

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministere De l'Enseignement Superieur Et De La Recherche Scientifique



Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf - Mila -
Institut Des Sciences et De Technologie
Département De Génie Civil et Hydraulique

N° de Ref:.....

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme
MASTER
Spécialité : Génie Civil
Option : Structures

**Réparation de la corrosion du béton
armé (Poteaux-poutres).
Cas du Centre universitaire
Abdelhafid Boussouf, Mila.**

Présenté par :

- ❖ BENYASSADE SIDALI
- ❖ CHEBBAT YAAKOUB

Présidente :

Mme DROUNA Karima

Examinatrice :

Dr. BOUKOUR Salima

Encadrée par :

➤ Dr. ABADA Rofia

Année Universitaire : 2024/2025



REMERCEMENT

Nous remercions en premier lieu, Dieu qui a bien voulu nous donner la force et le courage pour effectuer et finaliser le présent travail,

Nous tenons à remercier nos très chers parents pour leur soutien, nous remercions aussi notre encadrice le **Dr. ABADA Rofia** pour ses orientations et ses conseils durant l'évolution de ce travail.

Nous remercions tous les enseignants qui nous ont accompagnés durant notre formation.

Nous tenons à remercier tous ceux qui de loin ou de près ont contribué à finaliser ce modeste travail.

Remerciements particuliers

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Nos sincères remerciements à Mr **Reddas Hocine** ingénieur en génie civil de Batna, pour son implication technique et pratique et surtout pour son professionnalisme, il a tout fait pour faire avancer ce travail.

Nos sincères remerciements vont à **Mr. Boucanna Djamel Eddine**, du *Laboratoire Travaux Publics, Construction et Étude de Sol*, pour son accompagnement, ses conseils techniques précieux et sa disponibilité tout au long de ce projet.

Nous remercions aussi le **Dr Djahra Assad** de Biskra pour sa précieuse collaboration, sans son réseau efficace de professionnels en génie civil, le travail ne pouvait pas s'accomplir avec une telle rapidité et efficacité.

Nous remercions particulièrement, **Mr Boudiab Sofiane**, ingénieur en génie civil pour son engagement et les déplacements effectués pour finaliser ce travail.

Nous remercions également **Mr. Sadrati Hacene**, *entrepreneur*, pour son engagement, sa collaboration active sur le terrain et son soutien logistique, essentiels à l'avancement des travaux.

Notre reconnaissance va aussi à **Mr. Zouaghi Kamel**, *maçon*, pour son savoir-faire, son professionnalisme et la qualité de son travail durant les phases de mise en œuvre.

Leurs contributions ont été déterminantes pour le bon déroulement de cette étude, et nous leur en sommes profondément reconnaissants.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

À mes chers parents,

Pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien constant. Ils ont toujours cru en moi et m'ont encouragé à aller de l'avant. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance et de mon amour éternel.

À mes frères et sœurs, pour leur présence rassurante et leur soutien affectueux. Leur confiance et leurs encouragements m'ont donné la force de persévérer.

À tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Résumé

La corrosion des armatures du béton armé est une des pathologies qui altère les performances des structures. Elle peut être provoquée par les sels de déverglaçage dans les zones soumises au gel et/ou aux embruns marins. La carbonatation constitue une autre source de dégradation. Les conséquences de cette corrosion sont la modification du comportement de l'acier et la dégradation de l'interface acier béton, qui ont favorisé la structure a endommagé. Ce type d'endommagement est responsable des coûts financiers énormes dépensés chaque année dans la réparation des structures détériorées à travers le monde. Ce mémoire traite particulièrement un cas de corrosion dans une poutre en béton au sein d'une structure d'un équipement, située au centre universitaire *Abdelhafid Boussouf*, Mila. Le but de ce travail est de détecter cette corrosion en proposant des solutions de terrain pratiques afin de résoudre les problèmes repérés dans ce cas d'étude.

Mots clés

Corrosion, béton, armatures, acier, poutre, centre universitaire Abdelhafid Boussouf, solution.

الملخص

يعد تآكل الخرسانة المسلحة أحد الأمراض التي تؤثر على أداء الهياكل. ويمكن أن يحدث بسبب أملاح إزالة الجليد في المناطق المعرضة للصقيع و/أو رذاذ البحر. الكربنة هي مصدر آخر للتدهور. وتتمثل عواقب هذا التآكل في حدوث تغييرات في سلوك الفولاذ وتدهور واجهة الفولاذ/الخرسانة مما يؤدي إلى تلف الهيكل. هذا النوع من الأضرار هو المسؤول عن التكاليف المالية الهائلة التي يتم إنفاقها سنوياً على إصلاح الهياكل المتدهورة في جميع أنحاء العالم. تتناول هذه الأطروحة على وجه التحديد حالة تآكل في عارضة خرسانية داخل هيكل معدات يقع في المركز الجامعي عبد الحفيظ بوصوف بميلة. والهدف من هذا العمل هو الكشف عن هذا التآكل من خلال اقتراح حلول ميدانية عملية من أجل حل المشاكل التي تم تحديدها في دراسة الحالة هذه.

الكلمات المفتاحية

التآكل، الخرسانة، حديد التسليح، الفولاذ، العارضة، المركز الجامعي عبد الحفيظ بوصوف، التلوث.

Summary

Corrosion of reinforced concrete is one of the pathologies that affect the performance of structures. It can be caused by de-icing salts in areas subject to frost and/or sea spray. Carbonation is another source of deterioration. The consequences of this corrosion are changes in the behaviour of the steel and degradation of the steel/concrete interface, leading to structural damage. This type of damage is responsible for the enormous financial costs spent each year on repairing deteriorated structures throughout the world. This thesis deals specifically with a case of corrosion in a concrete beam within an equipment structure, located at the Abdelhafid Boussouf University Centre, Mila. The aim of this work is to detect this corrosion by proposing practical field solutions in order to resolve the problems identified in this case study.

Key words

Corrosion, concrete, reinforcement, steel, beam, Abdelhafid Boussouf university centre, pollution.

Table des matières

Remerciements particuliers	4
Liste des figures.....	14
Liste des photos	15
Introduction générale	16
Introduction générale	17
1- Contexte et justification :	18
1.1 Contexte :.....	18
1.2 Justification.....	19
1-Sécurité publique :	19
2-Réduction des coûts à long terme	20
3-Préservation de la durabilité des infrastructures :	20
4-Impact économique et social	20
5-Prévention des risques à long terme.....	20
2-La problématique de la corrosion des structures en béton armé :	20
3-Objectifs de mémoire :	21
4-Méthodologie adoptée :	22
- Revue de la littérature	22
- Diagnostic de la corrosion sur le site d'étude.....	22
• Présentation du site.....	22
• Méthodologie d'évaluation	22
• Interprétation des résultats	22
- Proposition de solutions de réparation et d'entretien.....	23
- Étude économique et analyse des impacts	23
- Synthèse et recommandations	23
5/Organisation de travail :	23
Phase 1 : Recherche et revue de la littérature (Semaines 1-4).....	23
Phase 2 : Étude de terrain et diagnostic (Semaines 5-8)	24
Phase 3 : Proposition de solutions et analyse économique (Semaines 9-12).....	24
Phase 4 : Rédaction et finalisation du mémoire (Semaines 13-16).....	24
I.1 : Définitions et mécanismes de la corrosion :	26
Introduction :.....	26

I.1.1.1 : Les types de la corrosion :	27
-Corrosion chimique (séché) :	28
- Corrosion biochimique :	28
-Corrosion avec érosion, avec frottement et par cavitation	29
-La corrosion atmosphérique :	29
-Amorçage et propagation de la corrosion :	29
I.1..12 : Processus de corrosion dans le béton armé :	31
I.1..13 : les étapes de corrosion :	32
I.1.2: Facteurs influençant la corrosion :	33
I.1.2.1 : Influence de la composition du béton :	33
I.1.2.2 : Influence de l'humidité :	34
I.1.2.3 : Influence de l'enrobage :	34
A) Dégradation mécanique de l'enrobage :	35
I.2 : Les impacts de la corrosion sur des structures poteaux-poutres :	36
I.2.1 : Réduction de la capacité portante :	37
-Réduction de la section des armatures	37
-Perte d'adhérence acier-béton	37
-Modification des propriétés mécaniques de l'acier	37
-Formation de piqûres localisées.....	37
I.2.2 : Dégradation des performances structurales :	38
Définition :	38
-Les phases de dégradation de béton armé par la corrosion :	38
- Les causes de dégradation :	38
I.3 : Présentation des normes et codes de réparation :	38
Conclusion.....	39
Chapitre 2 : Diagnostic de la corrosion au Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf	41
Introduction :	42
II. Présentation du site d'étude :	42
A propos le centre universitaire Abdelhafid Boussouf – Mila :	42
Environnement local :	42
II.1.Localisation et importance stratégique :	43
II.1.1.Localisation :	43

II.1.2. Importance stratégique :	44
II.2.1. Inspection visuelle :	45
II.2.2. Tests et analyses non destructives :	46
II.2.3. Évaluation des indices de corrosion (carbone, chlorures, etc.) :	47
-Introduction :	47
-Les tests :	47
II.3. Résultats et interprétation :	49
II.3.1: L'interprétation :	49
II.3.2 : Objectif de l'intervention :	49
II.3.2. Les résultats :	50
Conclusion :	54
Chapitre 3 : Méthodes de réparation et d'entretien	56
Introduction :	57
III.1 : Méthode de réparation :	58
Définition :	58
III.1.1 : Méthodes physiques :	58
Réparation des ouvrages en béton armé :	58
Réparation des surfaces :	58
Dégagement des armatures :	58
Armatures passives additionnelles Cas d'utilisation :	59
Ajout d'armatures de béton armé :	59
Armatures passives additionnelles Etudes préliminaires :	59
Mortier ou béton :	60
Le ragréage :	60
Préparation de surface :	60
Nettoyage de la surface :	62
Protection des aciers :	63
Protection par méthodes électrochimiques :	63
Protection cathodique :	64
Déchloration :	67
Ré-alcalinisation :	68
Les étapes du traitement :	68
III.1.2: Méthodes chimiques :	69

III.1.2.1:Inhibiteurs :	69
III.1.2.2 : Les revêtements :	71
III.1.3: Méthodes mécanique :	73
- III.1.3.1: Techniques de rabotage :	73
III.1.3.2: Renforcement avec ajout d'armatures :	74
III.1.3.3 : Remplacement d'armatures de béton armé :	76
Réparation avec remplacement d'armatures.....	76
Choix des matériaux – Armatures :	76
III.2 : Étude des techniques adaptées au cas des poteaux et poutres :	76
Introduction :	76
III.2.1 : Méthodes classique :	77
III.2.1.1 : Chemisage :	77
III.2.1.2 : Injection :	79
Adjonction d'armatures complémentaires :	79
III.2.1.3 : Béton projeté :	80
Projection par voie sèche :	80
Projection par voie mouillée :	81
Avantages des deux méthodes :	81
Par voie sèche :	81
Par voie mouillée :	82
Inconvénients des deux méthodes :	82
Par voie sèche :	82
Par voie mouillée	82
III.2.1.4 : Tôles collées :	82
III.2.1.5 : Précontrainte additionnelle :	83
Avantage :	83
Inconvénients :	84
III.2.2 : Méthodes nouvelles :	84
III.2.2.1 : Techniques de renforcement par matériaux composites :	84
III.2.2.2 : Définition de PRF :	84
Avantage.....	85
Inconvénients :	85
III.2.2.3 : Méthode de renforcement par bar NSM « Near-surface mounted » :	85

III.2.2.4 : Renforcement des éléments structuraux :.....	86
a) Renforcement des poteaux :.....	86
b) Renforcement des poutres :	86
Conclusion :.....	86
III.2.3 : Adéquation avec les contraintes locales (climat, ressources, coûts) :	87
III.2.3.1 : Adaptation au climat algérien :.....	87
Solutions :.....	87
Solutions :.....	87
Solutions :.....	88
III.2.3.2 : Utilisation des ressources locales :	88
III.2.3.3: Réduction des coûts et efficacité énergétique :	88
Exemples d'architecture adaptée en Algérie :.....	89
Conclusion :.....	Error! Bookmark not defined.
Chapitre 4 : Étude économique et analyse des impacts	90
Introduction :.....	90
IV.1.1 : Évaluation des coûts de réparation :.....	91
IV.1.1.1 : Main-d'œuvre :	91
IV.1.1.2 : Matériaux :.....	92
IV.1.1.3 : Les outils :	93
IV.1.2 : Scénarios économiques (court, moyen et long terme) :.....	95
IV.1.2.1 : Court terme : Réparations immédiates :.....	96
Procédure de réparation :.....	96
Coûts associés :.....	96
Considérations :	96
IV.1.2.2 : Moyen terme : Maintenance préventive	96
Stratégies de maintenance préventive :	97
Avantages économiques	97
Mise en œuvre en Algérie :.....	98
IV.1.2.3 : Long terme : Investissements durables :.....	98
Utilisation de matériaux innovants :.....	98
Techniques de construction avancées :.....	98
Systèmes de surveillance et de maintenance prédictive :	99
Considérations économiques :	99
IV.2. Impact des réparations sur la durabilité des structures :.....	99

IV.2.1 : La durabilité :	99
IV.2.2 : Impact des réparations sur la durabilité des structures :	101
1. Importance d'une évaluation préalable :	101
2. Méthodes de réparation et leur impact sur la durabilité :	101
3. Facteurs influençant la durabilité des réparations :	101
4. Considérations environnementales et économiques :	102
IV.3. Étude des implications environnementales :	102
Définition.....	102
IV.3.1.Objectifs de l'EIE	102
IV.3.2 :Étapes clés de l'EIE (emwelt.lu, 2025) :	103
IV.3.3.Cadre juridique en Algérie :	104
Conclusion :	105
Conclusion Générale	106
Conclusion générale.....	107
I. Synthèse des résultats obtenus :	108
II. Réponse à la problématique :	108
1. Diagnostic de la corrosion :	108
2. Techniques de réparations adaptées :	109
3. Entretien préventif et durabilité des réparations :	109
4. Adaptation au contexte local :	110
III. Recommandations pour les gestionnaires de structures :	110
1. Planification stratégique et gestion des ressources :	110
2. Adoption du BIM (Building Information Modeling):	110
3. Communication et collaboration efficaces :	111
4. Gestion proactive des risques :	111
5. Conformité aux normes et réglementations :	111
6. Intégration du développement durable :	111
7. Suivi et amélioration continue :	111
IV. Perspectives pour des recherches futures :	112
1. Intégration des jumeaux numériques dans la gestion des structures :	112
2. Intelligence artificielle et collaboration humain-machine :	112
3. Stratégies de maintenance optimisées via l'apprentissage par renforcement :	112

4. Adoption stratégique des jumeaux numériques dans les phases du génie civil :	112
5. Innovation et durabilité dans les PME du secteur de la construction :	112
6. Formation et développement des compétences pour l'avenir du génie civil :	113
Références	114

Liste des figures

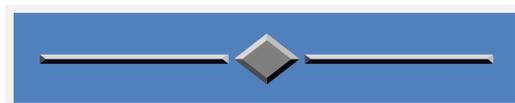
Figure.I. 1 : Exemple de corrosion chimique	28
Figure.I. 2 : Corrosion électrochimique	29
Figure.I. 3 : Processus de corrosion des armatures du béton armé.....	30
Figure.I. 4 : Etapes de l'évolution de la corrosion des armatures dans le béton.....	32
Figure.I. 5 : Insuffisance d'enrobage	34
Figure.I. 6 : types de fissures développées lors de la corrosion des aciers.....	35
Figure.I. 7 : types de dégradations favorisées par l'insuffisance de l'enrobage.....	36
Figure.I. 8 : Décollement du parement du pilier et fissuration du chevêtre	36
Figure.III.1 : Dégagement des armatures selon la norme NF P 95.101	59
Figure.III.2 : Enlèvement du béton pollué et de la rouille	61
Figure.III.3 : Enlèvement toute rouille	61
Figure.III.4 : Enlèvement du béton dégradé.....	62
Figure.III.5 : Les étapes de préparation de surface	62
Figure.III.6 : Mise en place d'un passivant si nécessaire.....	63
Figure.III.7 : Traitement électrochimique sous « courant imposé »	64
Figure.III.8 : Traitement électrochimique avec une anode " galvanique ".....	65
Figure.III.9 : Mise en place du treillis anodique.....	65
Figure.III.10 : Application d'un potentiel électrique.....	65
Figure.III.11 : Le principe de la protection cathodique appliquée au béton armé.	66
Figure.III.12 : une réaction cathodique à toutes les armatures.....	66
Figure.III.13 : Extraction des chlorures par un traitement électrochimique.....	67
Figure.III.14 : Traitement de ré-alkalinisation de l'enrobage autour d'une armature.....	68
Figure.III.15 : Enrobage d'une anode pour traitement de ré-alkalinisation à l'aide d'anode galvanique.	69
Figure.III.16 : Catégories des inhibiteurs de corrosion.....	70
Figure.III.17 : Application d'inhibiteurs de corrosion dans ou sur le béton.....	70
Figure.III.18 : Inhibiteurs de corrosion.....	71
Figure.III.19 : Application de la finition.....	72
Figure.III.20 : Les enduits de façade	72
Figure.III.21 : Exemple de revêtement des surfaces.....	73
Figure.III.22 : Assemblage d'armatures par manchonnage	73
Figure.III.23 : Assemblage par soudés [Baronj. Ollirier jp. 1997, la durabilité de béton]	74
Figure.III.24 : Renforcement avec ajout d'armatures de poutre.....	74
Figure.III.25 : Renforcement avec ajout d'armatures de poutre.....	75
Figure.III.26 : Renforcement avec ajout d'armatures de précontraint.....	75
Figure.III.27 : Remplacement des armatures	76
Figure.III.28 : mise en place des armatures de renforcement avec augmentation de la rugosité du poteau.....	77
Figure.III.29 : Méthode d'injection	79
Figure.III.30 : Adjonction d'armatures complémentaires.....	80
Figure.III.31 : Technique de projection par voie sèche	81
Figure.III.32 : technique de projection par voie mouillée.....	81
Figure.III.33 : technique de précontrainte additionnelle.....	83

Figure IV. 1 : Carbonatation du béton	100
Figure IV. 2 : Différentes étapes de la procédure d'EIE (adapté de Larrey-Lassalle et al., 2017).....	104

Liste des photos

Photo II. 1 : Localisation de C.U.Mila.....	43
Photo II. 2 : Localisation stratégique de la wilaya de Mila	44
Photo II. 3 : Dégradation avancée du béton armé	45
Photo II. 4 : La machine ultrason.....	46
Photo II. 5 : Équipement de mesure non destructive pour diagnostic de structure.....	46
Photo II. 6 : la zone critiquée par la corrosion.....	51
Photo II. 7 : préparation de mélange.....	52
Photo II. 8 : au cour de la procusse de réparation.....	52
Photo II. 9 : Lisser le mortier pour obtenir une finition uniforme.	53
Photo II. 10 : Laisser sécher le mortier avant de procéder à la finition et appliquer une protection contre la corrosion si nécessaire.	54
Photo II. 11 : L'état finale de la partie qui a été réparée	54

Introduction générale



Introduction générale

La corrosion, phénomène naturel de dégradation des matériaux, notamment des métaux, affecte gravement les infrastructures modernes, en particulier dans la construction. Ce mémoire de Master en génie civil, synthétise les causes, impacts, méthodes de réparation et enjeux économiques de la corrosion, avec un accent sur les structures en béton armé.

Ce processus, issu du latin *corrodere* « ronger », résulte de l'action d'agents corrosifs comme l'humidité, les chlorures (présents dans le sel de déneigement ou l'eau de mer) ou les cycles de gel/dégel. Les métaux, en contact avec un milieu agressif liquide ou gazeux, reviennent à des états plus stables, comme les oxydes ou sulfures, perdant ainsi leurs propriétés mécaniques. Dans le béton armé, utilisé dans les ponts, tunnels ou immeubles, l'acier intégré se corrode lorsqu'il est exposé à ces agents, produisant de la rouille qui, en se dilatant, fissure le béton. Cela compromet la résistance et la durabilité des structures, surtout dans les régions côtières ou sous climats extrêmes, où les infrastructures vieillissantes sont particulièrement vulnérables.

Économiquement, la corrosion représente un coût colossal. Chaque année, environ 25 % de la production mondiale d'acier, soit 150 millions de tonnes, est perdue, équivalant à 5 tonnes par seconde. Aux États-Unis, les pertes dépassent 7 milliards de dollars annuellement, incluant les coûts directs (remplacement des matériaux) et indirects (arrêts de production, réparations). Ces chiffres englobent les dépenses pour des mesures de protection, comme l'utilisation de matériaux résistants ou de revêtements, ainsi que les inspections et l'entretien. La corrosion des armatures dans le béton armé menace la sécurité des usagers et réduit la durée de vie des ouvrages, rendant la détection précoce et les réparations indispensables.

Notre étude effectuée au Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf de Mila en Algérie, illustre ces enjeux à travers le diagnostic et la réhabilitation d'une poutre en béton armé. En combinant inspection visuelle, essais non destructifs et analyse des matériaux, les chercheurs ont identifié l'humidité, les chlorures et la carbonatation comme causes principales de la dégradation. Une stratégie de réparation a été élaborée pour restaurer l'intégrité structurelle de la poutre et prolonger sa durée de vie, en conformité avec les normes techniques.

La réparation de la corrosion dépend du matériau et de l'ampleur des dégâts. Pour les métaux, elle implique l'évaluation des dommages, un nettoyage mécanique ou chimique (brosse

métallique, acide phosphorique), et l'application de protections comme des apprêts ou peintures anticorrosion.

Dans le béton armé, les parties endommagées sont retirées, les armatures traitées avec des inhibiteurs, et un mortier de réparation sont appliqués. Pour prévenir la réapparition, des mesures comme l'utilisation d'alliages résistants, de revêtements (galvanisation, vernis) ou de protections cathodiques sont adoptées. Une gestion efficace de l'environnement, via un meilleur drainage ou une ventilation optimisée, réduit également l'exposition aux agents corrosifs.

En Algérie, la corrosion des armatures, aggravée par les conditions climatiques et les défauts de mise en œuvre, entraîne une dégradation prématurée des structures en béton armé, générant des pertes économiques importantes pour le génie civil. Les coûts de réhabilitation incluent la main-d'œuvre, les matériaux et les équipements, nécessitant une analyse rigoureuse pour proposer des solutions viables. L'étude algérienne évalue ces coûts à court, moyen et long terme, tout en explorant des choix technico-économiques pour optimiser les interventions. L'emploi de matériaux composites ou plastiques, plus résistants à la corrosion, apparaît comme une alternative prometteuse pour limiter les besoins en maintenance.

La corrosion constitue un défi majeur pour la durabilité des infrastructures, avec des impacts structurels, économiques et sécuritaires. Une approche intégrée, combinant diagnostic précis, réparations adaptées et mesures préventives, est cruciale pour limiter ses effets. En Algérie, où les conditions environnementales exacerbent ce phénomène, des solutions techniques et économiques sont essentielles pour préserver la sécurité et la fonctionnalité des infrastructures en béton armé.

