélange avec un malaxeur monté sur une perceuse (ou à la force de vos bras),

Remuez jusqu'à obtenir une pâte onctueuse et sans grumeaux. Elle sera facile à appliquer et ne coulera pas le long du mur.

Préférez un gâchage mécanique pour obtenir un mélange onctueux. Afin que la pâte prenne bien, il est recommandé de la laisser reposer pendant une dizaine de minutes avant son utilisation.



**Figure 3.5** : Un mélange onctueux d'un mortier adhésif

Le mélange du mortier adhésif est composé de MAP et d'eau. Pour le dosage, c'est environdu 2 pour 1 d'eau.

Le gâchage est réussi lorsque vous avez une pâte homogène et sans grumeaux. Avantage de la colle MAP dans les travaux intérieurs.

Le mortier adhésif MAP a plusieurs avantages, c'est d'ailleurs pourquoi il est tant apprécié des plaquistes professionnels. Tout d'abord, le mortier colle MAP est conforme à la normeNF EN 14496.

Le sac de MAP Formule + de chez Plaçou se veut plus adhérent au support, plus fin à l'application avec un meilleur rendement.Une utilisation comprise entre 1 h 30 à 2 heures. Le Map a la caractéristique de ne pas sécher rapidement, ainsi vous pouvez le manipuler pendant un long moment. Ce temps d'emploi allongé est pratique dans vos travaux de rénovation de mur. Pour le séchage complet du MAP, il faut attendre 24 heures. Ensuite, il est possible de le poncer par rapport à du ciment qui sèche vite et devient inutilisable.

Le mortier adhésif offre un rendement élevé. Ainsi, avec 10 kg de MAP, vous pouvez recouvrir environ 6 m2 de surface. La marque Placo vise à réduire la consommation au m2 de colle MAP, on l'estime à 1,8 kg de MAP au m2. La colle MAP se travaille facilement aux couteaux à enduire. Elle permet de reboucher plus facilement des trous avec une fine couche de rebouchage. Ainsi, il est possible de corriger des grandes irrégularités de mur avec précision. La fine couche de MAP déposée sera poncée rapidement avec une cale ou une ponceuse girafe.

Méthode de collage avec plot : le doublage des murs La première utilisation du MAP est la mise en place de plots de mortier sur la plaque deplâtre. Ceci permettra de coller le panneau contre le mur sain et propre : c'est ce qu'on appellefaire le doublage des murs.
Préférez l'utilisation du mortier colle dans des températures comprises entre 5 °C jusqu'à 30 °C pour l'air ambiant ou les murs. Ainsi, évitez de poser du MAP sur des murs intérieurs enplein soleil en été. Coller un panneau isolant avec du MAP

Pour coller un isolant sur votre mur, on utilise le mortier colle MAP. On veillera à l'appliquer soigneusement pour garantir la durabilité de l'ouvrage. Comment mettre des plots de MAP sur votre isolant ? Pour quelle quantité ?

La première chose est de préparer le support afin qu'il soit sain, sec, dépoussiéré. Pour cela, vous devez retirer les morceaux de papiers peints récalcitrants ou de fibre de verre. Vous rebouchez les petits trous au mur et poncez les aspérités disgracieuses. Ce travail préparatoire consiste à faire adhérer le mortier colle au support. Sinon, il existe des sous-couches ou primaires d'accrochage qui aideront les supports trop secs ou trop absorbants à mieux adhérer au map.
Ensuite, vous allez déposer sur votre panneau isolant (polyuréthane, polystyrène) des plots de colle MAP. En général, les plots de MAP ont un diamètre de 10 cm avec une épaisseur de 4 cm. Comptez environ 10 plots par m2 d'isolant, soit un espacement de 40 cm entre chaque plot.

Coller votre panneau isolant directement sur le mur. Recommencez l'opération sur tout le murà isoler en veillant à garder de niveau le mur.Il reste la partie finition à faire comme les joints entre chaque panneau ainsi que les interstices au sol et au plafond. Pour cela, vous utilisez de l'enduit à joint. Puis, enchaînez sur l'enduit garnissant ou de lissage directement.

Pour les supports poreux, il est recommandé de prévoir une sous-couche. Par exemple, le plâtre étant un matériau absorbant l'eau, la colle MAP aura des difficultés à tenir.Le doublage en polystyrène expansé Il existe des panneaux de doublage en polystyrène expansé, le PSE. Une partie avec une plaque de plâtre en BA13. L'autre partie avec l'isolant en polystyrène expansé. Ces panneaux sont de plus en plus utilisés dans les travaux d'isolation thermique intérieure des murs.

Avec une dimension de 2,5 m de longueur et 1,2 m de largeur, ils permettent de réduire considérablement les raccords. Les bords amincis de la partie plaque de placo permettent de faire facilement les joints avec du calicot et bandes à joint.