1- Contexte et justification :

1.1 Contexte :

La corrosion est un phénomène naturel qui affecte divers matériaux, notamment les métaux, et a un impact particulièrement important sur les infrastructures modernes. Dans le domaine de la construction, la corrosion du béton armé est un problème majeur. Le béton, bien qu'étant un matériau résistant, est souvent utilisé avec des armatures en acier pour renforcer sa capacité à supporter des charges. Cependant, lorsque l'acier à l'intérieur du béton est exposé à l'humidité, aux chlorures (provenant du sel de déneigement, de l'eau de mer ou de l'atmosphère), ou à des cycles de gel/dégel, l'acier commence à se corroder. Ce processus produit de la rouille qui, en

se dilatant, provoque des fissures dans le béton, entraînant sa dégradation et réduisant la résistance de la structure. Ce phénomène se manifeste souvent dans les infrastructures vieillissantes, telles que les ponts, tunnels, ou immeubles en béton armé, particulièrement dans les régions côtières ou les zones où les conditions climatiques sont extrêmes. La corrosion n'est pas seulement un problème esthétique, mais un danger pour la sécurité des utilisateurs de ces infrastructures. C'est pourquoi la détection précoce et les réparations appropriées sont essentielles pour maintenir l'intégrité et la durabilité des structures en béton.

1.2 Justification :

La corrosion du béton armé est un problème majeur dans la construction moderne, et sa gestion justifie pleinement l'engagement d'efforts importants pour préserver la sécurité et la durabilité des infrastructures. Le béton armé combine la résistance en compression du béton avec la résistance en traction de l'acier, mais ce dernier est vulnérable aux phénomènes corrosifs. La corrosion de l'acier dans le béton est principalement causée par la pénétration d'humidité, de chlorures (souvent dus au sel de déneigement, à l'eau salée ou à l'air marin), et d'autres agents chimiques, qui attaquent la couche protectrice d'oxyde formée naturellement sur l'acier. Cette couche est cruciale pour protéger l'acier de la rouille, mais lorsque des agents externes brisent cette barrière, la corrosion peut se développer.

Lorsque l'acier commence à se corroder, il produit de la rouille qui, en se dilatant, crée une pression interne qui fissure le béton. Ces fissures exposent davantage l'acier à l'humidité, ce qui aggrave la situation. Ce cycle de dégradation peut entraîner l'éclatement du béton, une perte de résistance structurale, et dans les cas extrêmes, un effondrement localisé ou global d'une partie de l'infrastructure. Dans des environnements tels que les ponts, les tunnels ou les bâtiments en béton exposés aux intempéries ou à des conditions climatiques extrêmes (zones côtières, régions soumises à des cycles de gel/dégel, ou celles où le sel est utilisé pour le déneigement), la corrosion peut se propager rapidement et affecter la sécurité publique.

La justification pour l'attention portée à la réparation de la corrosion du béton repose donc sur plusieurs éléments :

1-Sécurité publique : La corrosion, si elle n'est pas traitée, peut entraîner des défaillances graves de structures, exposant ainsi les personnes à des risques accrus d'accidents. Des infrastructures corrodées peuvent perdre leur capacité à supporter les charges prévues, menaçant la sécurité des usagers.

2-Réduction des coûts à long terme : Si la corrosion est détectée et réparée tôt, elle permet d'éviter des réparations coûteuses ou même des reconstructions complètes des structures endommagées. Les coûts de maintenance régulière sont largement inférieurs à ceux des réparations massives dues à une négligence prolongée de la corrosion.

3-Préservation de la durabilité des infrastructures : La corrosion, lorsqu'elle est prise en charge à un stade précoce, permet de prolonger la durée de vie des infrastructures, contribuant ainsi à une gestion durable des ressources. Une structure bien entretenue réduit la nécessité de reconstruire et minimise l'impact environnemental associé à des projets de remplacement à grande échelle.

4-Impact économique et social : Les infrastructures corrodées peuvent entraîner des perturbations importantes dans les services publics, des fermetures de routes ou d'ouvrages, et des coûts indirects dus aux interruptions économiques. De plus, la perte d'infrastructures critiques, comme des ponts ou des réseaux de transport, peut avoir un effet domino sur les autres secteurs économiques.

5-Prévention des risques à long terme : Les technologies modernes, telles que les revêtements protecteurs, les anodes sacrificielles, et les méthodes de réparation avancées, permettent de traiter la corrosion efficacement et de manière préventive. Cela contribue à minimiser les risques à long terme pour la structure tout en optimisant les ressources utilisées pour sa conservation.

En conclusion, la gestion de la corrosion du béton armé est essentielle non seulement pour garantir la sécurité et la stabilité des infrastructures, mais aussi pour éviter des coûts considérables à long terme, préserver l'intégrité des constructions et assurer leur durabilité. La réparation de la corrosion devient ainsi une priorité dans la gestion et la maintenance des infrastructures modernes.

2-La problématique de la corrosion des structures en béton armé :

Les structures en béton armé, notamment les poteaux et poutres, constituent une composante essentielle des infrastructures modernes. Toutefois, leur durabilité est gravement compromise par la corrosion des armatures, un phénomène largement répandu qui réduit leur capacité portante et compromet leur sécurité. Cette dégradation est particulièrement préoccupante dans des environnements où les conditions climatiques, les matériaux utilisés ou l'entretien

inadéquat accélèrent le processus corrosif. Le Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf de Mila, comme de nombreuses infrastructures similaires, fait face à des problèmes récurrents de corrosion qui affectent les performances de ses structures porteuses. Cette situation soulève des enjeux cruciaux : comment diagnostiquer efficacement la corrosion dans ces structures ? Quelles techniques de réparation sont les plus adaptées aux contraintes économiques, techniques et environnementales locales ? Et surtout, comment garantir la durabilité des réparations dans le temps tout en limitant les impacts sur le fonctionnement de l'établissement ? Malgré les progrès réalisés dans les méthodes de diagnostic et de réparation de la corrosion, il subsiste un déficit d'applications contextualisées aux spécificités locales, comme celles rencontrées au Centre Universitaire de Mila. Ainsi, cette étude vise à répondre à une question clé : quelles stratégies de diagnostic, de réparation et d'entretien préventif peuvent être mises en œuvre pour assurer la durabilité des structures en béton armé, tout en tenant compte des contraintes techniques et économiques du contexte local ? Ce mémoire s'inscrit dans la nécessité de proposer des solutions pratiques et durables pour préserver ces infrastructures, essentielles au développement académique et social de la région.

3-Objectifs de mémoire :

L'objectif de ce sujet sur la réparation de la corrosion des structures en béton armé est d'apporter une compréhension approfondie des causes, des effets et des solutions de ce problème majeur qui touche de nombreuses infrastructures. La corrosion des armatures en acier, engendrée principalement par l'humidité, la présence de chlorures (souvent liés à l'utilisation de sels de déneigement ou à la proximité de la mer) et des conditions environnementales agressives, représente un danger pour la sécurité et la durabilité des structures en béton armé. Ce phénomène entraîne une diminution de la résistance du béton, l'apparition de fissures et, à terme, une dégradation générale de la structure, pouvant mettre en péril la sécurité des usagers.

L'objectif est donc de sensibiliser aux risques associés à la corrosion et de détailler les méthodes de diagnostic permettant d'évaluer l'étendue des dégâts. Cela inclut des techniques telles que l'inspection visuelle, la mesure du taux de corrosion et l'analyse de la couverture en béton. Une fois les dommages identifiés, le sujet présente les différentes étapes de réparation, comme le nettoyage des armatures corrodées, la remise en place d'un béton de réparation et l'application de solutions pour protéger les armatures de la corrosion future. Les méthodes employées pour traiter la corrosion des armatures incluent des peintures anti-rouille, des inhibiteurs de corrosion et, parfois, l'injection de résines pour restaurer la structure du béton.

De plus, le sujet explore les différentes techniques de prévention, comme l'utilisation de matériaux à haute performance, l'application de revêtements imperméabilisants ou encore l'installation de systèmes de protection cathodique. L'objectif est de proposer des solutions pour prolonger la vie utile des structures, éviter des réparations coûteuses et garantir leur sécurité sur le long terme. Enfin, ce sujet met en lumière l'importance d'un entretien régulier des structures en béton armé, en soulignant l'impact de la gestion proactive de la corrosion dans la pérennité des infrastructures, ainsi que la nécessité d'une planification à long terme pour éviter des défaillances majeures.

4-Méthodologie adoptée :

La méthodologie adoptée dans ce mémoire repose sur une approche structurée et progressive visant à analyser, diagnostiquer et proposer des solutions à la problématique de la corrosion des structures en béton armé. Elle se décline en plusieurs étapes :

- Revue de la littérature

- Étude des mécanismes de corrosion du béton armé.
- Identification des principaux facteurs influençant la corrosion (chimique, mécanique, environnemental).
- Analyse des impacts de la corrosion sur les structures poteaux-poutres.
- Recensement des normes et des techniques de réparation existantes.

- Diagnostic de la corrosion sur le site d'étude

- **Présentation du site** : Localisation, historique des structures étudiées et leur importance stratégique.
- **Méthodologie d'évaluation** :
- Inspection visuelle pour détecter les signes de détérioration (fissures, taches, écaillage).
- Tests et analyses non destructives (potentiel de corrosion, carbonatation, teneur en chlorures, etc.).
- Évaluation des indices de corrosion et identification des zones critiques.
- **Interprétation des résultats** : Analyse des causes spécifiques de la corrosion sur le site étudié.

- Proposition de solutions de réparation et d'entretien

- Identification des méthodes de réparation adaptées (physiques, chimiques, mécaniques).
- Étude des avantages et inconvénients de chaque technique en fonction des contraintes locales (climat, ressources, coûts).
- Comparaison avec les normes en vigueur et élaboration d'un plan de maintenance préventif.

- Étude économique et analyse des impacts

- Évaluation des coûts des différentes solutions de réparation (main-d'œuvre, matériaux, outils).
- Comparaison des scénarios économiques (court, moyen et long terme).
- Analyse de l'impact des réparations sur la durabilité des structures et leurs implications environnementales.

- Synthèse et recommandations

- Résumé des résultats obtenus et validation de l'efficacité des solutions proposées.
- Réponse à la problématique initiale.
- Recommandations pour une meilleure gestion et prévention de la corrosion.
- Perspectives pour des recherches futures.
- Cette méthodologie vous permet d'aborder le sujet de manière rigoureuse et structurée, en combinant une analyse théorique, un diagnostic sur le terrain et une étude des solutions pratiques.

5/Organisation de travail :

L'organisation du travail suit une progression logique pour assurer une étude approfondie et structurée du sujet :

Phase 1 : Recherche et revue de la littérature (Semaines 1-4)

- Collecte et analyse des documents scientifiques et normatifs sur la corrosion du béton armé.
- Identification des mécanismes de corrosion, des facteurs influents et des méthodes de réparation.

Phase 2 : Étude de terrain et diagnostic (Semaines 5-8)

- Présentation du site d'étude et des structures concernées.
- Inspection visuelle et réalisation de tests non destructifs.
- Analyse des indices de corrosion et identification des zones critiques.

Phase 3 : Proposition de solutions et analyse économique (Semaines 9-12)

- Étude des techniques de réparation adaptées aux structures analysées.
- Évaluation des coûts et impact des différentes solutions.
- Élaboration d'un plan de maintenance préventif.

Phase 4 : Rédaction et finalisation du mémoire (Semaines 13-16)

- Rédaction des chapitres avec synthèse des résultats.
- Relecture et corrections.
- Préparation de la soutenance et finalisation des annexes.

Ce planning permet de structurer efficacement le travail et de garantir une progression fluide jusqu'à la soutenance.

Chapitre 1 : Généralités sur la corrosion du béton armé

I.1 : Définitions et mécanismes de la corrosion :

Introduction :

La corrosion, du latin ''corrodée' ' signifie ronger, attaquer .C'est une destruction non voulue des métaux sous l'action de milieux corrosifs (agents atmosphérique ou réactifs chimique). Après attaque, les métaux ont tendance à retourner à leur état primitif d'oxyde, sulfure, carbonate etc.... plus stable par rapport au milieu considéré et ainsi à subir une détérioration de leurs propriétés.

En service les matériaux métalliques sont souvent en contact avec un milieu agressif liquide ou gazeux, donc le phénomène de corrosion de surface ou plus précisément d'interface entre un métal et un milieu agressif liquide ou gazeux ; comme il a été déjà mentionné ci – dessus le processus de la corrosion entraîne une destruction des matériaux métalliques. Ce phénomène a pris de nos jours une importance considérable, étant donné l'utilisation de plus en plus grande des métaux et alliages dans la vie moderne.

Les métaux se distinguent des autres matériaux par un ensemble de propriétés avantageuses tels que bonne ductilité, résistance élevée à la traction, résistance aux hautes températures, bonne conductibilité électrique et thermique, grande facilité de mise en œuvre etc. Leurs inconvénients est leur instabilité au contact de l'air et de l'eau ce qui diminue leur résistance à la corrosion et à l'usure, c'est-à-dire leur durabilité. Mais pour mieux remplir leur fonction pendant la durée de vie prévue on emploie des techniques de protection adéquates contre la corrosion. L'emploi de nouveaux matériaux résistant à la corrosion ont fait l'objet d'un grand nombre de recherche ces dernières années.

Au point de vue économique la corrosion est d'une importance primordiale. On estime par exemple que chaque année le quart de la production d'acier est détruit par la corrosion, ce qui correspond environ à 150 millions de tonnes/ an ou encore 5 tonnes/ seconde. Ces pertes pouvaient être supérieures s'il n'y avait pas la protection contre la corrosion.

Le remplacement des équipements et matériel corrodés constitue pour l'industrie une charge financière très élevée à laquelle il faut ajouter le manque à gagner correspondant à l'arrêt des installations nécessaires pour effectuer les réparations.

Les couts annuels imputables à la corrosion et à ses conséquences s'élèvent à plusieurs milliards de dollars par un dans la plupart des pays industrialisés. Aux Etats-Unis, les pertes occasionnées par la corrosion sont évaluées à plus de 7 milliards de dollars.

La corrosion ne se limite pas à l'acier, mais affecte tous les métaux ainsi que les polymères et céramiques et elle touche tous les domaines de l'économie du circuit intégré au pont en béton armé. L'évaluation des pertes dues à la corrosion doit prendre en considération :

- Les pertes directes : remplacement des matériaux et équipement corrodés.
- Les pertes indirectes : réparation, pertes de production.
- Les mesures de protection : utilisation de matériaux plus résistants à la corrosion et plus chers, de revêtement et de protection cathodique.
- Les mesures de préventions surdimensionnement des structures porteuses inspection, entretien.

Les pertes directes ne représentent donc qu'une partie des coûts de la corrosion .Elles sont souvent inférieures aux pertes indirectes.

Par exemple, si l'on doit arrêter une machine ou un équipement dont l'un des éléments constituant est corrodé, le prix de ce dernier est dérisoire par rapport aux pertes de gain dues au manque de production.

L'emploi des matériaux plastiques ou composites dans les différentes branches d'industrie ont trouvés une grande importance chez les utilisateurs, car ces matériaux résistent bien à la corrosion et n'exigent aucun revêtement de protection.

I.1.1.1 : Les types de la corrosion :

Les causes de la corrosion sont multiples et complexes et elles résultent d'interactions chimiques et /ou physiques entre le matériau et son environnement. La corrosion jusqu'à ce jour n'est pas complètement éclairée et cela est expliqué par les essais de laboratoire qui ne permettent pas de prévoir avec certitude le comportement d'un métal ou d'un alliage donné lorsqu'il exposé à la corrosion et de mémé il n'y a pas de métal résistant, d'une manière générale un métal résiste à la corrosion dans des conditions bien déterminées. En général on peut résumer les différents types de la corrosion comme ci –dessous :

- Corrosion chimique (séchée).
- Corrosion électrochimique (humide).
- Corrosion biochimique.
- Corrosion accompagnée d'érosion (mécanique). - Corrosion atmosphérique.

-Corrosion chimique (séché) :

Il s'agit d'une réaction hétérogène entre une phase solide (le métal) et une phase gazeuse.

Le processus d'oxydoréduction de la corrosion chimique se déroule dans le domaine atomique avec le milieu ambiant sans présente d'électrolyte. Donc la corrosion purement chimique ne fait donc ne pas intervenir le passage d'un courant électrique, un flux électronique cesse, car l'échange d'électrons entre les différents partenaires de réactions s'effectue directement.

Ces il est très difficile de donner des exemples de corrosion purement chimique, puisque le plus souvent elle est accompagnée de corrosion électrochimique. On peut considérer comme corrosion chimique l'attaque d'un métal par un autre métal liquide (Hg), par un seul fondu ou par une solution aqueuse (Al dans CCl₄) l'exemple de la corrosion séché en atmosphère.

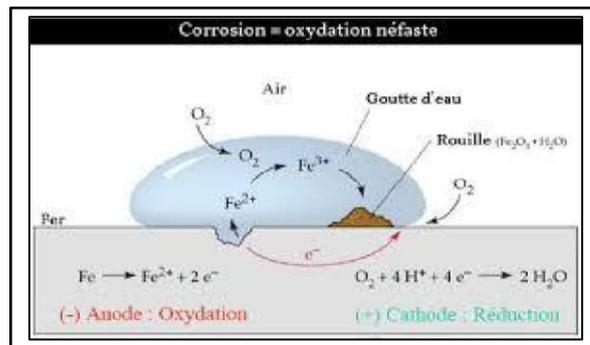


Figure.I. 1: Exemple de corrosion chimique

- Corrosion biochimique :

Les bactéries présentes dans le milieu, modifient l'environnement en produisant par exemple de l'acide sulfurique qui vient consommer le métal. Le mécanisme de ce mode de corrosion peut être de plusieurs types :

- Chimique par production de substances corrosives telles que CO₂.
- Certaines bactéries peuvent réduire les sulfates par l'intermédiaire d'hydrogène.
- Dans certains cas, on peut observer sur les canalisations des dépôts adhérents résultant de l'attaque, non pas du métal lui m m , mais celle de certains constituants du milieu ambiant par des bactéries. En résulte la formation de piqûres sur le métal, à l'endroit où s'est produit le dépôt, suivant un processus de corrosion par différence de concentration en oxygéné.

-Corrosion avec érosion, avec frottement et par cavitation

Dans ce cas les produits de corrosion forment un dépôt adhérent et continu à la surface de métal. Ils ralentissent en général la vitesse de la corrosion. Cette couche peut être éliminée en certains points par abrasion du métal due au mouvement du liquide lui-même ou bien à celui des particules solides qu'il contient, il y a accélération de la corrosion. Il en est de même lorsque deux pièces se déplacent l'une par rapport à l'autre (frottement).

La corrosion par cavitation est due à la présence de bulles de vapeurs qui se forment dans une canalisation, ou au voisinage d'une pièce tournante lorsque par suite de l'augmentation locale de la vitesse du liquide ou la pression statique devient inférieure à la tension de vapeur du liquide, il en résulte un violent martèlement de la surface métallique et une destruction locale du film de corrosion protecteur, la corrosion peut donc se développer à nouveau.

-Corrosion électrochimique :

C'est une réaction électrochimique entre la surface des armatures et un liquide électrolyte. C'est le phénomène de corrosion le plus important dans le béton armé.

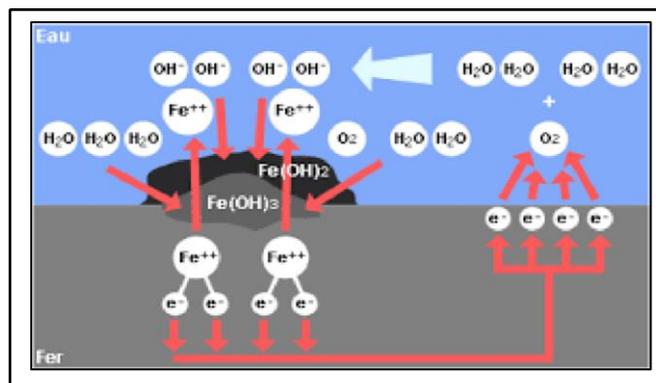


Figure.I. 2: Corrosion électrochimique

-La corrosion atmosphérique :

Elle désigne la réaction de l'oxygène de l'air à température ambiante avec un métal lorsqu'à la surface de ce dernier l'humidité et les polluants forment un film d'électrolyte (Bensaada, S, 2015).

-Amorçage et propagation de la corrosion :

La corrosion des armatures se manifeste par des éclats du béton d'enrobage, des épaufrures locales ou la présence de taches de rouille sur le parement. Elle engendre une perte de section de l'acier pouvant entraîner sa rupture fragile et une altération de la capacité portante de la structure. Les principales conséquences résident dans la perte de fonction de la structure en termes d'esthétisme

ou de sécurité pour les usagers. En règle générale, on considère que la corrosion ne s’amorce que lorsque les agents agressifs ont pénétré dans le béton d’enrobage sain et ont atteint les armatures. Les principales étapes du processus de corrosion des armatures sont donc :

La propagation des agents agressifs extérieurs tels que le gaz carbonique CO_2 ou les ions chlorure Cl^- . L’amorçage de la corrosion (dépassivation des armatures) ; la propagation de la corrosion conduisant à l’endommagement du béton d’enrobage (éclats, épaufrures, ruptures...). La dégradation du béton est progressive et s’accélère après la destruction de l’enrobage. Le diagramme de Tuutti illustre deux étapes de la corrosion (Tuutti, K, 1982).

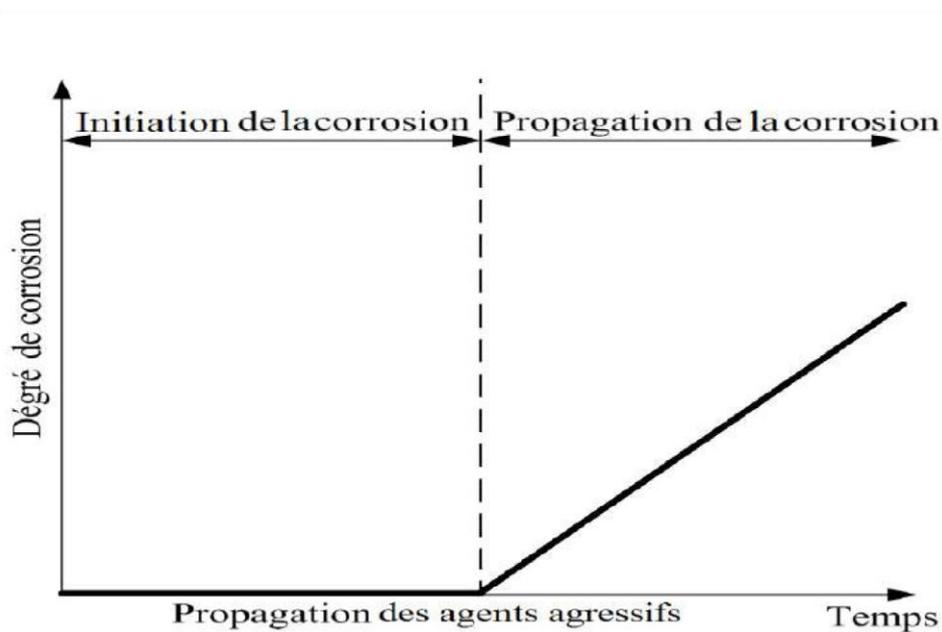
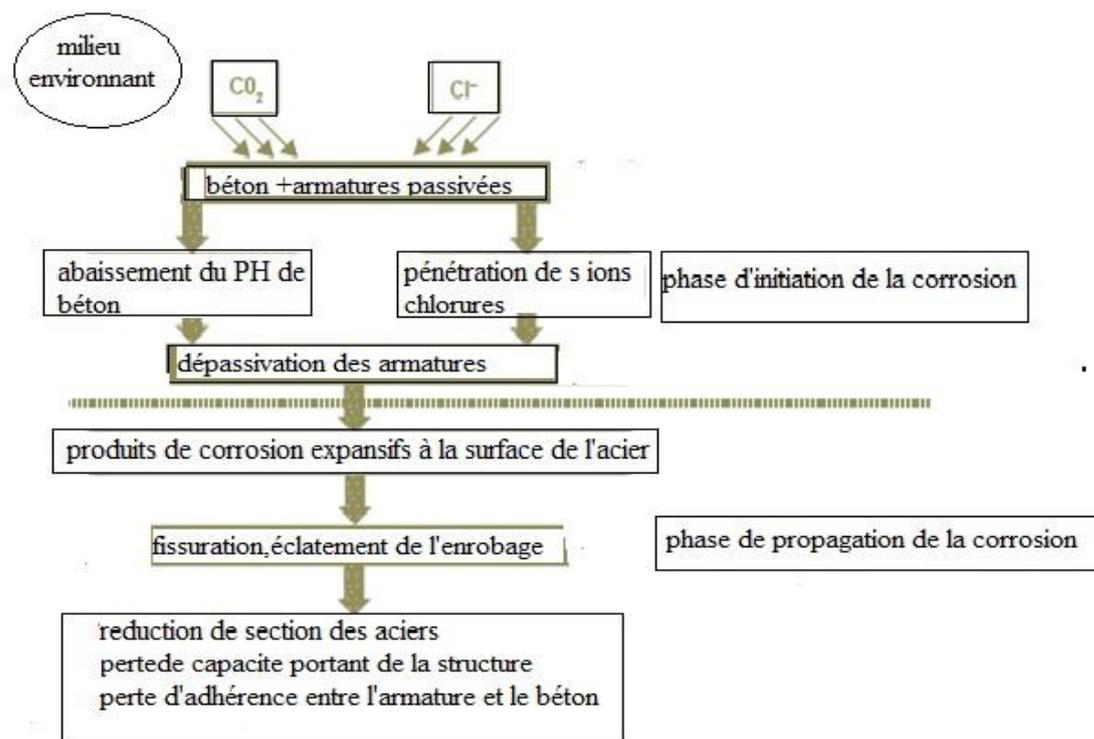


Figure.I. 3: Processus de corrosion des armatures du béton armé

(Modèle de Tuutti -tiré de Bertolini et col, 2004)



Shéma.I. 1: schéma de processus de corrosion (Tuutti, K, 1982)

I.1..12 : Processus de corrosion dans le béton armé :

La corrosion peut se développer suivant différents processus qui définissent chacun un type de corrosion.

La corrosion chimique est la conséquence d'une réaction hétérogène entre une phase solide et une phase liquide. Elle ne fait pas intervenir le passage d'un courant électrique. Il est très difficile d'en donner des exemples car elle est le plus souvent accompagnée de corrosion électrochimique.

La corrosion électrochimique se produit lorsqu'il existe des hétérogénéités, soit dans le métal, soit dans la solution corrosive. Ces hétérogénéités déterminent la formation à la surface du métal de micro-anodes et de micro-cathodes qui constituent des micropiles.

Un courant électrique circule entre les électrodes. Les zones appelées anodes sont attaquées et les zones appelées cathodes sont le siège d'une ou plusieurs réactions de réduction. Nous reviendrons plus loin sur ce type de corrosion dont l'importance est prédominante dans l'industrie laitière.

La corrosion bactérienne est l'attaque des métaux par les produits du métabolisme de certains micro-organismes. Ce type de corrosion n'a pas été, à notre connaissance, rencontré dans l'industrie laitière. On l'observe le plus souvent sur les canalisations enterrées et sur les ouvrages immergés en eau de mer.

Enfin, la corrosion avec érosion peut se produire lorsqu'une couche de produits de corrosion adhérente et continue à la surface du métal est détruite localement par abrasion consécutive au mou (Daufin, G., & Talbot, J, 1971).

I.1.13 : les étapes de corrosion :

Le processus de corrosion des armatures du béton s'effectue généralement en deux phases (figure 4)

- **1ère phase :** Au départ, l'acier est protégé par le film passif qui empêche la formation de rouille. Ensuite, durant la phase d'incubation, les agents agressifs pénètrent dans le béton et attaquent les armatures qui se dé passives progressivement. La période d'incubation correspond au temps requis pour que les aciers soient dé passivés sans qu'aucun dommage intérieur ni extérieur ne soit visible.
- **2ème phase :** C'est une période de propagation, ou les réactions d'oxydation à la surface du métal produisent des oxydes et hydroxydes. La formation de ces produits d'oxydation va causer un gonflement et apparaître des fissurations sur l'enrobage de béton et à long terme causé la destruction de la construction (Shamsad, A, 2003).

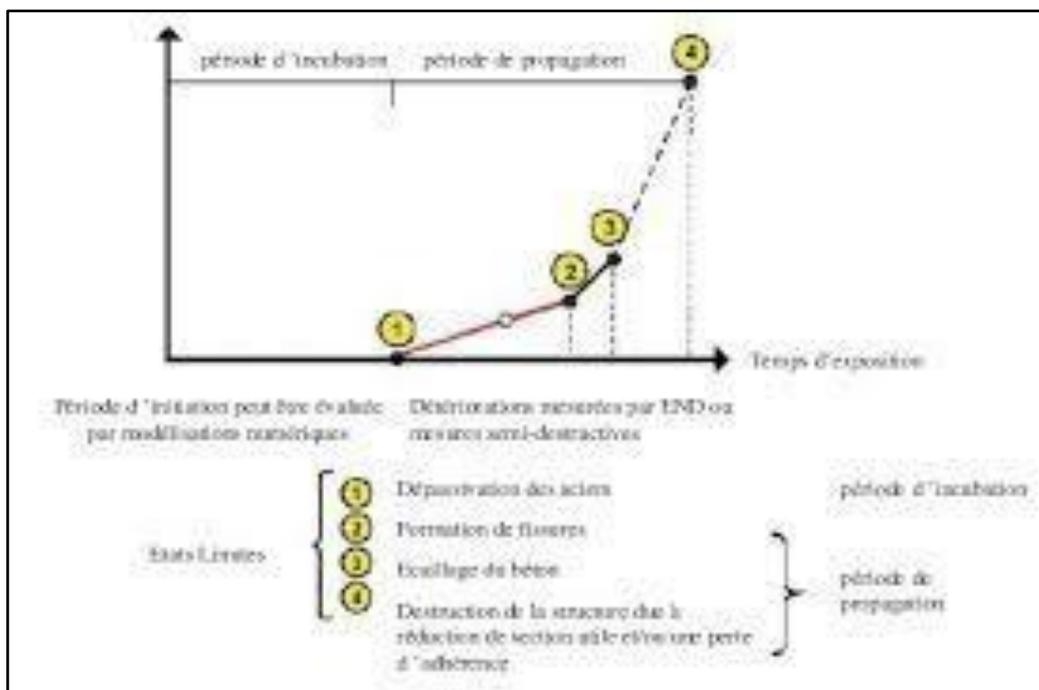


Figure.I. 4 : Etapes de l'évolution de la corrosion des armatures dans le béton

I.1.2 : Facteurs influençant la corrosion :

La tenue, face à la corrosion des armatures dans le béton est fonction des paramètres concernant l'acier et le béton ainsi que des propriétés existantes à leur interface. Cela est déterminé par la composition de la solution interstitielle du béton et des caractéristiques métallurgiques de l'acier. Les facteurs environnementaux (humidité, température, dioxyde de carbone, ions chlorure) ne peuvent affecter directement le processus de corrosion mais ils peuvent causer des dégradations du béton et accélérer l'entrée d'espèces agressives rendant la solution interstitielle en contact avec l'acier plus corrosive.

Lorsqu'ils atteignent les armatures, les ions chlorure et le dioxyde de carbone sont tenus pour responsables de la plupart des cas de corrosion des structures en béton armé. La température et l'humidité, tout comme les autres facteurs pouvant détériorer le béton, jouent aussi un rôle important dans la corrosion des armatures.

La corrosion de l'acier n'est donc pas dépendante d'un unique paramètre mais de plusieurs dont les interactions concourent ou non à la corrosion.

I.1.2.1 : Influence de la composition du béton :

Tout ce qui conditionne la solution interstitielle et la porosité du béton est un facteur pouvant affecter ou non la corrosion. Le type et la teneur en liant, les additions minérales et le rapport E/C (Eau/ciment) déterminent la performance d'un béton. Le choix de la formulation du béton et de la nature de ses principaux constituants constitue une approche pour augmenter la résistance à la corrosion du béton. Toutes modifications de la formulation d'un béton produisant une augmentation de sa compacité ou une réduction de sa perméabilité ont généralement un effet favorable sur la résistance à la corrosion.

Le rapport E/C a une très grande influence sur la porosité du béton : plus il est important, plus la porosité est grande, facilitant ainsi la pénétration des espèces agressives puis la corrosion de l'acier. L'influence du rapport E/C est bien plus importante que le type de liant utilisé.

Quant aux ajouts minéraux, en faibles quantités, ce sont les cendres volantes et les fumées de silice qui ont généralement une influence bénéfique puisqu'elles produisent une très nette diminution de la perméabilité, du coefficient de diffusion et de la conductivité du béton.

L'augmentation de la compacité provoquée par les ajouts minéraux, utilisés en quantité suffisante, peut de plus annuler largement les effets néfastes de la diminution du PH interne et de la moins grande quantité d'aluminate tricalcique (C_3A) qui découlent de l'utilisation de ces ajouts.

I.1.2.2 : Influence de l'humidité :

L'effet du taux d'humidité, ou degré de saturation en eau, dans le béton est important car la vitesse de corrosion dépend fortement de ce taux, celui-ci influençant directement la conductivité, la résistivité électrique et la diffusion de l'oxygène. L'influence de l'humidité l'a été déjà.

La corrosion des aciers, dans le cas des structures ou des parties de structures immergées, ne constitue généralement pas un problème majeur puisque l'oxygène ne parvient que très difficilement à atteindre les armatures.

I.1.2.3 : Influence de l'enrobage :

Parmi les origines de dégradations du béton, les facteurs chimiques sont les plus importants dans les altérations en volume de l'enrobage de béton.

Il ne se produit pas de corrosion lorsque l'atmosphère est très sèche (humidité relative > 40% : absence d'électrolyte).

Il n'y a pas de formation de rouille lorsque le béton est totalement immergé dans l'eau désaérée (manque d'oxygène).

L'humidité relative la plus favorable pour que la corrosion se produise est de 70% à 80%. Pour des valeurs plus élevées, la diffusion de l'oxygène est considérablement diminuée.

Mais l'épaisseur de l'enrobage en béton détermine le temps que vont mettre les espèces agressives pour arriver à l'armature. Parfois, la durée de vie d'une structure peut être fortement améliorée en augmentant l'épaisseur de l'enrobage, barrière mécanique freinant, voire stoppant la pénétration d'espèces participant à la corrosion des armatures. Le potentiel électrochimique qui est à la base de la formation d'une cellule de corrosion peut être généré de deux façons :



Figure.I. 5: Insuffisance d'enrobage

A) Dégradation mécanique de l'enrobage :

Lorsque la couche de rouille sur l'acier s'épaissit du fait de la corrosion métallique, une perte d'adhérence peut se produire parce que l'enrobage du béton s'est dégradé du point de vue mécanique.

D'une façon générale, les produits de corrosion ont une masse plus élevée que le métal qui leur donne naissance (Mehta, P.K., 1980). Si, de plus, ces produits sont poreux et rigides, comme c'est le cas de la rouille usuelle sur les armatures, ils sont plus volumineux que le métal et exercent une pression sur le béton d'enrobage.

Selon la géométrie (épaisseur d'enrobage, diamètre des armatures) et les caractéristiques mécaniques du béton, celui-ci peut soit se fissurer longitudinalement à l'aplomb de l'acier, soit se détacher (épaufrure), comme l'indique la Figure 3.

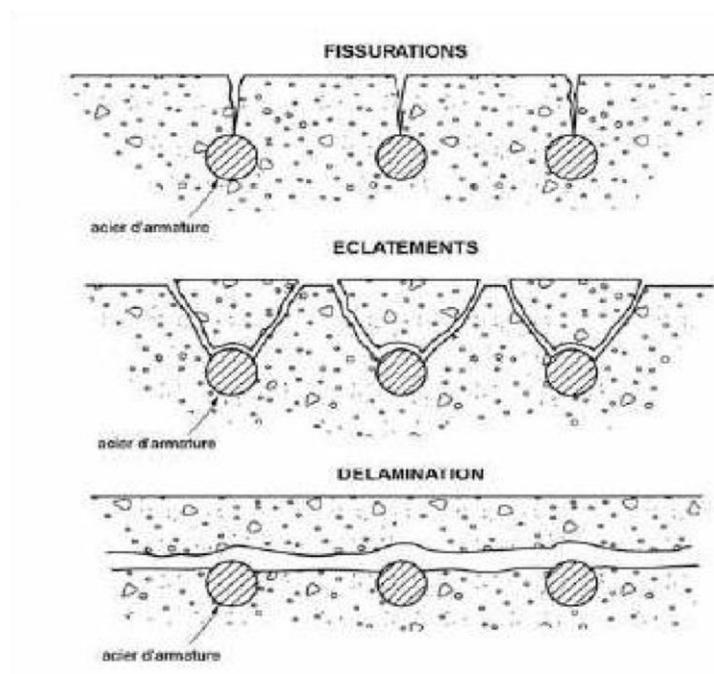


Figure.I. 6: types de fissures développées lors de la corrosion des aciers



b. Insuffisance de l'enrobage favorisant la corrosion

a. Insuffisance d'enrobage fissuration et le décollement des parements

Figure.I. 7: types de dégradations favorisées par l'insuffisance de l'enrobage.



Figure.I. 8: Décollement du parement du pilier et fissuration du chevêtre

I.2 : Les impacts de la corrosion sur des structures poteaux-poutres :

La corrosion des armatures en acier dans le béton armé peut entraîner des fissurations, des éclatements du béton, une réduction de la section des armatures et une diminution de l'adhérence entre l'acier et le béton, compromettant ainsi la durabilité et la sécurité des structures.

I.2.1 : Réduction de la capacité portante :

Elle peut entraîner une réduction significative de la capacité portante des structures. Voici les principaux mécanismes détaillés par lesquels la corrosion affecte cette capacité :

-Réduction de la section des armatures :

La corrosion consomme le métal des armatures, diminuant leur section efficace. Cette perte de matière réduit la capacité des armatures à supporter les charges, compromettant ainsi la résistance globale de la structure.

-Perte d'adhérence acier-béton : Les produits de corrosion, tels que les oxydes et hydroxydes de fer, occupent un volume supérieur à celui de l'acier initial. Cette expansion provoque des fissurations et des éclatements du béton environnant, diminuant l'adhérence entre l'acier et le béton. Une mauvaise adhérence entrave le transfert efficace des efforts entre ces deux matériaux, affectant négativement la capacité portante de la structure.

-Modification des propriétés mécaniques de l'acier : La corrosion peut altérer les propriétés mécaniques des armatures, notamment leur ductilité et leur résistance à la traction. Une diminution de ces propriétés essentielles peut entraîner une réduction de la capacité de la structure à absorber les charges et à redistribuer les efforts, augmentant ainsi le risque de défaillance.

-Formation de piqûres localisées : Dans certains cas, notamment en présence de chlorures, la corrosion peut se manifester sous forme de piqûres localisées sur les armatures. Ces attaques ponctuelles peuvent conduire à une rupture locale de l'armature, compromettant la capacité portante de la structure de manière imprévisible.

En somme, la corrosion des armatures en acier dans le béton armé affecte directement la capacité portante des structures en réduisant la section des armatures, en altérant l'adhérence acier-béton, en modifiant les propriétés mécaniques de l'acier et en provoquant des défaillances localisées. Ces effets combinés peuvent compromettre l'intégrité et la sécurité des structures en béton armé, nécessitant une attention particulière en matière de prévention et de maintenance (Houst, Y. F, 1989).

I.2.2 : Dégradation des performances structurales :

Définition :

La dégradation du béton est sa perte de performance elle se manifeste par détérioration, déformation ou changement de ces propriétés. La fissure constitue le signe d'une première manifestation apparente de dégradation possible, comme elle peut prendre l'aspect des éclats ou couleurs de rouille.

-Les phases de dégradation de béton armé par la corrosion :

La dégradation du béton armé comporte deux phases successives :

- Une phase d'incubation : elle correspond à la durée pendant laquelle les agents agressifs (dioxyde de carbone, chlorures) pénètrent dans l'enrobage du béton, sans corroder les armatures. Cette phase s'arrête lorsqu'au niveau de ces dernières, la teneur en agents agressifs atteint un certain seuil.
- Une phase de développement (dite parfois de croissance) des dégradations du matériau. La phase de développement est celle où les dégradations sont visibles. A ce stade les réparations deviennent lourdes et coûteuses.

- Les causes de dégradation :

Les bétons se dégradent à cause des milieux dans lesquels ils sont placés : agressions physiques et chimiques. Certaines autres causes, essentiellement dues à des événements extérieurs, peuvent également participer à la dégradation des bétons.

Bien que ces causes soient multiples, nous limiterons notre étude à la corrosion des armatures, phénomène préalable désastreux puisque la formation de rouille expansive fait passer le volume du métal oxydé de 1 à 7 et provoque l'éclatement du béton (Tache G. & Vie D, 1998).

I.3 : Présentation des normes et codes de réparation :

En Algérie, la réparation des structures en béton armé est encadrée par un ensemble de normes et de documents techniques visant à assurer la qualité et la sécurité des interventions. Voici une liste détaillée de ces normes :

1. Règles de Conception et de Calcul des Structures en Béton Armé (C.B.A 93) : Ces règles spécifient les principes et méthodes pour la conception et le calcul des structures en béton armé, s'appliquant notamment aux bâtiments courants (CUM, 2025).

2. Normes Algériennes (NA) relatives aux matériaux et aux produits pour la réparation du béton : Ces normes couvrent divers aspects des matériaux utilisés pour la réparation, tels que :

- **NA 5034** : Produits spéciaux destinés aux réparations, incluant collage, injections, scellement.
- **NA 5050** : Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique, notamment pour les réparations de surface.
- **NA 5051** : Produits à base de résines synthétiques pour les réparations de surface du béton. Ces normes sont détaillées dans le recueil disponible ici.

3. Normes Européennes (EN) adoptées en Algérie : Plusieurs normes européennes ont été adoptées pour encadrer les méthodes de réparation, telles que :

- **EN 1504-1** : Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité des produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton.
- **EN 1504-2** : Systèmes de protection de surface pour le béton.
- **EN 1504-5** : Produits et systèmes d'injection du béton.
- **EN 1504-6** : Ancrage de barres d'acier d'armature.

4. Règles Techniques de Construction (RETEC) : Ces documents couvrent toutes les phases du processus de construction, y compris la réparation des structures en béton. Ils constituent des référentiels techniques essentiels pour les professionnels du secteur.

5. Règlement Parasismique Algérien (RPA) : Bien que principalement axé sur la conception parasismique, le RPA fournit des indications sur les méthodes de réparation des structures en béton armé après un séisme.

Pour une consultation exhaustive et à jour de l'ensemble des normes applicables, il est recommandé de se référer au **Recueil des Normes Algériennes** disponible auprès de l'Institut Algérien de Normalisation (IANOR).

Conclusion

La corrosion des armatures en acier dans les structures en béton armé constitue un problème majeur affectant la durabilité, la sécurité et la performance des ouvrages. Ce phénomène complexe résulte d'interactions physico-chimiques multiples entre le métal, le béton et l'environnement

ambiant, et se manifeste principalement sous forme de corrosion électrochimique, bien que d'autres types tels que la corrosion chimique, biochimique ou associée à l'érosion soient également présents dans certains contextes spécifiques.

L'évolution de la corrosion se déroule en deux phases distinctes : une phase d'incubation durant laquelle les agents agressifs pénètrent le béton sans dommage visible, suivie d'une phase de propagation caractérisée par la formation de produits d'oxydation provoquant fissures, éclatements et perte d'adhérence entre acier et béton. Ces dégradations entraînent une réduction significative de la section efficace des armatures, une altération des propriétés mécaniques de l'acier, ainsi qu'une diminution de la capacité portante et de la sécurité des structures.

Les facteurs influençant la corrosion sont multiples, incluant la composition du béton, son taux d'humidité, l'épaisseur de l'enrobage ainsi que les conditions environnementales telles que la présence de chlorures ou de dioxyde de carbone. Une bonne formulation du béton, un enrobage suffisant et une maîtrise des conditions d'exposition restent essentiels pour limiter la pénétration des agents agressifs et retarder l'amorçage de la corrosion.

Compte tenu de l'impact sévère de la corrosion sur la pérennité des ouvrages, il est primordial d'intégrer des stratégies de prévention, de diagnostic précoce et d'entretien adapté afin d'assurer la sécurité et la longévité des infrastructures en béton armé.

**Chapitre 2 : Diagnostic de la corrosion au
Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf**

Introduction :

Les structures en béton armé constituent l'ossature principale de la majorité des constructions modernes, notamment dans les infrastructures universitaires. Toutefois, au fil du temps, ces ouvrages sont exposés à divers agents de dégradation, tels que les cycles thermiques, l'humidité, la carbonatation et surtout la corrosion des armatures, mettant en péril leur performance structurelle et leur durabilité.

Dans ce contexte, la présente étude s'inscrit dans le cadre d'un projet de diagnostic et de réhabilitation d'une poutre en béton armé située au Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf de Mila (Algérie). L'objectif est de caractériser l'état de dégradation de la poutre concernée, d'en identifier les causes principales, et de proposer une intervention de réparation adaptée, en conformité avec les normes techniques en vigueur.

La démarche adoptée repose sur une approche intégrée, combinant des méthodes d'inspection visuelle, des essais non destructifs et l'analyse des matériaux. Ces investigations ont permis de concevoir une stratégie de réhabilitation visant à restaurer l'intégrité structurelle de la poutre, tout en prolongeant sa durée de vie utile.

II. Présentation du site d'étude :

A propos le centre universitaire Abdelhafid Boussouf – Mila :

Le Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf de Mila est situé dans le nord-est de l'Algérie, à environ 5 kilomètres à l'ouest du centre-ville de Mila, le chef-lieu de la wilaya éponyme. Il se trouve le long de la Route Nationale 79 (RN 79), en direction de Zeghaïa.

Environnement local :

Le campus s'étend sur une superficie d'environ 87 hectares, offrant un cadre spacieux et verdoyant propice aux études et à la recherche.



Photo II. 1 : Localisation de C.U.Mila

II.1. Localisation et importance stratégique :

La wilaya de Mila, située dans le nord-est de l'Algérie, présente une importance stratégique notable tant sur les plans géographique, économique qu'historique.

II.1.1. Localisation :

Mila est délimitée par les wilayas de Jijel au Nord, Skikda au nord-est, Constantine à l'Est, Oum El Bouaghi au Sud-Est, Batna au sud, et Sétif à l'Ouest. Elle s'étend sur une superficie de 3 407 km², représentant environ 0,13 % de la superficie totale de l'Algérie.