Pour choisir, deux éléments seront à comparer :

- Le lambda c'est-à-dire La conductivité thermique du matériau exprimé en w/mK. Plus la valeur est faible, plus l'isolant est de qualité.
- Le coefficient thermique R pour l'isolation des murs exprimé entre m2 K/W. Il est compris entre 0,5 et 3.

## 3.6 Renforcement des ouvrages en béton

Deux cas de figure, de natures différentes, peuvent conduire à renforcer les structures en béton armé d'un bâtiment. Le premier d'entre eux est lié à l'apparition, avec le temps, de désordres qui remettent en cause les caractéristiques mécaniques de l'ouvrage. Il s'agit, par exemple, du développement de la carbonatation du béton, ou encore de la formation de fissures.

Le changement des contraintes d'exploitation constitue le second cas de figure. Souvent, la réaffectation des bâtiments se traduit par la modification des surcharges, voire des restructurations lourdes. Les difficultés tiennent à un rapport étroit entre le cloisonnement des espaces et la structure porteuse. Dès lors, réaménager les locaux revient à modifier la structure même. Les difficultés apparaissent également quand le bâtiment continue à être occupé.

Des reprises en sous-œuvre

Les problèmes deviennent aigus lorsqu'il s'agit de réaliser de grands espaces libres de poteaux intermédiaires comme des auditoriums. Il faut alors s'orienter vers des techniques de reprise en sous-œuvre qui nécessitent un phasage rigoureux du chantier pour ne pas déstabiliser l'ouvrage en phase intermédiaire.

Ce genre d'opération devient aujourd'hui monnaie courante tant le patrimoine bâti en béton armé est important et les exigences des maîtres d'ouvrage augmentent. Nombre de bâtiments font l'objet de restructurations lourdes, notamment à Paris où le prix du mètre carré justifie de tels travaux.

Les techniques de renforcement des ouvrages sont multiples et souvent adaptées à chaque chantier. Les plus classiques portent sur l'utilisation de profilés métalliques ou de bacs collaborant. La section des éléments de structure peut également être augmentée par addition d'armatures passives et projection de béton. Certaines techniques sont innovantes comme le procédé de renforcement par collage de tissu de fibres de carbone, qui présente des avantages par rapport au collage de plats métalliques [28]

### 3.6.1 Renforcement par rajout d'armature :

Le renforcement des ouvrages en béton peut faire appel, d'une part, à des armatures de béton armé (en acier ou en matériaux composites) qui sont intégrées dans le béton de la structure (armatures passives internes) et, d'autre part, à des armatures passives (tôles métalliques ou plats et tissus en matériaux composites) collées à la surface du béton (armatures passives extérieures).

Ajout d'armatures de béton armé

Cette technique consiste, après repiquage du béton existant (et, éventuellement, élimination du béton dégradé), à disposer des aciers passifs et à les solidariser à la structure par du béton projeté, ou du béton (voire du mortier), coulé en place.

Ces aciers sont reliés à la structure à l'aide d'aciers de couture dimensionnés par application de la « règle des coutures » en assimilant l'interface entre le nouveau béton et la structure à une reprise de bétonnage.

Si un pourcentage important de la section des aciers existants a disparu en raison de la corrosion, il peut être nécessaire de procéder à un remplacement ou un ajout d'aciers passifs. Dans le cas où les longueurs de recouvrement sont insuffisantes, il est alors possible de souder les nouvelles armatures sur les barres existantes, à condition que la soudabilité de ces dernières ait été vérifiée au préalable. Si les aciers existants ne sont pas soudables, on peut utiliser des coupleurs mécaniques dont l'encombrement peut nécessiter localement un dégagement plus important de béton.

Le scellement des connecteurs dans le béton support, qui servent d'armatures decouture, est assuré de façon pratique à l'aide d'un produit de scellement. La normeNF EN 1504-6, relative à l'ancrage des barres d'acier d'armature fixe les exigences sur les produits et systèmes de scellement. La longueur d'ancrage des connecteurs (au minimum 15 fois celui de la barre dans un trou dont le diamètre est au moins égal à deux fois le diamètre de la barre) peut être calculée par les formules du fascicule de documentation FD P 18-823.

### 3.6.1.1 Mise en place des armatures complémentaires :

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

Les armatures supplémentaires de même nature seront mises en place, par scellement, ou des systèmes explicites de fixation (cheville, tiges collées), afin de restituer la section initiale, avec une tolérance de 5%, en tenant compte des longueurs d'ancrage et de recouvrement, et des armatures de couture.

Dans le cas de soudure, celle-ci devra être effectuée, selon les normes en vigueur, aprèsque la soudabilité de l'acier ait été vérifiée [27]

### 3.6.1.2 Protection des armatures matériaux composites :

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

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

## 3.6.2 Choix des méthodes de renforcement du béton

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

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

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

**Conclusion**

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.