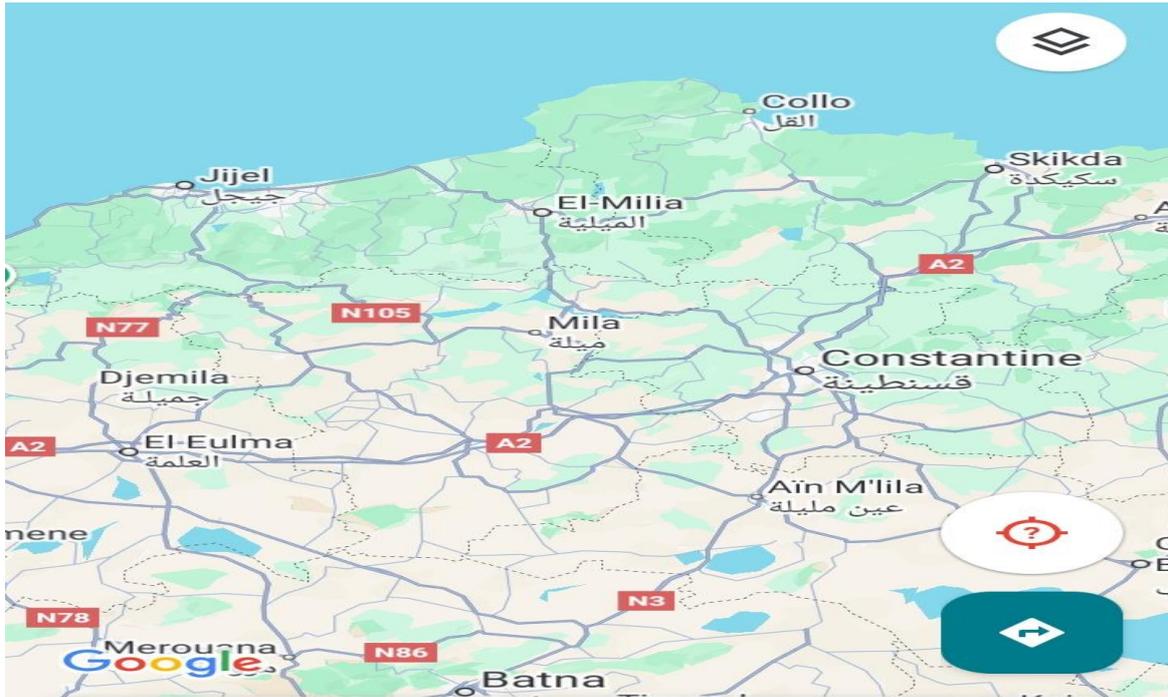


Photo II. 2 : Localisation stratégique de la wilaya de Mila

II.1.2. Importance stratégique :

- Position géographique centrale :

Mila occupe une position de centralité au sein de l'armature territoriale régionale. Cette situation lui confère un rôle de pôle d'attraction pour les établissements et les infrastructures, favorisant ainsi son développement urbain et économique (R. BOUKELOUHA, 2014).

- Ressources hydriques majeures :

La wilaya abrite le barrage de Beni Haroun, le plus grand d'Algérie, avec une capacité de 960 millions de m³. Ce barrage alimente en eau potable plusieurs wilayas voisines, dont Jijel, Constantine, Oum El Bouaghi, Batna et Khenchela, et fournit également de l'eau pour l'irrigation agricole (La Sentinelle, 2025).

-Patrimoine historique : La ville de Mila, connue dans l'Antiquité sous le nom de Milevum, était l'une des quatre bases militaires assurant la protection de Cirta (actuelle Constantine), capitale du royaume numide. Ce passé confère à la ville une richesse patrimoniale significative.

-Potentiel touristique :

La diversité géographique de la wilaya, combinée à des projets tels que la création d'une plage artificielle sur le barrage de Beni Haroun, positionne Mila comme une destination touristique émergente en Algérie (La Sentinelle, 2025).

II.2.1. Inspection visuelle :

La Photo II. 3, montre une structure en béton gravement détériorée, il s'agit d'une poutre sélectionnée dans un bloc de bâtiment au sein du centre Universitaire Abdelhafid Boussouf, Mila. Une large portion de béton s'est désagrégée, exposant les armatures internes qui apparaissent fortement corrodées. Cette corrosion avancée indique que les aciers ont perdu une partie significative de leur section utile, ce qui compromet sérieusement la résistance mécanique de l'ensemble. On observe également des fissures et des marques d'humidité, signes possibles d'infiltrations ayant accéléré le processus de dégradation par la carbonatation ou la pénétration de chlorures. L'état actuel du béton laisse supposer un risque élevé d'effondrement localisé, notamment en cas de surcharge ou de vibrations.

L'utilisation d'un support métallique (visible à gauche de l'image) ne constitue pas une solution de renforcement pérenne. En l'état, il est fortement recommandé d'évacuer immédiatement toute zone située sous cette structure et de solliciter sans délai l'avis d'un ingénieur en structure ou d'un expert en pathologie du bâtiment. Une réhabilitation en profondeur sera nécessaire.



Photo II.3: Dégradation avancée du béton armé

II.2.2. Tests et analyses non destructives :

Voilà ces photos, montrent un technicien utilisant un appareil de diagnostic non destructif, typiquement employé pour l'évaluation de structures en béton armé. L'instrument en question est un **analyseur à ultrasons**, couramment utilisé pour détecter l'emplacement des armatures, mesurer l'enrobage du béton, ou encore évaluer la propagation d'ondes ultrasoniques dans le matériau. Ce type d'équipement est essentiel dans les campagnes de diagnostic structurel, car il permet d'**obtenir des données fiables sans endommager la structure** analysée. Il s'intègre dans une démarche préventive ou curative, visant à identifier les pathologies du béton (corrosion, fissures internes, défauts d'enrobage) et à planifier les interventions nécessaires. La présence de cet appareil témoigne d'un **contrôle technique rigoureux**, souvent requis dans le cadre d'expertises, de réhabilitations ou d'audits de sécurité.



Photo II. 4 : La machine ultrason



Photo II. 5: Équipement de mesure non destructive pour diagnostic de structure

II.2.3.Évaluation des indices de corrosion (carbone, chlorures, etc.) :

-Introduction :

Dans le cadre de l'évaluation de la qualité du béton de cette poutre, une série d'observations visuelles et de mesures ultrasonores a été effectuée sur site. Ce diagnostic a été motivé par des signes apparents de défauts structurels, notamment une possible ségrégation du béton et un manque d'enrobage des armatures.

L'objectif de cette étude est de caractériser l'état du béton à travers des données quantitatives (temps de passage des ondes, vitesse de propagation) et qualitatives (inspection visuelle) afin de statuer sur sa conformité aux normes de résistance mécanique.

-Les tests :

Date : 14 avril 2025 à 11h

1. Observations générales :

- Présence de ségrégation du béton.
- Absence d'enrobage.

2. Mesures et Calculs :

a. Calcul du coefficient z :

-Données :

- Distance : 30 cm
- Temps de passage :
 - 173,4 μ s (direct)
 - 107.6 μ s (indirect)

b. Schéma de propagation des ondes ultrasonores :

Contexte :

On utilise un essai par ultrasons pour évaluer la qualité du béton à l'aide de deux types de mesures :

- **Mesure directe** : les sondes sont placées en face l'une de l'autre.

- **Mesure indirecte** : les sondes sont placées sur la même face de l'élément.

Paramètres mesurés :

- **Distance directe** : 30 cm = 0,30 m
- **Temps direct** : 173,4 μs = $173,4 \times 10^{-6}$ s
- **Vitesse directe** :

$$V_d = \frac{30}{173.4} = 0.173010 * 10000 = 1730.10$$

Distance indirecte : 18.03 cm = 0.1803 m

- **Temps indirect** : 107,6 μs = $107,6 \times 10^{-6}$ s
- **Vitesse indirecte** :

$$V_i = \frac{18.03}{107.6} = 0.167565 * 10000 = 1675.65$$

Nous allons comparer les résultats avec les normes :

Le béton ordinaire ≥ 3000

Donc ces résultats (1730.10 et 1675.65) prouvent que le béton utilisé dans cette structure est de mauvaise qualité

Interprétation géométrique (triangle) :

Le triangle représente la **propagation des ondes** :

- Un côté : distance entre les deux capteurs (30 cm).
- Les autres côtés et angles : déviation des ondes dans un béton non homogène.

Analyse :

- L'onde **directe** traverse en ligne droite \rightarrow temps plus long.
- L'onde **indirecte** longe la surface \rightarrow temps plus court (moins d'obstacles internes).

II.3.Résultats et interprétation :

II.3.1: L'interprétation :

La réparation superficielle de la corrosion du béton implique généralement de nettoyer la surface affectée, d'enlever le béton corrodé, de traiter les armatures, et de reconstituer la surface avec un mortier de réparation ou un béton spécial.

Nous étions en train d'étudier une partie détériorée d'une poutre, en partant de l'hypothèse que la dégradation était avancée ou profonde. Cependant, après inspection de cette zone et retrait du béton endommagé, il s'est avéré que la détérioration était en réalité **superficielle** et non avancée.

Ainsi, nous avons décidé d'appliquer un **traitement de surface**. En se référant aux résultats précédemment obtenus concernant la qualité du béton : Le béton ordinaire ≥ 3000

Donc ces résultats (1730.10 et 1675.65) prouvent que le béton utilisé dans cette structure est de mauvaise qualité

Il apparaît que **la mauvaise qualité du béton utilisé a largement contribué à l'aggravation de l'état de dégradation.**

II.3.2 : Objectif de l'intervention :

Réaliser des travaux de réparation sur une partie détériorée d'un support en béton suite à un phénomène d'érosion, afin de restaurer sa fonctionnalité structurelle et garantir sa durabilité.

2. Matériaux utilisés :

Phase 1 :

- Ciment
- Sable grossier
- Additif liant (type Sika)
- L'eau

Phase 2 :

- Ciment
- Sable marin

- L'eau

3. Étapes de réalisation :

Phase 1 : Remplissage des vides et traitement de l'érosion :

- Préparation d'un mélange composé de ciment, de sable grossier et de l'additif *Sika*.
- Application du mélange dans les zones creusées ou érodées du support.
- Séchage partiel de la première couche afin d'assurer une bonne adhérence avant la seconde phase.

Phase 2 : Finition et humidification de la surface :

- Préparation d'un second mélange à base de ciment et de sable marin.
- Application de cette couche de finition sur la première pour lisser la surface et compléter la réparation.
- Cette étape vise à améliorer l'aspect final et à assurer une protection supplémentaire de la zone réparée.

II.3.2. Les résultats :

Nous avons suivie plusieurs étapes de réparation pour réparer les parties endommagées de cette poutre et afin d'obtenir des résultats efficaces qui seront illustrés en aval à savoir :

Étape 1 : Préparation de la surface :

- **Inspection et diagnostic :** Identifier les zones corrodées et les causes de la corrosion.

-**Nettoyage :** Retirer les éclats de béton et la rouille avec une brosse métallique.

-**Dépose du béton dégradé :** Enlever le béton fissuré et dégradé sur une profondeur de 20 à 30 mm derrière les barres d'armature.

-**Dépoussiérage :** Assurer une bonne adhérence du mortier de réparation.

Cette photo représente la zone critique qui a été affectée par la corrosion avant la réparation :



Photo II. 6: la zone critiquée par la corrosion

-Ces images illustrent le processus de réparation de la partie endommagée de la poutre :

Étape 2 : Traitement des armatures :

- **Traitement des armatures rouillées :**

Nous avons constaté que la rouille n'a pas endommagé les armatures, donc nous avons juste effectué un brossage par brosse métallique pour nettoyer la surface des armatures.

Étape 3 : Reconstitution et finition :

- **Application du Mortier de réparation :** nous avons utilisé un mortier de réparation adapté, pour combler les zones dégradées.

-

- Ces images illustrent le processus de réparation de la partie endommagée de la poutre :



Photo II. 7 : préparation de mélange



Photo II. 8 : Au cours du processus de réparation



Photo II. 9: Lisser le mortier pour obtenir une finition uniforme.



Photo II. 10 : Laisser sécher le mortier avant de procéder à la finition et appliquer une protection contre la corrosion si nécessaire.

Ces deux photos représentent l'étape finale de notre processus de réparation qui montre la zone réparée après finition.



Photo II. 11 : L'état final de la partie qui a été réparée

Conclusion :

L'étude menée sur la structure en béton armé du centre universitaire Abdelhafid Boussouf de Mila a permis de révéler des pathologies structurelles significatives, traduites par une détérioration avancée du béton et une corrosion absente des armatures. Ce constat alarmant met en lumière les conséquences directes d'une qualité insuffisante des matériaux utilisés, comme en témoignent les résultats obtenus lors des essais par ultrasons, bien en deçà des normes admises pour un béton de construction.

Au-delà du simple diagnostic, cette intervention s'inscrit dans une démarche globale visant à préserver la sécurité des usagers tout en prolongeant la durée de vie de l'ouvrage. L'usage d'outils non destructifs, conjugué à une observation attentive du comportement des matériaux, a permis une évaluation précise de l'état de dégradation, évitant ainsi des réparations excessives ou inadaptées. En choisissant une méthode de réhabilitation en deux phases – traitement des armatures et reconstitution de la surface – les intervenants ont su conjuguer rigueur technique et pragmatisme, dans un contexte où les ressources doivent être optimisées.

Cette expérience souligne également l'importance d'une gestion préventive et continue du patrimoine bâti. Trop souvent, les signes de fatigue des matériaux sont ignorés ou traités de manière superficielle, jusqu'à ce que les risques deviennent inacceptables. Or, la durabilité des structures ne repose pas uniquement sur la robustesse initiale, mais aussi sur la capacité à anticiper, diagnostiquer et corriger les défauts au bon moment.

Enfin, ce cas d'étude rappelle que chaque intervention technique, aussi ponctuelle soit-elle, a des implications à long terme, qu'il s'agisse de sécurité, d'économie, ou même de valorisation du bâti existant. Il devient alors essentiel d'ancrer ce type d'action dans une culture d'entretien régulier et de sensibilisation aux enjeux de la qualité des matériaux. À travers cette réparation réussie, c'est une approche globale de la durabilité qui se dessine, fondée sur l'expertise, l'observation et le respect des normes, au service d'un avenir bâti plus sûr et plus résilient.

Chapitre 3 : Méthodes de réparation et d'entretien

Introduction :

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

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

La réparation de la corrosion dépend du matériau concerné et de l'ampleur des dégâts. La première étape consiste à évaluer les dommages en identifiant la cause de la corrosion, qu'il s'agisse de l'humidité, des produits chimiques ou du sel, et à déterminer si l'atteinte est superficielle ou profonde. Ensuite, la préparation de la surface est essentielle pour assurer une réparation efficace. Cela implique un nettoyage mécanique à l'aide d'une brosse métallique ou de papier de verre, un décapage chimique avec un convertisseur de rouille comme l'acide phosphorique, ainsi qu'un dégraissage à l'aide d'un solvant adapté. Une fois la surface préparée, les réparations peuvent être effectuées en fonction du type de dommage. Pour les métaux perforés, l'application d'un mastic métallique époxy ou la soudure d'une plaque de renfort permet de restaurer la structure. En cas de détérioration superficielle, l'application d'un apprêt anticorrosion suivi d'une peinture adaptée protège le métal contre de nouvelles attaques. Lorsque la corrosion touche le béton armé, il est nécessaire d'enlever les parties abîmées, de traiter les barres d'armature avec un inhibiteur de corrosion et de reboucher avec un mortier de réparation.

Enfin, pour éviter la réapparition de la corrosion, diverses mesures préventives peuvent être mises en place, comme l'application d'un revêtement protecteur (peinture, vernis, galvanisation), l'utilisation de matériaux résistants à la corrosion (alliages spéciaux, acier inoxydable) et l'installation d'une protection cathodique par anodes sacrificielles ou courant imposé. Une bonne gestion de l'environnement, notamment en limitant l'exposition aux agents corrosifs grâce à une meilleure ventilation et un bon drainage, contribue également à prolonger la durée de vie des structures et des équipements.

III.1 : Méthode de réparation :

Définition :

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

III.1.1 : Méthodes physiques :

Réparation des ouvrages en béton armé :

Suite à un propre diagnostic, les procédés de réparation d'un ouvrage ne viennent pas seulement ramener les sections d'origine de l'acier et du béton, mais aussi rétablir les caractéristiques mécaniques des différents éléments concernés. C'est-à-dire remettre la possibilité à la structure de reprendre au mieux les efforts qui lui sont appliqués.

Réparation des surfaces :

Dégagement des armatures :

La préparation des surfaces à réparer est très importante pour la longueur de vie des réparations. Il convient dans un premier temps de dégager toutes les zones de faible cohésion. S'il y a corrosion des armatures, il est important de dégager les aciers corrodés pour arriver à une zone saine ; plusieurs techniques sont valables pour vérifier qu'on atteint des zones sous corrosion (burinage, repiquage, bouchardage, jet d'eau, sablage).

Pour être sûr d'une bonne réparation, il est d'usage d'obtenir un dégagement comme le montre le schéma suivant selon AFNOR :

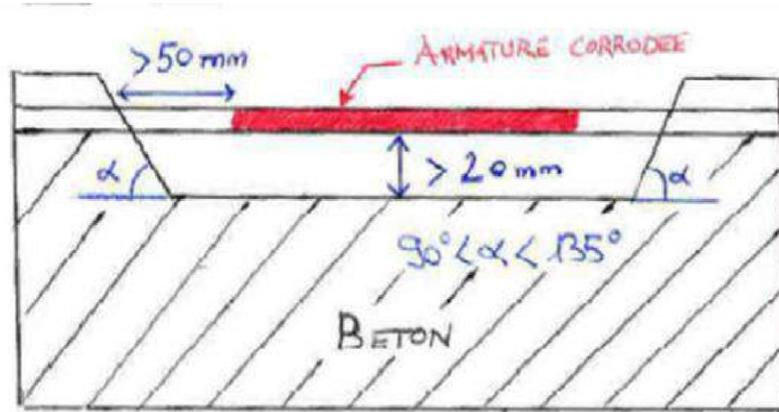


Figure.III.1: Dégagement des armatures selon la norme NF P 95.101

Il faut ensuite nettoyer la surface du béton afin d'enlever toute trace de poussière et souillure. Si la perte de section de l'acier est très élevée, il est alors nécessaire de remplacer l'armature ; par scellement ou soudure.

Il est important qu'après cette opération, de respecter la section d'armatures (au moins égale à la section initiale), les longueurs d'ancrage et de recouvrement, et les armatures de couture.

Pour limiter les risques d'apparition de la corrosion, une protection immédiate des armatures, par un produit convenablement choisi, est nécessaire surtout si l'enrobage final ne pourra pas être de la même valeur prévue dans les règlements. Il est possible, après cette étape, de commencer la réparation (FABEM 7, 2011).

Armatures passives additionnelles Cas d'utilisation :

Ajout d'armatures de béton armé :

Changement d'affectation (mise en place d'équipements augmentant les charges permanentes), renforcement de la structure (précontrainte additionnelle nécessitant l'augmentation de la section en béton armé).

Armatures passives additionnelles Etudes préliminaires :

- Caractéristiques et état des armatures de béton armé (HA ou lisse, diamètre, limite d'élasticité et contrainte de rupture, soudabilité, importance de la corrosion...)
- Caractéristiques et état du béton (composition, résistance, défauts, désordres...)
- Types d'actions subies par la structure (statiques et dynamiques)

- Capacité portante de la structure ;
- Agressivité de l'environnement ;
- Exigences du Maître d'Ouvrage (maintien du gabarit par exemple) (FABEM 7, 2011).

Mortier ou béton :

Caractéristiques du béton ou mortier de ré-enrobage des armatures remplacées doivent être compatibles avec les caractéristiques du béton existant et l'agressivité de l'environnement de l'ouvrage.

Principe de remplacement d'un ferrailage endommagé par un choc au niveau du talon d'une poutre en BA : enlèvement du béton endommagé, dégagement des armatures transversales et longitudinales endommagées puis mis en place du ferrailage de remplacement.

Le ragréage :

Le ragréage est une méthode de réparation locale, qui consiste à rétablir manuellement l'enrobage des armatures à l'aide d'un mortier de réparation possédant des propriétés qu'on verra plus loin.

Afin de limiter la réapparition de corrosion dans les zones réparées on choisit de mélanger des inhibiteurs de corrosion dans la formulation de ce mortier (FABEM 1, 2021).

Préparation de surface :

L'objectif de la préparation de surface :

Créer un support sain, propre, rugueux afin d'assurer une bonne adhérence sur la surface de reprise :

- enlever les parties de béton non adhérentes,
- enlever le béton contaminé par les chlorures ou la carbonatation,
- Si les armatures doivent être complètement dégagées, prévoir de 1 à 2 cm (détourage des aciers),
- Bords de la zone dégagée francs et taillés, (angle compris entre 90 et 135), pour assurer une bonne liaison mécanique entre le matériau d'origine et celui d'apport (FABEM 1, 2021).

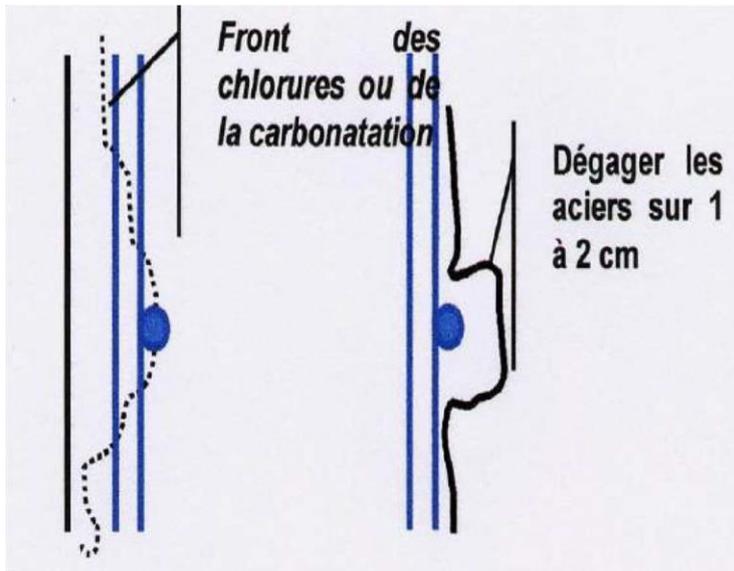


Figure.III.2: Enlèvement du béton pollué et de la rouille

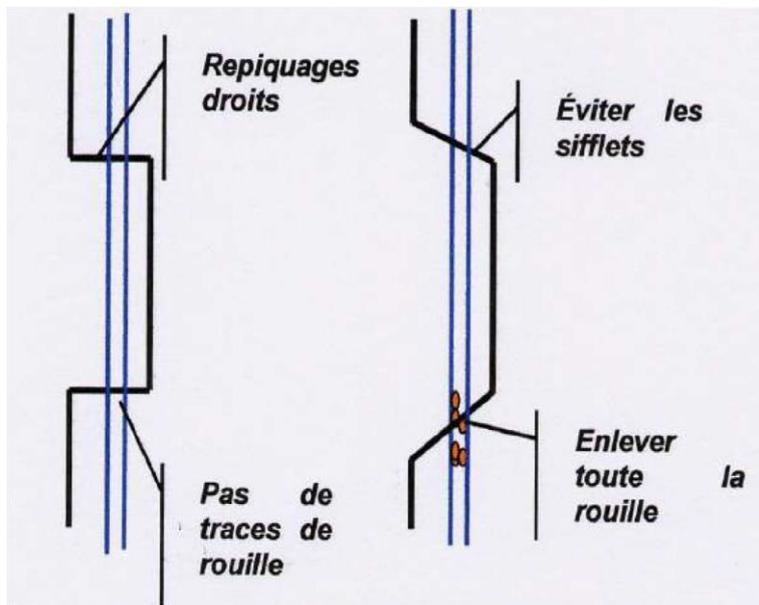


Figure.III.3: Enlèvement toute rouille

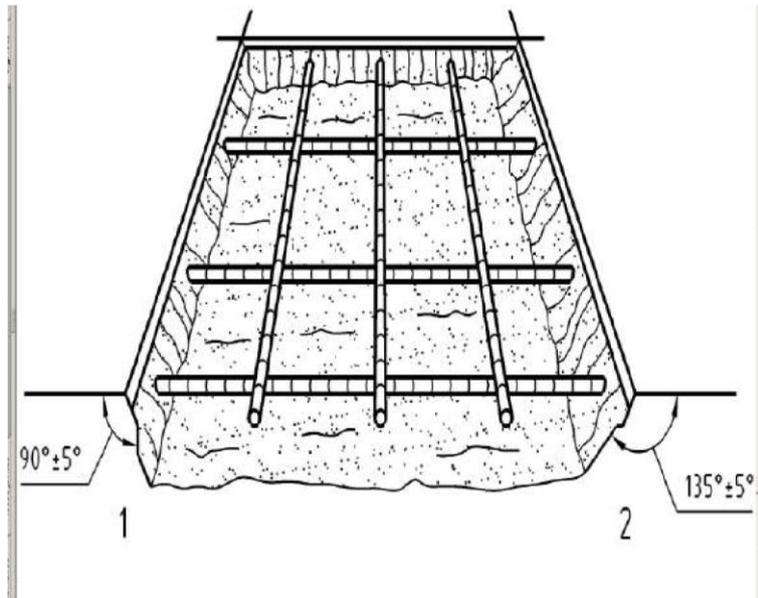


Figure.III.4 : Enlèvement du béton dégradé

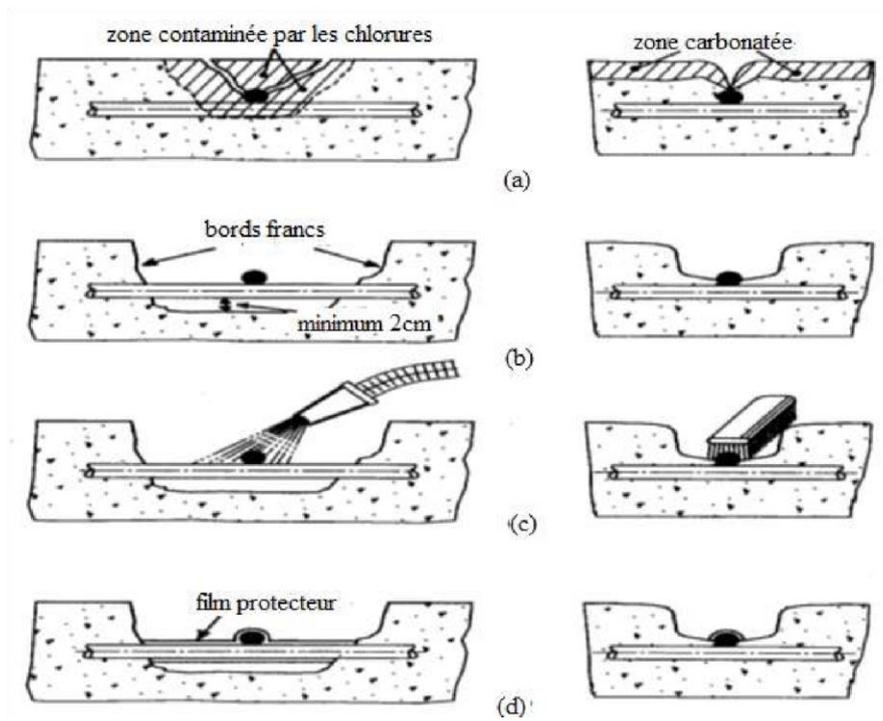


Figure.III.5 : Les étapes de préparation de surface

Nettoyage de la surface :

- Lavage à l'eau sous pression,

- Brossage, aspiration, soufflage...
- Selon compatibilité avec le produit de réparation (FABEM 1, 2021).

Protection des aciers :

- Décapage des aciers,
- Revêtement anticorrosion (passivant), sans déborder sur le béton, si mortier ou béton ne peut être mis en œuvre immédiatement et/ou en épaisseur suffisante,
- Barbotine à base de liants hydrauliques (mettre en œuvre le mortier ou béton de recouvrement avant prise de la barbotine).

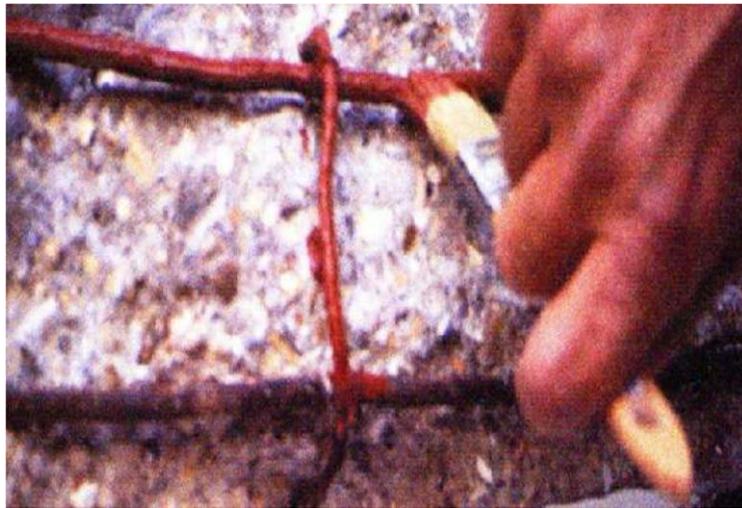


Figure.III.6: Mise en place d'un passivant si nécessaire

Protection par méthodes électrochimiques :

Cette partie présente les principales techniques électrochimiques utilisées pour réduire la corrosion dans les structures de béton armé : Protection cathodique(PC), Déchloration (DC), Ré-alkalinisation (RA).

Toutes les méthodes de maintenance électrochimiques ont en générale le même principe et méthode d'application pratique. Les principales différences sont la quantité de courant circulant à travers le béton et la durée du traitement.

Par l'intermédiaire d'un conducteur externe, dite anode ; un courant continu est dirigé à travers le béton de l'armature qui est ainsi amenée à agir en tant que cathode dans une cellule électrochimique. Le résultat final de la circulation du courant est d'arrêter la corrosion par re-

passivation des armatures par polarisation de l'armature à un potentiel plus négatif (PC), ou en enlevant les ions agressifs (DC), ou en rétablissant l'alcalinité de la solution interstitielle (RA).

Protection cathodique :

La protection cathodique est basée sur le changement du potentiel de l'acier à des valeurs plus négatives, pour que le métal agit comme cathode et ainsi de réduire le courant de corrosion à des valeurs négligeables.

Le principe de la protection cathodique consiste à polariser l'armature dans le béton, à l'aide d'une anode placée de façon permanente sur le parement ou parfois dans l'enrobage. Le courant de polarisation, qui circule de l'anode vers l'armature, se situe entre 2 et 50 mA par mètre-carré de surface d'armature (P. Pedefferri, 1996). Il existe deux techniques de protection cathodique :

- La protection Cathodique par Courant Imposé (PCCI) utilise un générateur de courant continu branché entre l'ouvrage à protéger (cathode) et une ou des anodes auxiliaires (appelées déversoirs de courant) utilisant tout matériau conducteur d'électricité (de préférence inattaquable).

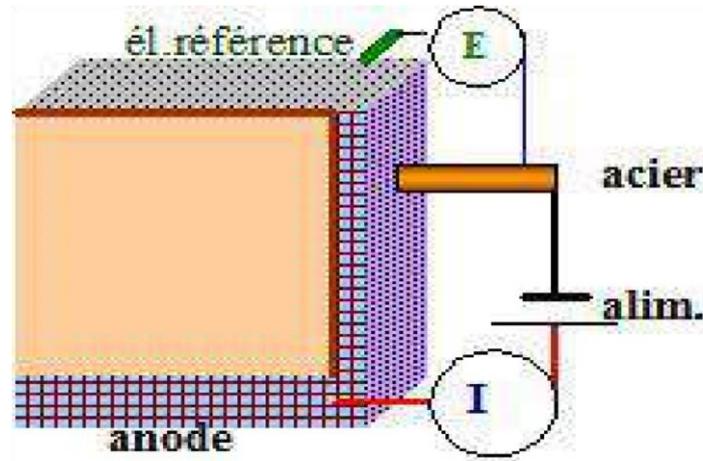


Figure.III.7: Traitement électrochimique sous « courant imposé »

(L'anode est dans un mortier ou une pâte.)

- La protection Cathodique par Courant Galvanique (PCCG) utilise un couplage galvanique entre l'ouvrage à protéger et une ou des anodes sacrificielles constituées d'un métal ou alliage moins noble que le métal que l'on veut protéger.

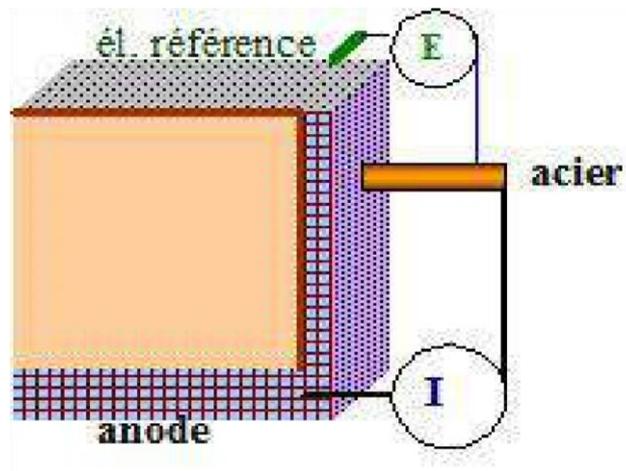


Figure.III.8: Traitement électrochimique avec une anode " galvanique ".

L'anode est fixée à la surface du béton ou insérée dans celui-ci.



Figure.III.9: Mise en place du treillis anodique



Figure.III.10 : Application d'un potentiel électrique

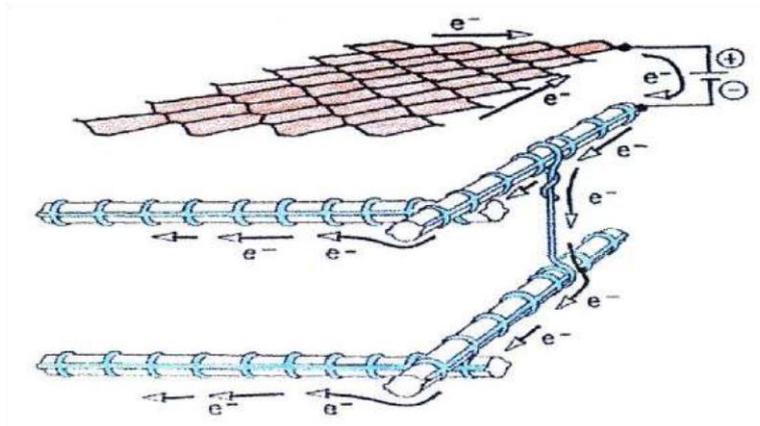


Figure.III.11 : Le principe de la protection cathodique appliquée au béton armé.

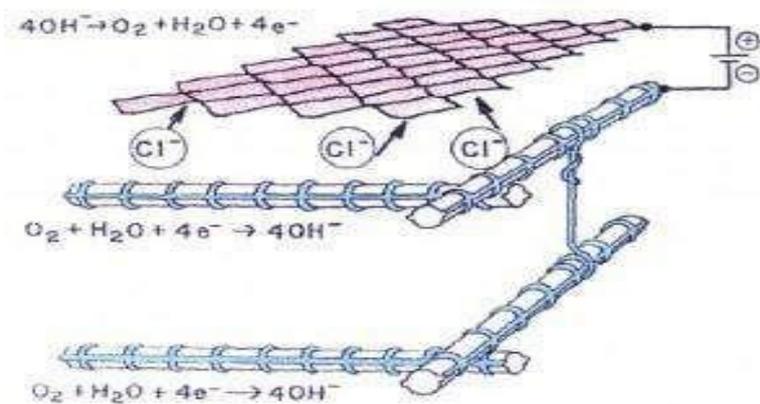


Figure.III.12 : une réaction cathodique à toutes les armatures

Les procédés cathodiques produisent une alcalinité sur la surface des armatures. A l'intérieur du béton, le courant est transporté par les ions proportionnellement à leur concentration. Les ions positifs se déplacent dans la même direction que le courant (de l'anode à la cathode), et les ions négatifs dans la direction opposée. Ainsi dans un béton contaminé par des chlorures, la circulation du courant présente une réduction de la teneur en chlorure à la surface des armatures ou une réduction de la pénétration de chlorure dans le béton.

Ces effets sont avantageux dans le sens où ils favorisent une augmentation du rapport $\text{OH}^- / \text{Cl}^-$ et favorisent ainsi les phénomènes de passivation. C'est pourquoi cette méthode est particulièrement adaptée lorsque la corrosion est causée par la contamination de chlorure (P. Pedferri, 1996).

Déchlorurasson :

La déchlorurasson 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).

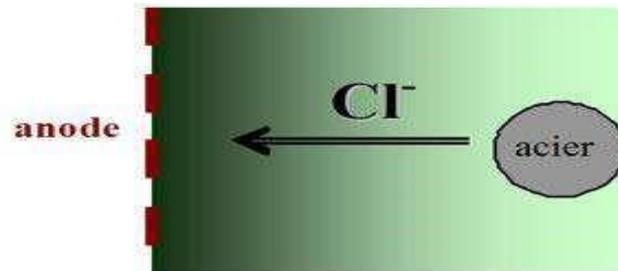


Figure.III.13 : Extraction des chlorures par un traitement électrochimique

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 déchlorurasson et la ré alcalinisation 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 ré alcalinisation et la déchlorurasson 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. [12]

Ré-alkalinisation :

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 la remontée 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 isolantes fixées 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. [12]

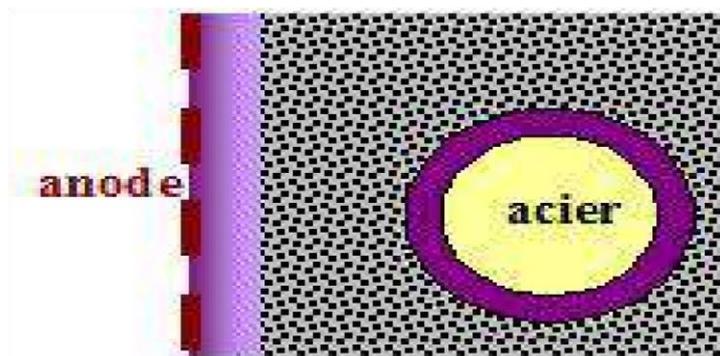


Figure.III.14: Traitement de ré-alkalinisation de l'enrobage autour d'une armature.

La pâte autour de l'anode est saturée d'un liquide basique qui pénètre dans le béton.



Figure.III.15: Enrobage d'une anode pour traitement de ré-alkalinisation à l'aide d'anode galvanique.

Bureau AFR (Conseilles Bureau d'étude spécialisé) Chiraga coopérative El Kods Alger

III.1.2: Méthodes chimiques :

III.1.2.1: Inhibiteurs :

Les inhibiteurs de corrosion sont des produits chimiques permettant de réduire l'exposition à la corrosion, même tout le processus de corrosion.

En général, le mécanisme de l'inhibiteur est un ou plusieurs des trois qui sont citées ci-dessous :

1. l'inhibiteur est chimiquement adsorbé sur la surface du métal et forme un film mince de protection à effet inhibiteur ou par combinaison entre les ions d'inhibiteurs et de la surface métallique.
2. l'inhibiteur entraîne une formation d'un film de protection d'oxyde de métal.
3. l'inhibiteur réagit avec un composant corrosif potentiel présent dans les milieux aqueux et le produit est un complexe.

Il existe différentes catégories d'inhibiteurs de corrosion. Il est possible de les classer selon leur mode d'action, à savoir :

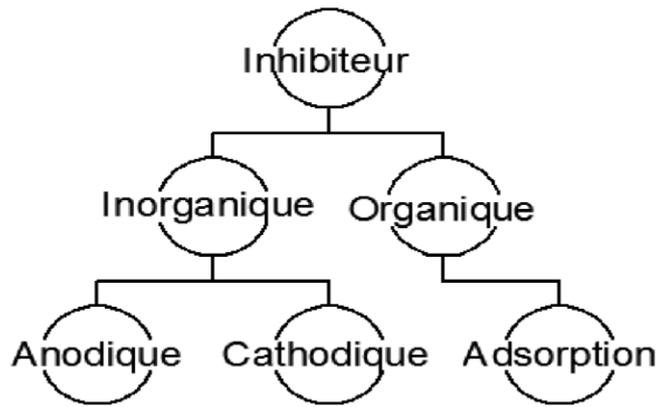


Figure.III.16 : Catégories des inhibiteurs de corrosion

Les inhibiteurs anodiques réagissent avec les cations métalliques produits sur l'anode, formant généralement, des hydroxydes insolubles qui se déposent sur la surface métallique en tant que film insoluble et imperméable à l'ion métallique. De l'hydrolyse des inhibiteurs se traduit par des ions OH⁻. Les chromates, nitrates, tungstates, molybdates sont des exemples d'inhibiteurs anodiques (LCPC, 2002).



Figure.III.17: Application d'inhibiteurs de corrosion dans ou sur le béton

Les inhibiteurs cathodiques agissent soit en ralentissant la réaction cathodique elle-même ou en formant une barrière de précipités insolubles sur le métal. Ainsi, ils limitent le contact métallique avec l'environnement, ce qui empêche l'apparition de la réaction de corrosion. Pour cette raison, l'inhibiteur cathodique est indépendant de la concentration, par conséquent, ils sont beaucoup plus sûrs que l'inhibiteur anodique.



Figure.III.18 : Inhibiteurs de corrosion

Les composés organiques utilisés comme inhibiteurs, agissent comme cathodiques, anodiques ou comme inhibiteurs cathodiques et anodiques en même temps. Néanmoins, d'une manière générale, ils agissent par l'intermédiaire d'un processus d'adsorption de surface, désignée comme une filmogène. Ces inhibiteurs accumulent un film protecteur hydrophobe par adsorption des molécules sur la surface métallique, ce qui fournit une barrière à la dissolution du métal dans l'électrolyte. Ils doivent être solubles ou dispersibles dans le milieu environnant le métal (LCPC, 2002).

III.1.2.2 : Les revêtements :

Les revêtements protecteurs de béton comprennent une grande variété de produits chimiques. Des formulations sont disponibles pour répondre à diverses conditions d'exposition et de services. Pour développer une spécification de la méthode et du matériel. Les fonctions d'un revêtement pour le bâtiment diffèrent sensiblement de celles d'un revêtement pour le génie civil. Il s'agit de :

- La fonction esthétique sur les surfaces nues ou vieilles (couleur, aspect de brillance, etc.) ;
- La correction des défauts de surface (porosité, fissurés) ;
- La fonction technique, par la protection du support vis-à-vis de l'environnement. Les produits de revêtement sur béton doivent en effet empêcher l'eau et ses éléments agressifs de pénétrer dans le béton et assurer des fonctions d'étanchéité à l'eau, à la vapeur d'eau ou au gaz carbonique.
- Les produits doivent être conformes aux normes qui les concernent.

- La finition est destinée à augmenter la protection des réparations et des surfaces non réparées. Elle peut être constituée de plusieurs produits classés selon leurs performances attendues pour le bâtiment :
- Revêtements à vocation essentiellement décorative (LCPC, 2002).



Figure.III.19 : Application de la finition



Figure.III.20 : Les enduits de façade

Revêtement d'imperméabilité, appliqué à titre curatif pour pallier les désordres susceptibles d'affecter le clos (fissures in filtrantes), Il est important que ces matériaux aient une élasticité suffisante pour résister aux fissures (LCPC, 2002).

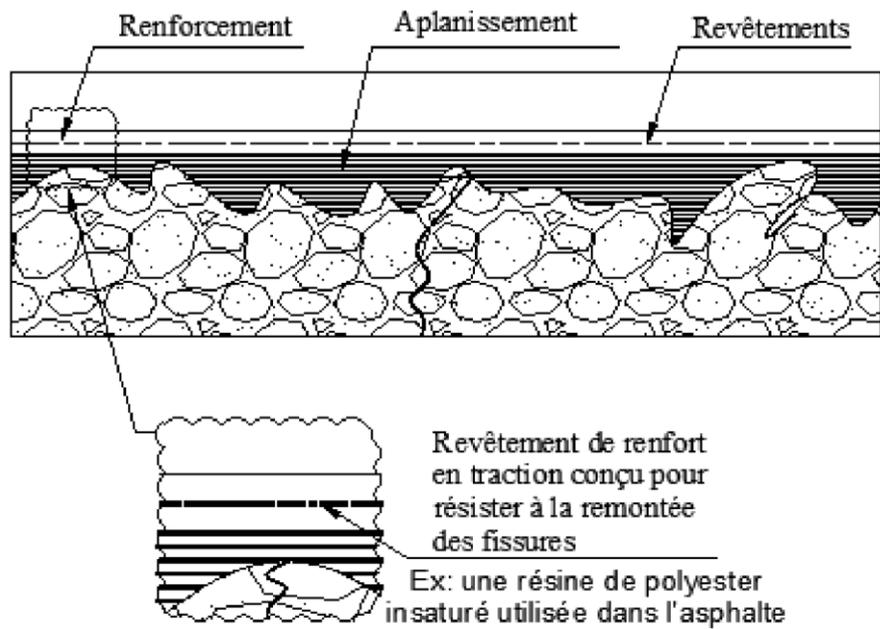


Figure.III.21 : Exemple de revêtement des surfaces

III.1.3: Méthodes mécanique :

- III.1.3.1: Techniques de raboutage :



Figure.III.22: Assemblage d'armatures par manchonnage

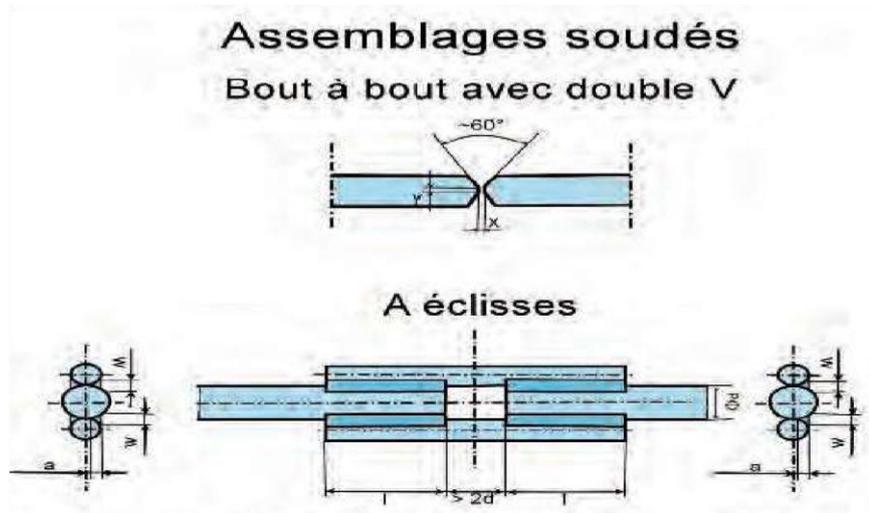


Figure.III.23: Assemblage par soudés [Baronj. Ollirier jp. 1997, la durabilité de béton]

III.1.3.2: Renforcement avec ajout d'armatures :

- Exemple de renforcement d'une poutre par ajout de béton et d'armatures passives (insuffisance de capacité portante vis-à-vis de la flexion et de l'effort tranchant).