# CONCLUSION GENERALE :

L'entretien et la maintenance de nos structures et infrastructures constituent un défi majeurpour nos sociétés. Les dégradations subies par les structures en béton armé sont liées dans tous les cas à la présence d'eau et, dans les environnements courants, à la corrosion des armatures, qui engendre gonflement de l'acier et épaufrures dans le béton.

La prise en compte de l'environnement dans lequel l'ouvrage est construit est fondamentale, non seulement dans le cas de la construction neuve, mais aussi en situation de maintenance et de réparation. Le produit utilisé, en particulier pour la réparation des épaufrures, devra apporter une résistance supplémentaire par rapport à l'environnement extérieur, en même temps qu'une bonne compatibilité – essentiellement dimensionnelle – avec le support à réparer

## Référence bibliographique :


[1] https://www.mattech-journal.org/articles/mattech/pdf/2010/03/mt98-3-p186.pdf

[2] https://www.ifsttar.fr/collections/BLPCpdfs/blpc__223_59-70.pdf

[3] https://trid.trb.org/view/935851

[4] https://www.iut.u-bordeaux.fr/gc/augc07/index/pdf/ConfInvitee/MalierYves.pdf

[5] https://orbi.uliege.be/handle/2268/199434

[6] http://dspace.univ-msila.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/6733/drt002.pdf?sequence=1&isAllowed=yhttps://www.researchgate.net/profile/Fouzia-Bouabdallah/publication/329336913_Pathologies_diagnostic_a_l'aide_de_CND_et_techniques_de_reparation_et_protection_des_ouvrages_en_beton_arme_etat_de_l'art/links/5c19608a299bf12be38a149a/Pathologies-diagnostic-a-laide-de-CND-et-techniques-de-reparation-et-protection-des-ouvrages-en-beton-arme-etat-de-lart.pdf

[7] https://qdoc.tips/les-pathologies-du-beton-arme-causes-et-consequences-pdf-free.html

[8] https://concretecorrosion.net/ouvrages-concernes-par-la-corrosion-du-betonhttps://www.memoireonline.com/10/12/6325/m_Mecanismes-d-alterations-des-materiaux-cimentaires-soumis-aux-milieux-fortement-agressifs43.html

[9] STEE N P. E. (1997), Inspection systématique des ponts, évaluation de l'état et prédiction de la durée de vie, Proc. Conférence internationale Réparation des structures enbéton : de la théorie à la pratique en milieu marin, Svolvaer (N). mai. p. 201-212.

[10] https://concretecorrosion.net/ouvrages-concernes-par-la-corrosion-du-beton/https://www.lemoniteur.fr/photo/auscultation-a-c-ur-ouvert-du-pont-des-invalides-a-paris-avant-travaux.570654/corrosion.2

[11] http://www.strres.org/fichier-utilisateur/fichiers/INFO-FLASH/Le%20beton_la%20pollution%20par%20les%20chlorures/Info-flash%20du%2004%2004%2017_pr%C3%A9sentation%20G_%20TACHE.pdf

[15] [la Norme européen EN1504]

[16] [C. gén. prop. personnes publiques, art.L.2111-1 et 2]

[17] [C. rur. et pêche maritime, art. L. 161-1].

[18] [CHABBI.RET FERHOUNE.NET BOUABDALLAH.F, «Pathologies, diagnostic à l'aide de CND et techniques de réparation et protection des ouvrages en béton armé état de

l’art.» Faculté des sciences et sciences appliquées, Université Larbi Ben Mhidi, Oum El Bouaghi. 2018]

[19] [SALHI IMED,«DIAGNOSTIC DE LA DEGRADATION DE LA GALERIE D’EVACUATION DE TOUGGOURT» thèse de magistère Université KASDI Merbah de Ouargla 2014]

[20] [LATASTE J.F. « Contrôle Non Destructif des ouvrages d'arts »Université Bordeaux1,]

[21] [Norme NF EN 12504-2 « Essais pour béton dans les structures -Partie 2 : essais non destructifs -Détermination de l'indice de rebondissement », 2003]

[22] . [www : diagnostic-béton]

[23] [La norme NF EN 13791 de septembre 2007]

[24] [OUZAA KHEIRA, «réhabilitation des structures », Université MOHAMED BOUDIAF Oran, Année 2014/2015.]

[25] [BULLETIN DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSÉES - 223 - SEPTEMBRE à DÉCEMBRE 1999 - RÉF 4283 - PP 59.70]

[26] [Mise en peinture des bétons de génie civil » (LCPC, Juin 1999).]

[27] [Génie – Mémoires [1950]]

[28] [Siège d'Axa : « Une reprise en sous-œuvre complexe », « Le Moniteur » du 16 avril 1999, p. 64.]

[29]. https://www.memoireonline.com/07/12/6023/Rehabilitation-des-ouvrages-en-beton-arme.html