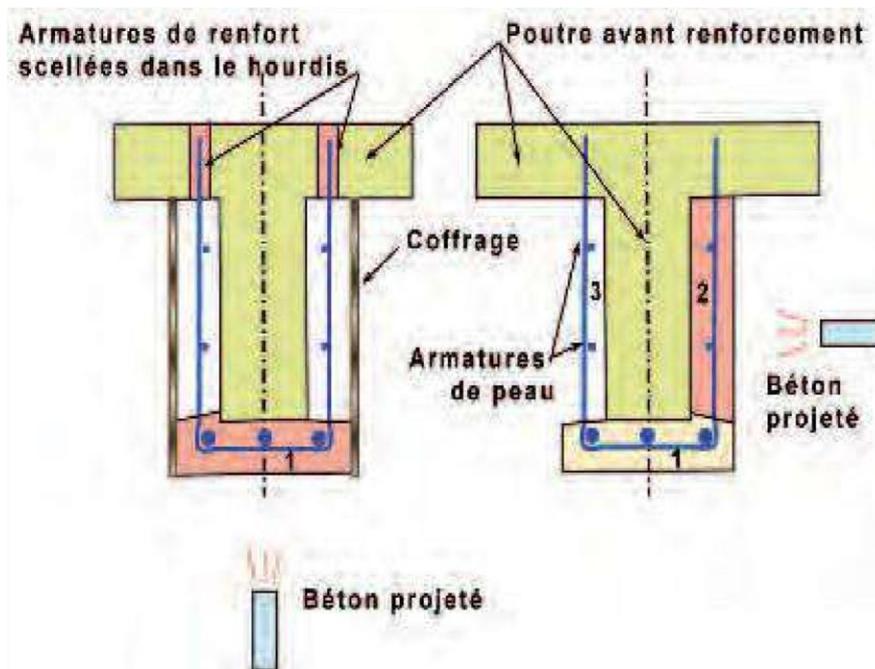


Figure.III. 24: Renforcement avec ajout d'armatures de poutre

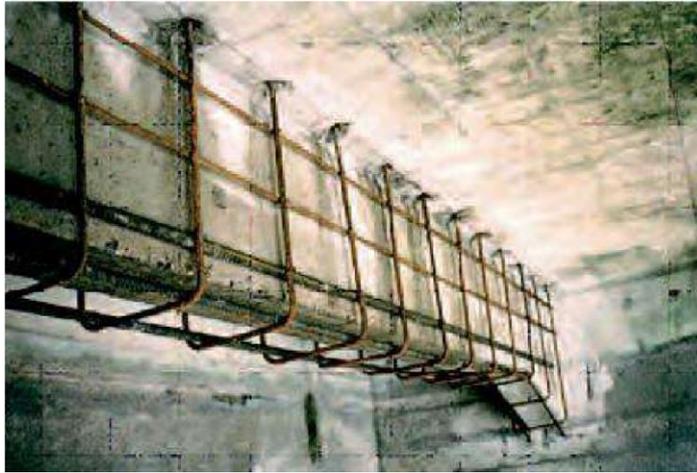


Figure.III. 25: Renforcement avec ajout d'armatures de poutre

Exemple du viaduc d'accès Sud du pont de Saint-Nazaire - Mise en place de précontrainte additionnelle nécessitant une augmentation de la section BA des poutres VIPP pour éviter des contraintes de compression trop importantes.



Figure.III.26: Renforcement avec ajout d'armatures de précontraint

III.1.3.3 : Remplacement d'armatures de béton armé :

Structure affectée par des désordres mettant en jeu sa capacité portante (modification des caractéristiques mécaniques des armatures suite à un incendie, rupture des armatures suite à un choc, forte réduction des armatures suite à la corrosion...) (FABEM 7, 2011).

Réparation avec remplacement d'armatures :

Choix des matériaux – Armatures :

- Si les désordres sont limités à une partie de la structure, (cas courants de chocs), les armatures BA sont remplacées après travaux de préparation adaptés ;
- Si les désordres sont liés à la corrosion et concernent une partie importante de la structure et que l'environnement est agressif, il est envisageable de remplacer les armatures BA par des armatures non corrodables, (inoxydables, matériaux composites).

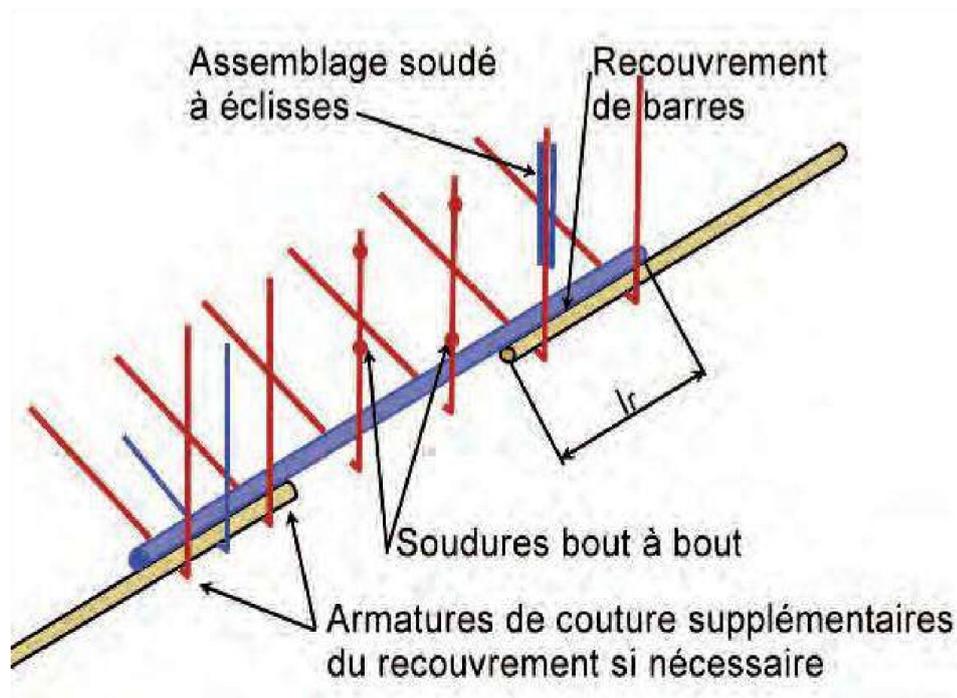


Figure.III. 27: Remplacement des armatures

III.2 : Étude des techniques adaptées au cas des poteaux et poutres :

Introduction :

La maintenance des ouvrages est un problème de plus en plus préoccupant, dans la mesure où le coût des ouvrages neufs est élevé, les conditions de réparation sont de plus en plus difficiles.

Elle consiste à protéger en assurant une meilleure étanchéité et en limitant la corrosion, à réparer en cherchant à compenser les pertes en rigidité et en résistance, à renforcer en améliorant les performances et la durabilité de l'ouvrage.

III.2.1 : Méthodes classique :

III.2.1.1 : Chemisage :

L'utilisation des gaines convient particulièrement à la réparation des poteaux, des piles et des pieux détériorés. Cette technique consiste à reconstituer la section d'un élément en service en le gainant de béton. Il n'est pas nécessaire que l'élément d'origine soit lui-même en béton, il est possible de gainer des sections en acier ou en maçonnerie.

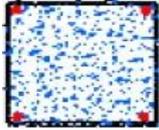
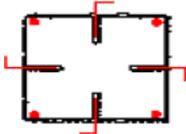
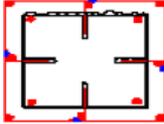
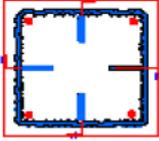
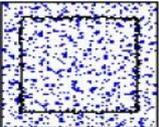
Les travaux de préparation des surfaces avant l'opération ont une importance primordiale. Le coffrage de la gaine doit être muni de cales d'espacement destinées à prévoir un vide entre le coffrage même et la surface du béton ou matériau initial. Ce coffrage peut être temporaire ou permanent. Il peut être en bois, en acier ou en béton préfabriqué, selon sa destination et les conditions d'exploitation (A. AIT TAFATI, 2017)



Figure.III. 28: mise en place des armatures de renforcement avec augmentation de la rugosité du pot

Le chemisage en béton armé exige une préparation d'interface pour obtenir un bon lien entre la nouvelle colonne et l'ancienne, ce qui donne un effet monolithique. Alors une augmentation de la rugosité de la surface est demandée, suivie de l'application d'agent de liaison. Plusieurs méthodes sont utilisées pour augmenter la rugosité de l'interface : sablage, « electrichammering », etc.

Tableau I.1 : Etapes de chemisage en béton armé

Etapes de chemisage en béton armé	Schémas
1) Nettoyage et sablage du support initial de béton du poteau.	
2) Enclavage et scellement de chevilles pour fixer les armatures additionnelles.	
3) Fixation des armatures additionnelles sur les tiges d'ancrage.	
4) Etalage d'une couche époxy sur la surface du béton primitif.	
5) Coulage de l'enveloppe en béton.	

III.2.1.2 : Injection :

C'est une opération qui consiste à faire pénétrer dans des fissures un produit susceptible de créer une liaison mécanique et/ou une étanchéité entre les parties disjointes (C. DÍAZ GÓMEZ, 2012)

Les éléments en béton armé endommagés dont les fissures sont stables et qui ont une largeur comprise entre 0,2mm et 2mm peuvent être réparés par la technique d'injection de résine. Il est bien entendu que le béton des zones fissurées n'est ni disloqué ni écrasé.

Les éléments dont les fissures dépassent 2mm de largeur peuvent être réparés par injection de mortier époxydique.



Figure.III. 29: Méthode d'injection

Adjonction d'armatures complémentaires :

Des armatures complémentaires sont à prévoir lorsqu'il s'agit de remplacer des aciers corrodés ou coupés accidentellement. Cette solution peut également être envisagée lorsqu'il s'agit de renforcer une structure. Les armatures existantes conservées doivent faire l'objet de soins de manière à éviter la poursuite de leur dégradation.

Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration, et participer à la résistance des sections renforcées. Elles peuvent s'inscrire dans la géométrie de l'élément. La protection des armatures en surépaisseur est assurée par un béton coulé ou projeté.

Dans tous les cas, un enrobage minimal égal au diamètre des barres est nécessaire (Z E A, Ould El Hacem, 2016).

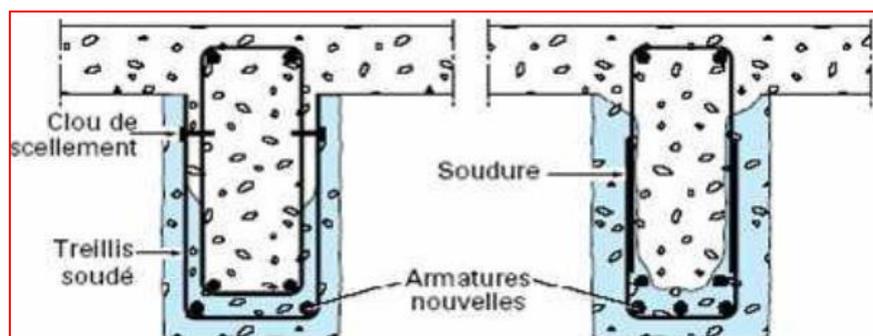


Figure.III.30: Adjonction d'armatures complémentaires

III.2.1.3 : Béton projeté :

Cette technique très utilisée tant pour le renforcement de structures insuffisantes ou défailtantes que pour la réparation d'ouvrages endommagés, exige pour sa mise en œuvre un personnel spécialisé. Le béton projeté peut être combiné avec l'adjonction d'armatures complémentaires (A, LAICHAOUI, 2006).

La projection est réalisée soit par voie sèche, soit par voie mouillée.

Après durcissement, le béton projeté possède les propriétés d'un béton coulé puis vibré. La projection est possible dans toutes les directions et, en particulier, en plafond.

Projection par voie sèche :

La vitesse des éléments du mélange à la sortie de la lance est de l'ordre de 100m/s. elle décroît plus rapidement pour les éléments de faible masse que pour les gros granulats. Il se forme alors sur la surface d'application une fine couche de pâte formée par l'eau et le ciment, qui retient instantanément les granulats fins, mais sur laquelle les gros granulats commencent par rebondir, au fur et à mesure de son épaisseur, cette couche est « martelée » par les gros granulats qu'elle finit par retenir, ce qui donne:

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

Du fait de l'enrichissement en ciment au voisinage de la surface, le dosage initial en ciment peut être limité.

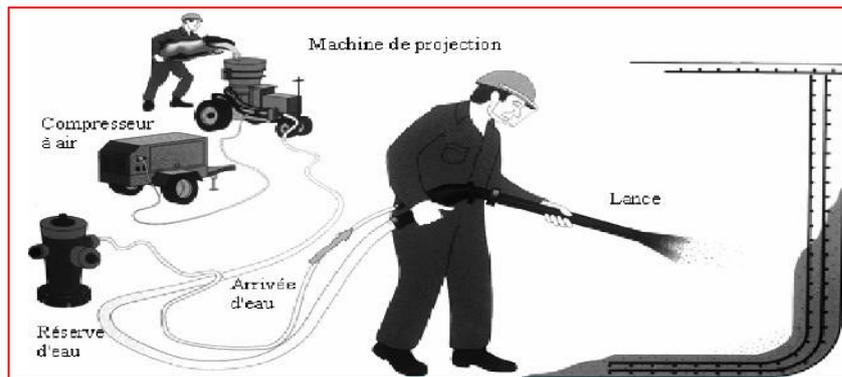


Figure.III.31 :Technique de projection par voie sèche

Projection par voie mouillée :

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

Pour obtenir des performances mécaniques équivalentes à celles d'un béton projeté par voie sèche, il est nécessaire d'augmenter le dosage en ciment. L'emploi d'adjuvants permet d'obtenir la maniabilité désirée, avec un dosage en eau aussi faible que possible, une telle consistance du béton exigera un affaissement au cône correspondant, de l'ordre de 12 cm (A, LAICHAOUI, 2006).

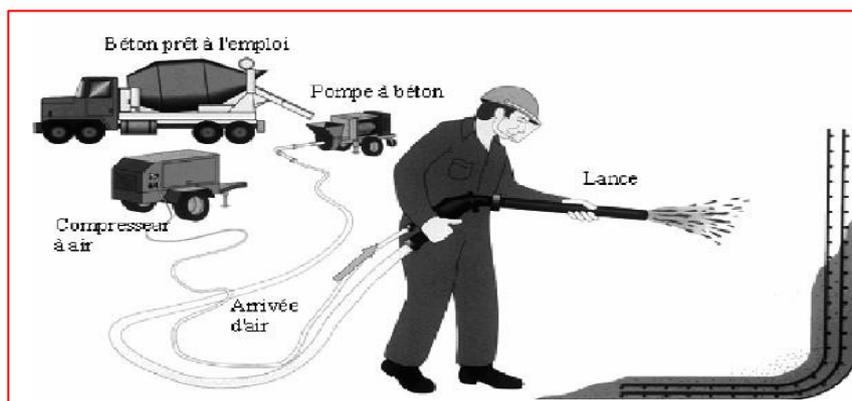


Figure.II. 32: technique de projection par voie mouillée

Avantages des deux méthodes :

Par voie sèche :

- possibilité d'utiliser des granulats de grande dimension (15 à 20 mm)

- Un dosage relativement faible en ciment.
- Un faible rapport E/C.
- Un compactage énergétique
- Une bonne adhérence sur le support.
- Une pénétration en grande profondeur dans les pores.
- Une éventuelle projection en plafond sans accélérateur de prise

Par voie mouillée :

- Composition uniforme de la couche projetée
- Pas de rebondissement violent.
- Pas de production de poussières (DTR B C 2 2., 2012).

Inconvénients des deux méthodes :

Par voie sèche :

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

Par voie mouillée :

- Dosage en eau et en ciment plus élevé pour assurer une plasticité nécessaire.
- Compactage faible.
- Nécessité d'accélérateurs de prise (A, MAZAHERI et al, 2011)

III.2.1.4 : Tôles collées :

Ce procédé est un apport d'armatures extérieures, soit pour consolider un élément dont les dégradations mettent en péril sa résistance, soit pour remplacer des aciers oubliés, ou mal positionnés. C'est un technique économique qui modifie peu l'aspect et les dimensions de la structure à réparer. La préparation des surfaces, la mise en œuvre des colles et la réalisation du placage, doivent impérativement être confiées à des entreprises spécialisées.

Le nombre de réparations de ce type est assez faible. En effet, d'une part il faut que le béton soit de qualité pour que les efforts puissent passer convenablement du béton aux tôles (DTR B C 2 2., 2012).

III.2.1.5 : Précontrainte additionnelle :

Une insuffisance de résistance vis-à-vis de la flexion, ou l'effort tranchant d'une structure en béton armé peut être compensée par une précontrainte additionnelle. Ainsi, les sections, soumises au départ à une sollicitation de flexion simple, sont amenées à supporter une sollicitation de flexion composée.

Cette technique consiste à renforcer une structure à l'aide de câbles de précontrainte ou de torons gainés disposés à l'extérieur du béton. La précontrainte additionnelle va introduire dans la structure des sollicitations complémentaires, qui vont compenser les défauts de dimensionnement ou de conception, que doit supporter la structure suite à des modifications des conditions de chargement ou d'utilisation (A, LAICHAOUI, 2006).



Figure.II. 33 : technique de précontrainte additionnelle

Avantage :

- Une compensation partielle ou complète des actions de charges.
- Une économie appréciable des matériaux.
- Les grands portés sont réparables.
- Une réduction des risques de corrosion (CRAGP, 1992).

Inconvénients :

- La nécessité de matériaux spécifiques (comme les vérins).
- La nécessité de main d'œuvre qualifiée.
- La nécessité d'équipements particuliers.
- Risque de rupture à vide par excès de compression. Un calcul relativement complexe (CRAGP, 1992).

III.2.2 : Méthodes nouvelles :

III.2.2.1 : Techniques de renforcement par matériaux composites :

Les matériaux composites utilisés pour le renforcement se présentent sous la forme de tissus ou de plaques stratifiées. Les comportements observés avec ce type de renforcement, sont plus performants, que le renforcement en tôles d'acier. Les expériences menées jusqu'à présent, montrent l'utilisation des matériaux composites en fibres de verre, de carbone ou d'aramide.

Ainsi, l'amélioration de la durée de vie de l'ouvrage est due aux propriétés des composites : la rigidité, la résistance mécanique, la résistance à la corrosion. De plus, ces matériaux permettent une conception du renfort plus adaptée au besoin de la structure grâce à des procédés qui se prêtent bien à la notion de réparation. La plupart des activités de recherche utilise le FRP pour le renforcement de poutres en béton armé pour augmenter leur capacité de flexion. Vis-à-vis des renforcements au cisaillement, les recherches récentes sont très largement conduites sur des poutres de section en T par la méthode de collage externe. On peut effectuer avec les PRF un renforcement en flexion en collant les bandes sur la surface inférieure de la poutre. Un renforcement en cisaillement peut être apporté par le collage des bandes sur les joues de ces mêmes poutres (B. BLACHE, JEAN-D. MERLET, 1993).

III.2.2.2 : Définition de PRF :

Un polymère renforcé de fibres PRF (en anglais Fibre Reinforced Polymer) est un matériau composite qui se compose d'un arrangement de matrice et de fibres continues ou discontinues. De façon générale, les fibres de carbone ou de verre sont noyées dans une matrice polymère. La résistance mécanique de la matrice est beaucoup plus faible que celle des fibres. De par l'orientation privilégiée des fibres le matériau composite est en général anisotrope. Ses caractéristiques mécaniques et chimiques, et sa densité très favorable en font un matériau très efficace comparé au métal.

Les matrices utilisées sont généralement d'origine pétrolière, on peut citer notamment les résines polyester thermodurcissable, les résines époxydes, les résines vinylester ou encore les résines thermoplastiques (polyamides...).

Les fibres utilisées dans le renforcement de structure sont en général des fibres de carbone, de verre, d'aramide ou de basalte .Ces fibres ont un comportement élastique jusqu'à la rupture, avec une très grande résistance en traction et module d'élasticité.

Avantage :

- Rapport résistance - poids très élevé.
- Très grande rigidité.
- Résistance à la fatigue et à la corrosion.
- Facilité de mise en place.
- Possibilité d'optimisation (choix de renforcement, direction).
- Multifonctionnalité (résistance mécanique, résistance à l'eau et à la corrosion, etc.)
- Le non nécessité d'une fixation mécanique : comparativement aux platines d'acier.

Inconvénients :

- Coût élevé du produit de base jusqu'à 10 fois le coût de l'acier, pour une masse identique.
- Connaissances limitées sur leurs propriétés à long terme, notamment en ce qui concerne l'adhérence à l'interface béton-composite.
- Manque de ductilité.
- Absence de normes de design.

III.2.2.3 : Méthode de renforcement par bar NSM « Near-surface mounted » :

Dans le cas de la méthode de collage externe, la ruine des poutres apparaît par le décollement du composite dans la plupart des tests. Le problème est que la surface de connexion entre béton et composite est insuffisante. Pour éviter le problème du décollement du FRP dans la méthode EB, la méthode NSM a été développée. Des rainures sont créées sur la surface de renforcement de la poutre, des bandes ou barres FRP sont mises dans les rainures et sont collées au béton par une résine époxy.

Avec cette méthode, le FRP est lié avec le béton sur deux faces, donc la liaison entre le FRP et le béton est grand et le décollement du FRP est limité.

Le décollement du composite est limité dans la méthode NSM, mais les expérimentations ont montré une séparation de la couche du béton de protection sur la zone renforcée, dans le mode de rupture des poutres renforcées. Le processus de renforcement au cisaillement de poutres en béton armé par la méthode NSM est réalisé par les étapes suivantes (A, KREIT, 2015) :

- La position des entailles est définie sur la surface de renforcement, les entailles sont coupées à l'aide d'une tronçonneuse avec la profondeur qui correspond à la conception. Cette étape est réalisée soigneusement pour ne pas couper les armatures longitudinales.
- Les entailles sont nettoyées à l'air comprimé, pour enlever toutes les poussières et assurer la bonne adhérence entre béton et résine époxy.
- Les entailles sont remplies à 2/3 de la profondeur par de la résine époxy.
- Les bandes de renforcement FRP sont insérées dans les entailles remplies, et enfoncées avec une pression suffisante pour assurer qu'elles soient bien en place, et qu'il n'y ait pas de vides autour des plaques.
- La résine époxy est ajoutée pour remplir complètement les entailles.

III.2.2.4 : Renforcement des éléments structuraux :

a) Renforcement des poteaux :

L'utilisation d'une enveloppe formée de feuilles de PRF autour de la colonne permet non seulement d'assurer une protection supplémentaire, mais aussi d'améliorer la résistance en compression par l'effet du confinement, en plus de l'augmentation de la ductilité comparé à la colonne sans composites.

b) Renforcement des poutres :

On peut effectuer un renforcement en flexion en collant les bandes sur la surface tendue de la poutre, et le renforcement en cisaillement peut être apporté par le collage des bandes sur les parois de ces mêmes poutres.

Conclusion :

Le présent chapitre porte sur la pathologie du béton et les différents types de désordres affectant les structures en béton armé ainsi que leurs causes. Une connaissance aussi précise que possible des mécanismes des dégradations des matériaux, et perte de performance ou de comportement, sont dus à plusieurs facteurs qu'on ne peut maîtriser. Ainsi la notion de la structure parfaitement

durable est une notion irréalisable. Cette vulnérabilité des structures nous exige le recours à une bonne technique de diagnostic et d'auscultation à travers le cycle de la vie de l'ouvrage.

A cet effet la compréhension des mécanismes de dégradation nécessite la maîtrise des méthodes de surveillance, de détection des causes et des pathologies.

Par ailleurs, cette synthèse nous a aussi permis de nous intéresser aux méthodes de réparation et de renforcement. L'utilisation de matériaux composites connaît un essor remarquable, suite à leurs performances mécaniques, plusieurs techniques de renforcement de structures en génie civil utilisent ces matériaux et sont ainsi proposées et développées (A, LAICHAOUI, 2006).

III.2.3 : Adéquation avec les contraintes locales (climat, ressources, coûts) :

Algérie possède une grande diversité climatique et géographique (littoral méditerranéen, hauts plateaux, Sahara). Il est donc essentiel d'adapter les constructions aux conditions locales pour garantir **le confort thermique, la durabilité et l'économie des ressources**.

III.2.3.1 : Adaptation au climat algérien :

Régions côtières (Alger, Oran, Bejaïa, Annaba...)

Climat méditerranéen : étés chauds et humides, hivers doux et pluvieux.

Solutions :

- Toitures inclinées pour évacuer l'eau de pluie.
- Matériaux résistants à l'humidité (béton traité, pierre naturelle).
- Ventilation naturelle et façades ouvertes pour limiter la chaleur estivale.

Hauts Plateaux et zones montagneuses (Sétif, Tizi Ouzou, Batna...)

Climat plus froid en hiver, avec neige et gel.

Solutions :

- Isolation renforcée (murs épais en pierre ou brique, double vitrage).
- Orientation sud pour capter un maximum de soleil en hiver.
- Chauffage naturel avec des matériaux à forte inertie thermique (pierre, brique).

Régions sahariennes (Ghardaïa, Tamanrasset, Béchar...)

Climat désertique : températures très élevées le jour, froides la nuit.

Solutions :

- Constructions en **terre crue** (architecture traditionnelle mozabite) pour conserver la fraîcheur.
- Murs épais et ouvertures réduites pour limiter l'entrée de la chaleur.
- Couleurs claires pour réfléchir le soleil.
- Cours intérieures et patios pour améliorer la ventilation.

III.2.3.2 : Utilisation des ressources locales :

- **Brique en terre crue (Adobe, pisé)** : Utilisée traditionnellement dans le sud, elle est efficace pour l'isolation thermique et écologique.
- **Pierre naturelle** : Présente dans les montagnes et les hauts plateaux, elle est idéale pour des constructions durables et bien isolées.
- **Béton et parpaings** : Couramment utilisés, mais nécessitent une bonne isolation pour éviter les surchauffes et pertes thermiques.
- **Bois et tuiles locales** : Peu utilisés en raison de la rareté du bois en Algérie, mais présents dans certaines régions montagneuses.

III.2.3.3: Réduction des coûts et efficacité énergétique :

Face à la hausse des coûts de construction et d'énergie, l'Algérie encourage les bâtiments économes en énergie :

Isolation thermique : Réduction des pertes de chaleur pour limiter l'utilisation des climatiseurs et chauffages.

Énergie solaire : Utilisation croissante des panneaux photovoltaïques pour réduire la dépendance au réseau électrique.

Techniques de construction économique : Béton allégé, briques creuses, toitures végétalisées pour optimiser le confort thermique.

Exemples d'architecture adaptée en Algérie :

Architecture mozabite (Ghardaïa, M'zab) : Constructions en terre, couleurs claires, ventilation naturelle.

Maisons traditionnelles kabyles : Murs en pierre épais, petites ouvertures pour conserver la chaleur en hiver.

Bâtiments modernes avec toits verts et panneaux solaires : Développement récent dans les grandes villes.

Chapitre 4 : Étude économique et analyse des impacts

Introduction :

En Algérie, la corrosion des armatures constitue l'un des principaux facteurs de dégradation prématurée des structures en béton armé. Ce phénomène, largement influencé par les conditions climatiques locales, les agents agressifs présents dans l'environnement (chlorures, humidité,

dioxyde de carbone), et les défauts de mise en œuvre, engendre des pertes économiques considérables pour le secteur du génie civil. Face à cette problématique récurrente, la réparation des ouvrages détériorés devient une nécessité stratégique pour préserver la sécurité, la fonctionnalité et la durabilité des infrastructures.

Toutefois, toute intervention de réhabilitation implique des coûts non négligeables, répartis entre la main-d'œuvre spécialisée, les matériaux techniques, et les équipements adaptés. Il devient ainsi essentiel de maîtriser ces coûts afin de proposer des solutions économiquement viables et techniquement efficaces. La présente étude vise à établir une évaluation précise des coûts de réparation liés à la corrosion dans les structures en béton armé, à travers une analyse détaillée des différents postes de dépenses et leur évolution dans le temps (court, moyen et long terme). Elle ambitionne également de proposer une réflexion sur les choix technico-économiques à adopter pour optimiser les interventions de maintenance dans le contexte algérien, tout en intégrant les exigences de durabilité et les contraintes budgétaires actuelles.

IV.1.1 : Évaluation des coûts de réparation :

L'évaluation des coûts de réparation de la corrosion dans le domaine du génie civil en Algérie nécessite une analyse approfondie des trois composantes principales : la **main-d'œuvre**, les **matériaux** et les **outils**. De plus, il est essentiel de considérer les perspectives économiques à **court, moyen et long terme** pour anticiper les variations potentielles des coûts.

IV.1.1.1 : Main-d'œuvre :

L'évaluation des coûts de la main-d'œuvre dans le secteur du génie civil en Algérie dépend de divers facteurs, notamment la nature des travaux, la complexité des tâches, la localisation du chantier et la qualification des ouvriers. Les tarifs peuvent varier en fonction de ces éléments, et il est essentiel de considérer ces variables pour obtenir une estimation précise (EBourse DZ, 2024).

Il est important de noter que les coûts de la main-d'œuvre sont sujets à des fluctuations en raison de divers facteurs économiques, tels que l'inflation, les variations des prix des matériaux de construction et les évolutions des salaires dans le secteur du BTPH (Bâtiment, Travaux Publics et Hydraulique). Par exemple, des révisions des indices des salaires et des matières premières sont parfois effectuées pour réguler le marché du BTPH (EBourse DZ, 2024).

Pour obtenir une estimation précise et à jour des coûts de la main-d'œuvre pour un projet spécifique, il est recommandé de consulter plusieurs entreprises spécialisées et de comparer les devis. Cela permettra de tenir compte des spécificités du projet, de la localisation du chantier et des conditions actuelles du marché (EBourse DZ, 2024).

Les tarifs de la main-d'œuvre en Algérie varient en fonction de la nature des travaux et de la qualification des ouvriers. Voici quelques exemples pertinents (Boonyan Info , 2024) :

- **Pose d'une dalle en béton armé** : entre 1 500 et 1 700 DZD par mètre carré.
- **Pose de brique de 10 cm** : entre 300 et 400 DZD par mètre carré.
- **Pose de crépissage ciment intérieur** : entre 300 et 400 DZD par mètre carré.
- **Pose de crépissage ciment façade** : entre 800 et 1 200 DZD par mètre carré.

Ces tarifs peuvent fluctuer en fonction de la complexité des travaux, de la localisation du chantier et de la disponibilité de la main-d'œuvre qualifiée (Boonyan Info , 2024).

IV.1.1.2 : Matériaux :

L'évaluation des coûts des matériaux nécessaires pour la réparation de la corrosion dans le domaine du génie civil en Algérie dépend de plusieurs facteurs, notamment le type de matériau, la qualité requise et les conditions du marché. Voici un aperçu des prix de certains matériaux couramment utilisés, basé sur les données disponibles jusqu'en décembre 2023 (DZAYER INFO, 2023) :

1. Fer à béton :

- Diamètre 12 mm : environ 11 500 DZD par quintal
- Diamètre 14 mm : environ 12 500 DZD par quintal.

2. Briques :

- Brique de 15 trous : environ 30 DZD l'unité.
- Brique de 10 trous : environ 22 DZD l'unité [24]

3. Ciment :

- Sac de ciment de 50 kg : environ 480 DZD (L'Algérie Aujourd'hui, 2023).

4. Mortiers de réparation :

- Mortier de réparation structurale à base de résine époxy : environ 21 498 DZD par mètre carré.
- Mortier réparateur modifié avec des polymères et renforcé avec des fibres : environ 4 600 DZD pour 44 kg.

Il est important de noter que ces prix peuvent varier en fonction de la région, de la disponibilité des matériaux et des fluctuations du marché. Par ailleurs, des baisses significatives ont été observées sur certains matériaux, notamment le fer à béton, en raison de la reprise de la production locale et de l'augmentation de l'intégration nationale dans le secteur de la construction.

Pour obtenir des estimations précises et à jour, il est recommandé de consulter régulièrement les fournisseurs locaux et de surveiller les tendances du marché.

IV.1.1.3 : Les outils :

Dans le domaine de la réparation de la corrosion en génie civil en Algérie, l'utilisation d'outils et d'équipements spécialisés est essentielle pour assurer l'efficacité et la durabilité des interventions. Voici une liste non exhaustive de ces outils et équipements, accompagnés de leurs prix indicatifs (Générateur de Prix, 2025) :

1. Outils de préparation de surface :

- **Jet de sable à pression** : Utilisé pour nettoyer les surfaces métalliques avant application de revêtements anticorrosion.
- **Prix indicatif** : Environ 36,06 DZD par m²
- **Brosse à clous d'acier** : Permet d'éliminer la rouille et les impuretés des armatures en acier.
- **Prix indicatif** : Inclus dans le coût de préparation de surface, estimé à environ 179,51 DZD par m² (Générateur de Prix, 2025).

2. Outils d'application de revêtements (STI Algerie, 2025) :

Kit d'application d'époxy : Essentiel pour l'application uniforme de résines époxy sur les surfaces traitées.

- **Prix indicatif** : Non spécifié, disponible sur demande auprès des fournisseurs spécialisés.
- **Rouleau de finition de revêtement** : Assure une finition lisse et uniforme des couches de revêtement.
 - **Prix indicatif** : Non spécifié, disponible sur demande auprès des fournisseurs spécialisés.
- **Pompe de dosage d'époxy** : Facilite le mélange et l'application précise des résines époxy.
 - **Prix indicatif** : Non spécifié, disponible sur demande auprès des fournisseurs spécialisés.
- **Torche de rétreint (Flambard)** : Utilisée pour la rétraction thermique des bandes thermo-rétractables utilisées dans les revêtements.
 - **Prix indicatif** : Non spécifié, disponible sur demande auprès des fournisseurs spécialisés.

3. Appareils de mesure et de contrôle :

- **Détecteur de défaut de revêtement** : Permet de détecter les zones non protégées ou endommagées du revêtement.
 - **Prix indicatif** : Non spécifié, disponible sur demande auprès des fournisseurs spécialisés.
- **Rugosimètre** : Mesure la rugosité de la surface pour évaluer la qualité de la préparation avant application du revêtement.
 - **Prix indicatif** : Non spécifié, disponible sur demande auprès des fournisseurs spécialisés.
- **Hygromètre** : Contrôle le taux d'humidité des surfaces pour garantir une adhérence optimale du revêtement.
 - **Prix indicatif** : Non spécifié, disponible sur demande auprès des fournisseurs spécialisés.
- **Mesureur d'épaisseur** : Vérifie l'épaisseur du revêtement appliqué pour assurer une protection adéquate contre la corrosion.
 - **Prix indicatif** : Non spécifié, disponible sur demande auprès des fournisseurs spécialisés.
- **Jauge d'épaisseur** : Utilisée pour mesurer l'épaisseur des matériaux et détecter l'usure due à la corrosion.

- **Prix indicatif** : Non spécifié, disponible sur demande auprès des fournisseurs spécialisés.
- **Peel-tester** : Évalue l'adhérence du revêtement sur la surface métallique.

Prix indicatif : Non spécifié, disponible sur demande auprès des fournisseurs spécialisés (STI Algerie, 2025).

4. Outils de maintenance et de réparation (MaBricole, 2025) :

- **Graisseur rapide avec flexible et buses** : Assure une lubrification efficace des équipements mécaniques pour prévenir la corrosion.
 - **Prix indicatif** : 850,00 DZD.
- **Miroir d'inspection télescopique** : Permet l'inspection visuelle des zones difficiles d'accès pour détecter les signes de corrosion.
 - **Prix indicatif** : 1 350,00 DZD

5. Équipements de protection individuelle (EPI) (MaBricole, 2025) :

- **Gants de protection** : Protègent les mains contre les produits chimiques et les surfaces rugueuses.
 - **Prix indicatif** : Non spécifié, disponible sur demande auprès des fournisseurs spécialisés.
- **Lunettes de sécurité** : Protègent les yeux des projections de produits chimiques et des particules volantes.
 - **Prix indicatif** : Non spécifié, disponible sur demande auprès des fournisseurs spécialisés.
- **Masques respiratoires** : Filtrent les vapeurs nocives et les particules en suspension dans l'air.
 - **Prix indicatif** : Non spécifié, disponible sur demande auprès des fournisseurs spécialisés.

IV.1.2 : Scénarios économiques (court, moyen et long terme) :

L'évaluation des coûts de réparation de la corrosion dans le domaine du génie civil en Algérie nécessite une analyse selon trois horizons temporels : court, moyen et long terme. Chacun de ces scénarios présente des implications économiques spécifiques.

IV.1.2.1 : Court terme : Réparations immédiates :

À court terme, les réparations immédiates de la corrosion dans les structures en béton armé en Algérie visent à traiter les dommages visibles pour restaurer rapidement la sécurité et la fonctionnalité des ouvrages. Ces interventions incluent le retrait du béton détérioré, le traitement des armatures corrodées et la reconstitution du béton (Infociments, 2025).

Procédure de réparation :

1. **Retrait du béton endommagé** : Le béton affecté est enlevé jusqu'à atteindre un matériau sain, en exposant les armatures corrodées. Cette opération peut être réalisée par divers moyens mécaniques ou chimiques (Infociments, 2025).
2. **Traitement des armatures** : Les barres d'acier mises à nu sont nettoyées pour éliminer la rouille, souvent par brossage métallique ou sablage. Ensuite, une protection anticorrosion est appliquée pour prévenir de futures dégradations (Infociments, 2025).
3. **Reconstitution du béton** : Les zones excavées sont remplies avec des mortiers de réparation adaptés, tels que le Sika lastic , conçu pour la réparation des structures en béton (SIKA, 2025).

Coûts associés :

Le coût de ces réparations dépend de plusieurs facteurs, notamment la superficie à traiter, l'état des armatures et le type de mortier utilisé. Par exemple, l'application d'un mortier de réparation structurale est estimée à environ 3 267,53 DZD par mètre carré (GPR.A, 2025).

Considérations :

Bien que ces réparations immédiates soient essentielles pour remédier aux problèmes apparents, elles peuvent s'avérer coûteuses si elles doivent être répétées fréquemment en l'absence de mesures préventives. Il est donc recommandé d'envisager des stratégies de maintenance préventive pour prolonger la durabilité des structures et réduire les coûts à long terme.

IV.1.2.2 : Moyen terme : Maintenance préventive

La maintenance préventive est une stratégie essentielle pour prolonger la durée de vie des structures en béton armé et réduire les coûts associés aux réparations majeures. En Algérie, cette approche est particulièrement pertinente compte tenu des conditions climatiques et environnementales qui peuvent accélérer la corrosion des armatures.

Stratégies de maintenance préventive :

1. **Surveillance régulière** : Effectuer des inspections périodiques pour détecter les premiers signes de dégradation, tels que des fissures, des taches de rouille ou des éclatements du béton. Une détection précoce permet d'intervenir rapidement et d'éviter des dommages plus importants.
2. **Contrôle de l'humidité** : Assurer un drainage efficace autour des structures pour minimiser l'exposition à l'eau, principal facteur de corrosion. L'utilisation de revêtements imperméabilisants sur les surfaces en béton peut également limiter la pénétration de l'eau.
3. **Application de revêtements protecteurs** : Utiliser des peintures ou des enduits spécifiques pour protéger les armatures en acier contre les agents corrosifs. Ces revêtements agissent comme une barrière physique, empêchant les chlorures et autres substances nocives d'atteindre l'acier.
4. **Protection cathodique** : Mettre en place des systèmes de protection cathodique, soit par anodes sacrificielles, soit par courant imposé, pour prévenir la corrosion des armatures. Cette technique est particulièrement efficace dans les environnements fortement exposés aux chlorures, comme les zones côtières (EPE SAPTA, 2025).
5. **Utilisation d'inhibiteurs de corrosion** : Ajouter des inhibiteurs chimiques au béton lors de sa formulation ou les appliquer en surface pour ralentir le processus de corrosion des armatures. Ces inhibiteurs interfèrent avec les réactions chimiques responsables de la corrosion.

Avantages économiques (Projet Diamond, 2025) :

Investir dans la maintenance préventive offre plusieurs bénéfices économiques :

- **Réduction des coûts de réparation** : En prévenant les dégradations majeures, les dépenses liées aux réparations lourdes sont significativement diminuées.
- **Prolongation de la durée de vie des structures** : Les interventions préventives permettent d'augmenter la longévité des ouvrages, retardant ainsi les investissements nécessaires pour leur remplacement.
- **Optimisation des ressources** : Une planification efficace des opérations de maintenance permet une meilleure allocation des ressources humaines et matérielles, évitant les interventions d'urgence souvent plus coûteuses.

Mise en œuvre en Algérie :

Des entreprises spécialisées, telles que la Société Algérienne des Ponts et Travaux d'Arts (SAPTA), proposent des services de maintenance préventive et corrective pour les infrastructures en béton armé. Leur expertise locale leur permet d'adapter les stratégies de maintenance aux spécificités climatiques et environnementales de l'Algérie (EPE SAPTA, 2025).

En conclusion, la mise en place d'une maintenance préventive efficace est cruciale pour assurer la durabilité des structures en béton armé en Algérie. Elle nécessite une approche proactive, combinant surveillance régulière, techniques de protection adaptées et utilisation de matériaux innovants, afin de minimiser les impacts de la corrosion et d'optimiser les coûts sur le moyen terme.

IV.1.2.3 : Long terme : Investissements durables :

Investir dans des solutions durables est essentiel pour assurer la pérennité des structures en béton armé en Algérie, notamment face aux défis posés par la corrosion des armatures. Ces investissements à long terme visent à intégrer des matériaux innovants, des techniques de construction avancées et des systèmes de surveillance performants dès la phase de conception des ouvrages.

Utilisation de matériaux innovants :

L'adoption de matériaux résistants à la corrosion, tels que les aciers inoxydables ou les armatures en matériaux composites, permet de réduire significativement les risques de dégradation. Ces matériaux offrent une meilleure durabilité face aux environnements agressifs, notamment en présence de chlorures. De plus, l'incorporation d'adjuvants spécifiques dans le béton peut améliorer sa compacité et limiter la pénétration des agents corrosifs.

Techniques de construction avancées :

L'application de méthodes de construction visant à protéger les armatures est cruciale. Par exemple, l'utilisation de revêtements protecteurs sur les barres d'aciers encastrés ou la mise en place de systèmes de protection cathodique peuvent prévenir efficacement la corrosion. Ces techniques contribuent à prolonger la durée de vie des structures en béton armé.

Systèmes de surveillance et de maintenance prédictive :

L'intégration de capteurs et de technologies de surveillance permet un suivi en temps réel de l'état des structures. Ces systèmes détectent précocement les signes de corrosion ou d'autres dégradations, facilitant des interventions ciblées et réduisant les coûts de maintenance. Une telle approche proactive optimise la gestion des infrastructures et prolonge leur durée de service.

Considérations économiques :

Bien que ces investissements initiaux puissent être substantiels, ils se traduisent par des économies significatives à long terme. En réduisant la fréquence et l'ampleur des réparations, les coûts d'entretien sont minimisés. De plus, la durabilité accrue des structures diminue les risques de défaillance, évitant ainsi des dépenses imprévues et garantissant la sécurité des usagers.

En conclusion, l'intégration de solutions durables dès la conception des structures en béton armé est une stratégie judicieuse pour lutter contre la corrosion en Algérie. Ces investissements, bien que conséquents au départ, assurent la longévité des infrastructures, optimisent les coûts de maintenance et renforcent la sécurité des ouvrages (SIKA, 2025).

IV.2. Impact des réparations sur la durabilité des structures :

IV.2.1 : La durabilité :

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

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

- ✓ X0 : aucun risque, correspond à du béton coulé à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est très faible ;
- ✓ XC1 à XC4 : corrosion induite par carbonatation, le risque croissant de 1 à 4 ;

- ✓ XD1 à XD3 : corrosion induite par des chlorures autres que marins ;
- ✓ XS1 à XS3 : corrosion induite par des chlorures provenant de l'eau de mer ; ü XF1 à XF4 : gel et dégel, avec ou sans sels de déverglaçage ; ü XA1 à XA3 : attaques chimiques.

En fonction de l'environnement de l'ouvrage et des risques d'agression auxquels il va être exposé pendant sa durée de service, on optimise ensuite les performances du béton, sa durabilité et l'enrobage des armatures (l'enrobage est l'épaisseur de béton qui protège les armatures métalliques les plus proches de la surface).

Les essais de durabilité sont de deux types :

- Indicateurs de durabilité caractérisant les propriétés du béton en relation avec la résistance aux agressions extérieures et permettant d'alimenter des modèles de vieillissement (exemple : coefficient de diffusion des ions chlore vis-à-vis de la protection des armatures en milieu marin) ;
- Essais de vieillissement accéléré (exemple : carbonatation accélérée) (Emmanuel Rozière, 2007)

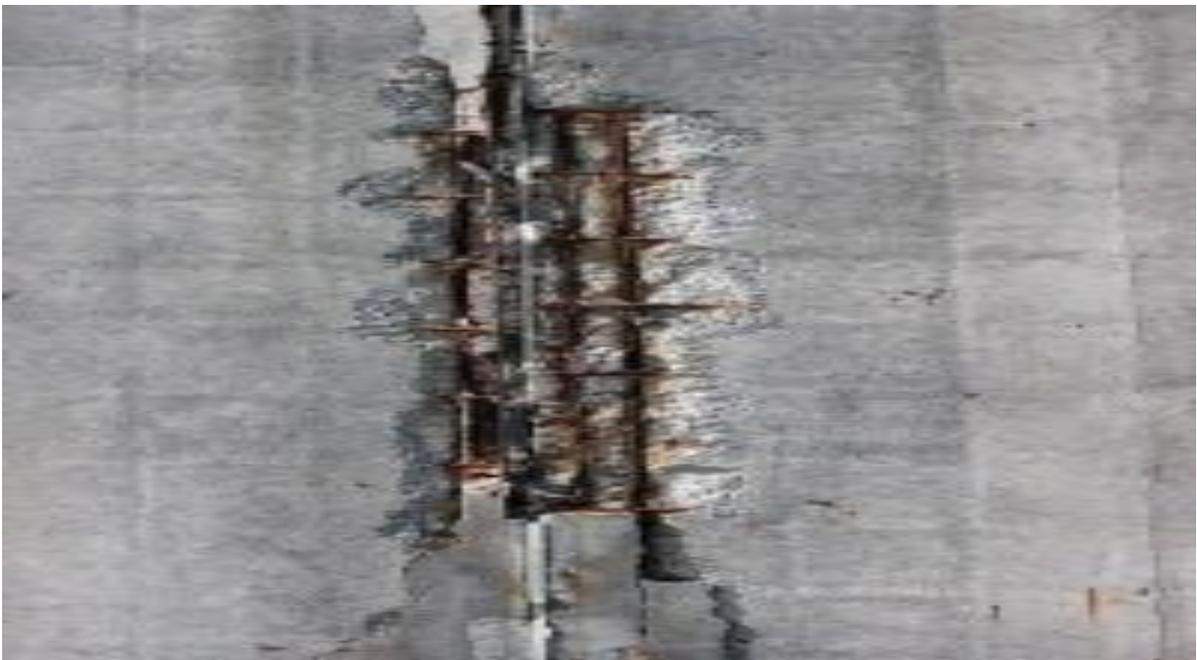


Figure IV. 1 Carbonatation du béton

IV.2.2 : Impact des réparations sur la durabilité des structures :

Les réparations des structures en béton ont un impact direct sur leur durabilité. Une réparation bien conçue et exécutée peut prolonger la vie utile d'une structure, tandis qu'une réparation inadéquate peut aggraver les problèmes existants et réduire la durabilité globale.

1. Importance d'une évaluation préalable :

Avant d'entreprendre des réparations, il est essentiel de comprendre les causes profondes des dégradations. Les facteurs tels que la corrosion des armatures, les cycles de gel-dégel et les défauts de conception peuvent affecter la durabilité du béton. Une analyse approfondie permet de choisir la méthode de réparation la plus appropriée (Infociments, 2025).

2. Méthodes de réparation et leur impact sur la durabilité (Emmanuel Rozière, 2007) :

Plusieurs techniques de réparation influencent la durabilité des structures :

- **Injection de résines** : Cette méthode scelle les fissures et restaure l'intégrité structurelle. Cependant, une mauvaise application peut entraîner un décollement de la couche réparatrice, compromettant la durabilité
- **Application de mortiers de réparation** : Remplacer le béton dégradé avec des mortiers adaptés protège les armatures exposées et améliore la durabilité. L'utilisation de polymères dans ces mortiers peut renforcer l'adhérence et la résistance aux agressions extérieures.
- **Renforcement par matériaux composites** : L'ajout de polymères renforcés de fibres peut améliorer la capacité portante et la résistance aux agressions extérieures. Cette approche peut restaurer et même améliorer les performances des structures endommagées.

3. Facteurs influençant la durabilité des réparations (S. HAOUARA, A. GUETTALA, 2025)

:

Plusieurs éléments déterminent la réussite et la longévité des réparations :

- **Qualité des matériaux** : L'utilisation de matériaux conformes aux normes garantit une meilleure performance. Des matériaux de haute qualité réduisent le risque de dégradation prématurée

- **Compétence des intervenants** : Une mise en œuvre par des professionnels qualifiés assure le respect des procédures et des bonnes pratiques, ce qui est essentiel pour la durabilité des réparations.
- **Entretien post-réparation** : Un suivi régulier permet de détecter et de traiter rapidement d'éventuelles anomalies, prolongeant ainsi la durée de vie de la structure.

4. Considérations environnementales et économiques :

Opter pour la réparation plutôt que la démolition et la reconstruction présente des avantages notables :

- **Réduction des déchets** : Moins de matériaux sont envoyés en décharge, diminuant l'empreinte écologique du projet.
- **Économies financières** : Les coûts associés aux réparations sont généralement inférieurs à ceux d'une reconstruction complète.

En somme, des réparations bien planifiées et exécutées contribuent significativement à la durabilité des structures en béton, tout en offrant des avantages environnementaux et économiques substantiels.

IV.3. Étude des implications environnementales :

Définition :

Une **Étude d'Impact Environnemental (EIE)** dans le domaine de la construction est une analyse approfondie visant à évaluer les effets potentiels d'un projet de construction sur l'environnement. Elle permet d'identifier, d'évaluer et de proposer des mesures pour éviter, réduire ou compenser les impacts négatifs sur les milieux naturels, la santé humaine et les écosystèmes.

IV.3.1. Objectifs de l'EIE (Wattsc, 2025) :

- **Prévention des impacts environnementaux** : identifier les effets potentiels d'un projet sur l'environnement dès les premières étapes de sa conception.
- **Amélioration de la prise de décision** : fournir des informations claires et objectives aux décideurs pour une gestion durable des projets.
- **Renforcement de la transparence et de la participation publique** : impliquer le public et les parties prenantes dans le processus d'évaluation.

- **Conformité réglementaire** : assurer que les projets respectent les normes et législations environnementales en vigueur.

IV.3.2 :Étapes clés de l'EIE ([emwelt.lu, 2025](#)) :

1. **Scoping (définition du périmètre)** : déterminer les aspects environnementaux à évaluer et les méthodes à utiliser.
2. **Collecte et analyse des données** : recueillir des informations sur l'environnement existant et les impacts potentiels du projet.
3. **Évaluation des impacts** : analyser les effets significatifs sur l'environnement et proposer des mesures d'atténuation.
4. **Consultation publique** : organiser des consultations pour recueillir les avis du public et des parties prenantes.
5. **Rédaction du rapport d'EIE** : présenter les résultats de l'évaluation et les mesures proposées.
6. **Prise de décision** : les autorités compétentes examinent le rapport et décident de l'autorisation ou non du projet.

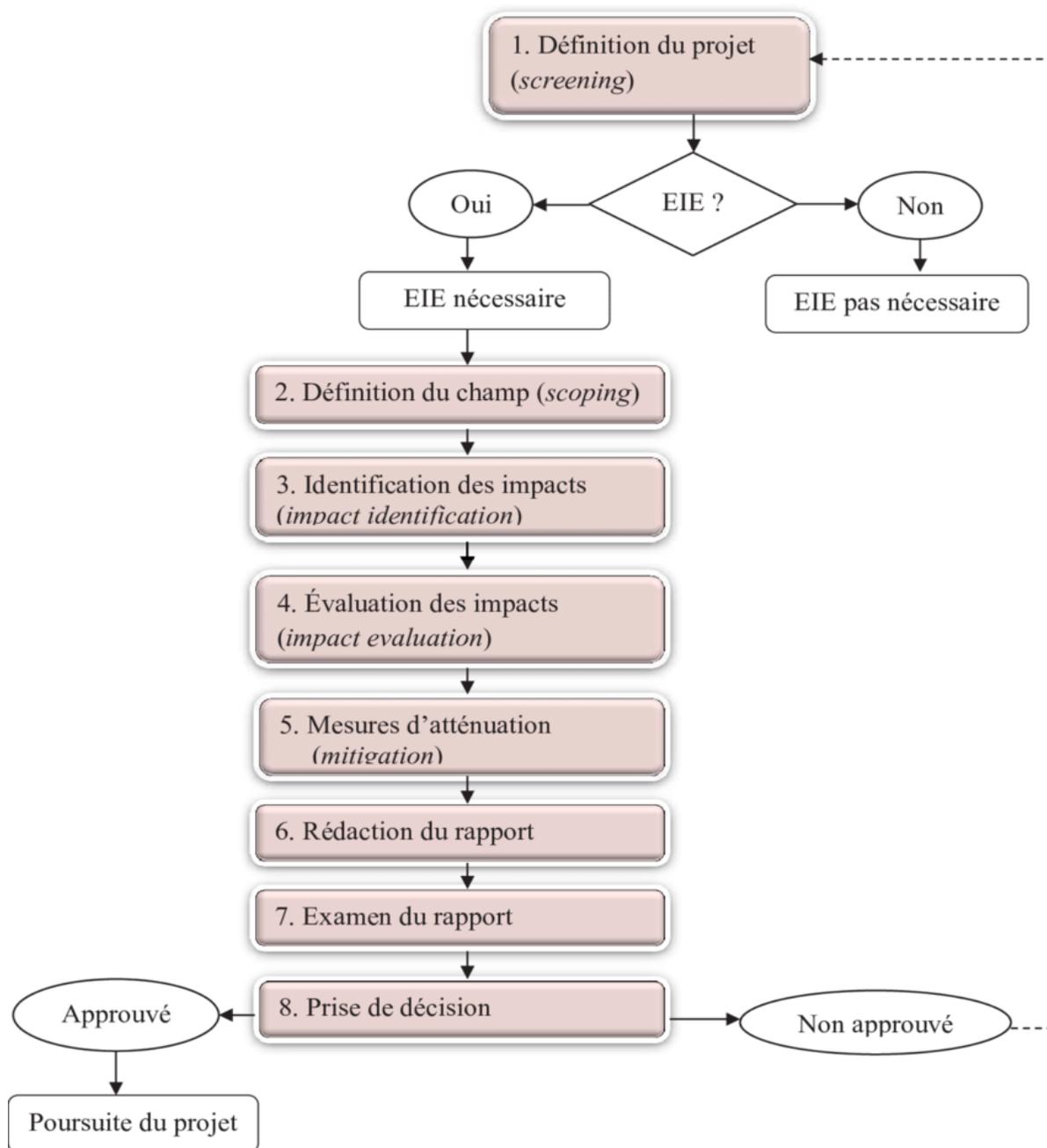


Figure IV. 2: Différentes étapes de la procédure d'EIE (adapté de Larrey-Lassalle et al., 2017)

Ce schéma, adapté de (Kouadio Yao, 2018), illustre les différentes phases de la procédure d'EIE, depuis la définition du projet jusqu'à la prise de décision finale.

IV.3.3.Cadre juridique en Algérie :

En Algérie, l'EIE est régie par le **Code de l'Environnement**, notamment les articles L122-1 à L122-3-4, qui définissent les projets soumis à cette procédure. Les projets susceptibles d'avoir des impacts significatifs sur l'environnement doivent faire l'objet d'une étude d'impact préalable. Cette

procédure vise à garantir que les projets respectent les normes environnementales et contribuent au développement durable du pays (Code de l'environnement, 2025).

Conclusion :

L'évaluation des coûts de réparation de la corrosion dans les structures en béton armé a permis de mettre en évidence l'importance de la planification et du choix judicieux des techniques d'intervention. Les résultats obtenus montrent que le coût moyen d'une réparation peut varier sensiblement selon la gravité des désordres, la nature des matériaux utilisés et les méthodes de mise en œuvre.

La main-d'œuvre représente une part significative des dépenses, particulièrement dans les zones où la disponibilité de personnel qualifié est limitée. Les matériaux spécifiques, tels que les mortiers techniques, les inhibiteurs de corrosion ou les revêtements protecteurs, bien que plus onéreux à l'achat, offrent des performances durables qui justifient leur emploi dans une stratégie de maintenance à long terme. Par ailleurs, l'analyse comparée des scénarios à court, moyen et long terme met en évidence l'intérêt d'investir dans des solutions durables et préventives, susceptibles de réduire le cycle des réparations répétitives et d'optimiser les budgets alloués à la maintenance des ouvrages. En définitive, une approche intégrée, combinant diagnostic approfondi, choix de matériaux performants et suivi régulier, apparaît comme la voie la plus pertinente pour garantir la pérennité des infrastructures tout en maîtrisant les coûts. Cette vision s'inscrit pleinement dans les exigences de durabilité, de sécurité et de gestion rationnelle des ressources imposées au secteur du génie civil en Algérie.

Conclusion Générale

Conclusion générale

La corrosion des armatures en acier dans les structures en béton armé représente un défi critique pour la durabilité et la sécurité des infrastructures, particulièrement en Algérie, où les conditions climatiques et les défauts de mise en œuvre exacerbent ce phénomène. Résultant d'interactions physico-chimiques complexes, ce processus évolue en deux phases : une incubation silencieuse, où les agents agressifs comme les chlorures ou l'humidité pénètrent le béton, suivie d'une propagation marquée par des fissures et une perte d'adhérence entre l'acier et le béton, compromettant la capacité portante des ouvrages.

L'étude menée au Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf de Mila illustre ces enjeux, révélant une détérioration avancée due à des matériaux de qualité insuffisante, confirmée par des essais non destructifs.

Cette expérience souligne l'importance d'un diagnostic précis, combinant observation visuelle et outils avancés, pour concevoir des réparations ciblées, comme le traitement des armatures et la reconstitution des surfaces, tout en optimisant les ressources.

Les coûts de ces interventions, incluant main-d'œuvre qualifiée et matériaux spécialisés comme les mortiers techniques ou les inhibiteurs de corrosion, sont significatifs mais justifiés par leur contribution à la longévité des structures.

Une analyse des scénarios à court, moyen et long terme montre que des solutions préventives, telles qu'une formulation soignée du béton, un enrobage adéquat et des revêtements protecteurs, réduisent les cycles de réparations coûteuses.

Au-delà des aspects techniques, la gestion proactive du patrimoine bâti, ancrée dans une culture d'entretien régulier et de sensibilisation à la qualité des matériaux, est essentielle pour éviter des risques inacceptables.

En Algérie, intégrer des approches durables, comme l'utilisation de matériaux résistants ou l'architecture bioclimatique adaptée aux ressources locales, ouvre la voie à une construction plus résiliente.

Ainsi, une stratégie globale combinant diagnostic approfondi, choix judicieux de techniques et suivi continu garantit la pérennité des infrastructures, tout en répondant aux exigences de sécurité, d'économie et de durabilité dans un contexte de contraintes environnementales et budgétaires.

I. Synthèse des résultats obtenus :

L'essai non destructif par ultrasons réalisé le 14 avril 2025 a permis d'évaluer la qualité du béton d'une structure existante. Les observations visuelles ont révélé une ségrégation importante du béton ainsi qu'une absence d'enrobage des armatures, compromettant ainsi la durabilité et la protection contre la corrosion. Les mesures ont donné un temps de propagation de **173,4 μ s** pour une distance de 30 cm en configuration directe, et de **107,6 μ s** pour une distance de 18,03 cm en configuration indirecte. Ces valeurs correspondent à des vitesses de propagation respectives de **1730,10 m/s** (directe) et **1675,65 m/s** (indirecte). Étant bien inférieures au seuil de **3000 m/s** requis pour un béton de qualité acceptable, ces résultats indiquent que le béton en place est de **mauvaise qualité**. Une intervention de réparation ou de renforcement est donc fortement recommandée afin d'assurer la sécurité et la durabilité de la structure.

II. Réponse à la problématique :

Pour répondre à la problématique de la durabilité des structures en béton armé face à la corrosion des armatures, notamment dans le contexte du Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf de Mila, il est essentiel d'adopter une approche intégrée englobant le diagnostic, la réparation et l'entretien préventif. Voici une synthèse des stratégies recommandées, appuyées par des références scientifiques pertinentes :

1. Diagnostic de la corrosion :

Un diagnostic précis est la première étape pour évaluer l'état des structures et planifier des interventions appropriées. Les méthodes recommandées incluent :

- **Mesure du potentiel de corrosion** : Cette méthode permet d'identifier les zones à risque en évaluant le potentiel électrochimique des armatures.
- **Mesure de la résistivité électrique du béton** : Elle évalue la capacité du béton à conduire l'électricité, ce qui est lié à sa teneur en eau et en ions, facteurs influençant la corrosion.

- **Essais de carbonatation et de teneur en chlorures** : Ces tests déterminent la profondeur de la carbonatation et la concentration en chlorures, deux facteurs majeurs de la corrosion des armatures.
- **Techniques non destructives** : L'utilisation de méthodes telles que l'imagerie radar permet de détecter les défauts internes sans endommager la structure.

2. Techniques de réparations adaptées :

Les interventions doivent être choisies en fonction de l'étendue des dommages et des contraintes spécifiques du site. Les options incluent :

- **Réparation traditionnelle** : Cela implique le remplacement ou le renforcement des armatures corrodées, suivi de la restauration du béton d'enrobage
- **Traitements électrochimiques** : La protection cathodique par courant imposé est une méthode efficace pour arrêter la corrosion en inversant le courant électrique responsable de celle-ci
- **Utilisation d'inhibiteurs de corrosion** : Ces produits chimiques ralentissent la corrosion en formant une couche protectrice sur les armatures.

Il est crucial de sélectionner la méthode de réparation en tenant compte des conditions environnementales locales et des ressources disponibles.

3. Entretien préventif et durabilité des réparations :

Pour assurer la longévité des structures, un programme d'entretien préventif est indispensable :

- **Surveillance régulière** : Mettre en place un système de suivi pour détecter rapidement les signes de corrosion ou de dégradation.
- **Contrôle de l'humidité** : Assurer une bonne étanchéité des structures pour limiter la pénétration de l'eau, facteur clé de la corrosion.
- **Utilisation de matériaux durables** : Lors des réparations, privilégier des matériaux résistants à la corrosion pour prolonger la durée de vie des structures.

Des fiches pratiques sur l'entretien des ouvrages en béton armé sont disponibles sur le site de GC Algérie.

4. Adaptation au contexte local :

Dans des environnements spécifiques comme celui de Mila, il est essentiel d'adapter les stratégies en fonction des conditions climatiques, des matériaux disponibles et des contraintes économiques. Une approche personnalisée garantit l'efficacité des interventions et la durabilité des structures.

En conclusion, une gestion proactive combinant diagnostic précis, réparations adaptées et entretien régulier est essentielle pour préserver la durabilité des structures en béton armé face à la corrosion des armatures. L'adaptation des stratégies au contexte local, comme celui du Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf de Mila, est cruciale pour garantir la sécurité et la pérennité des infrastructures.

III. Recommandations pour les gestionnaires de structures :

Voici des recommandations clés pour les gestionnaires de structures en génie civil, afin d'assurer une gestion efficace, durable et conforme aux normes :

1. Planification stratégique et gestion des ressources :

- **Établir des indicateurs de performance (KPI)** : Suivez le taux d'utilisation des ressources, la productivité, les coûts réels par rapport aux prévisions et le respect des délais.
- **Utiliser des outils de gestion de projet** : Des logiciels comme MS Project ou Primavera P6 permettent de planifier, suivre et ajuster les ressources en temps réel.
- **Réallouer les ressources efficacement** : Ajustez les plannings et les affectations en fonction de l'avancement réel du projet et des imprévus (Rababe NADIR, 2024).

2. Adoption du BIM (Building Information Modeling):

- **Centraliser les données du projet** : Le BIM facilite la coordination entre les équipes en fournissant une vision globale et actualisée du projet.
- **Utiliser des logiciels adaptés** : Des outils comme Autodesk Revit, ArchiCAD ou Tekla Structures permettent une modélisation 3D précise et une gestion efficace des modifications.
- **Former les équipes** : Assurez-vous que tous les membres maîtrisent les outils BIM pour une collaboration optimale (Rababe NADIR, 2024).

3. Communication et collaboration efficaces :

- **Mettre en place des plateformes collaboratives** : Des solutions comme Civalgo permettent une communication fluide entre les équipes, avec des mises à jour en temps réel et une centralisation des informations.
- **Standardiser les processus** : Utilisez un lexique commun et des procédures claires pour éviter les malentendus et améliorer la coordination (Rababe NADIR, 2024).

4. Gestion proactive des risques :

- **Identifier les risques potentiels** : Pénurie de main-d'œuvre, retards de livraison, pannes d'équipements, conflits sociaux, etc.
- **Mettre en place des stratégies de mitigation** : Ayez des fournisseurs alternatifs, prévoyez des équipements de secours et constituez une réserve budgétaire pour les imprévus (Rababe NADIR, 2024).

5. Conformité aux normes et réglementations :

- **Respecter les codes du bâtiment** : Assurez-vous que tous les plans et constructions sont conformes aux normes en vigueur pour garantir la sécurité et éviter les sanctions.
- **Se conformer aux réglementations environnementales** : Effectuez des évaluations d'impact environnemental et obtenez les permis nécessaires avant le début des travaux (Hossam Zakaria, 2024).

6. Intégration du développement durable :

- **Utiliser des matériaux écologiques** : Privilégiez les matériaux recyclables et à faible impact environnemental.
- **Optimiser la consommation d'énergie** : Mettez en place des pratiques pour réduire la consommation énergétique sur les chantiers.
- **Réduire les déchets** : Adoptez des méthodes de construction qui minimisent les déchets et favorisent le recyclage (Rababe NADIR, 2024).

7. Suivi et amélioration continue :

- **Analyser les retours d'expérience** : À la fin de chaque projet, évaluez les performances et identifiez les axes d'amélioration.

- **Mettre à jour les processus** : Adaptez vos méthodes de gestion en fonction des enseignements tirés pour améliorer l'efficacité des projets futurs.

IV. Perspectives pour des recherches futures :

1. Intégration des jumeaux numériques dans la gestion des structures :

Les jumeaux numériques permettent une surveillance en temps réel, une maintenance prédictive et une prise de décision optimisée pour les infrastructures. Des recherches récentes proposent des cadres intégrant des modèles probabilistes et des réseaux bayésiens dynamiques pour améliorer la gestion des structures.

2. Intelligence artificielle et collaboration humain-machine :

L'intégration de l'intelligence artificielle (IA) dans le génie civil ouvre la voie à une collaboration efficace entre les humains et les machines. Des études interdisciplinaires examinent les opportunités et les défis de cette intégration, soulignant la nécessité de recherches futures pour maximiser les bénéfices de l'IA dans ce domaine

3. Stratégies de maintenance optimisées via l'apprentissage par renforcement :

L'utilisation de l'apprentissage par renforcement profond, combiné à des réseaux bayésiens, permet de développer des stratégies de maintenance optimales pour les systèmes de génie civil soumis à la détérioration. Cette approche offre des avantages significatifs par rapport aux méthodes heuristiques traditionnelles

4. Adoption stratégique des jumeaux numériques dans les phases du génie civil :

Bien que les jumeaux numériques soient largement utilisés dans les phases de conception et d'exploitation, leur adoption reste limitée pendant la phase de construction. Des recherches suggèrent de reconsidérer les stratégies d'adoption pour intégrer les jumeaux numériques tout au long du cycle de vie des projets de génie civil (Taiwo A. Adebisi et al, 2024).

5. Innovation et durabilité dans les PME du secteur de la construction :

Les petites et moyennes entreprises (PME) du secteur de la construction jouent un rôle crucial dans l'innovation et la transition vers des pratiques durables. Cependant, elles font face à des défis tels que le manque de ressources pour la recherche et le développement. Des études mettent en

évidence la nécessité de collaborations intersectorielles pour surmonter ces obstacles et promouvoir l'innovation durable (PME et Innovation, 2024).

6. Formation et développement des compétences pour l'avenir du génie civil :

Avec l'évolution rapide des technologies et des méthodes de travail, il est essentiel de former les futurs ingénieurs aux compétences requises pour le génie civil de demain. Cela inclut la maîtrise des outils numériques, la compréhension des enjeux environnementaux et la capacité à innover dans des contextes complexes (Ben Othman, A, 2023).

Ces axes de recherche offrent des opportunités pour améliorer la gestion des structures en génie civil, en intégrant les avancées technologiques, en répondant aux défis environnementaux et en favorisant l'innovation au sein du secteur.

Références

- A, LAICHAOUI. (2006). « Analyse expérimentale du comportement des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites », mémoire de magister.
- A, KREIT. (2015). « *Prolongation de la durée de vie des ouvrages en béton armé* », thèse De doctorat. Universités de TOULOUSE, France.
- A, MAZAHERI et al. (2011). « Renforcement parasismique du bâtiment existant » : guide méthodologique.
- A. AIT TAFATI. (2017). «Réparation des poutres en béton armé endommagées à l'aide des matériaux composites hybrides», Mémoire de Master. Boumerdes.
- B. BLACHE, JEAN-D. MERLET. (1993). " *Comment réparer le béton armé*", *Cahiers techniques du bâtiment*. Editions du Moniteur.
- Ben Othman, A. (2023, 03 17). Perspectives et rôles de l'Ingénieur dans les projets de construction. Récupéré sur <https://www.linkedin.com/pulse/perspectives-et-r%25C3%25B4les-de-ling%25C3%25A9nieur-dans-les-projets-ben-othman/?trackingId=eBmzdLP%2BTa2XpsGdzCSk1g%3D%3D>
- Bensaada, S. (2015). *Cours de corrosion*. Polycopié. OPU, P/n° 5267. doi:<https://opu.dz/fr/livre/mines-et-m%3%A9tallurgie/cours-de-corrosion>
- Boonyan Info . (2024, Janvier 07). Récupéré sur https://www.facebook.com/photo/?fbid=336670949259181&set=a.103570265902585&locale=fr_FR
- C. DÍAZ GÓMEZ. (2012). Les techniques de réhabilitation : renforcer les structures. Récupéré sur <https://www.anco.pro/wp-content/uploads/2012/11/2e-partie.-Outil8.pdf>
- Code de l'environnement. (2025). Code de l'environnement. Récupéré sur https://www.legifrance.gouv.fr/codes/texte_lc/LEGITEXT000006074220/
- CRAGP. (1992, premier semestre). Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, «Recommandations techniques pour la réparation et le renforcement des ouvrages».
- CUM. (2025). Centre Universitaire de Maghnia. Plateforme e-learning CU Maghnia. Maghnia, Algerie.
- Daufin, G., & Talbot, J. (1971). Etude de quelques problèmes de corrosion dans l'industrie laitière. Première partie. Généralités sur la corrosion des métaux et alliages. . *51*(507), p. 375 398. doi:<https://doi.org/10.1051/lait:1971507>
- DTR B C 2 2. (2012). Charges permanentes et charges d'exploitation. Récupéré sur <https://fr.scribd.com/document/335657986/dtr-bc-2-2-charges-permanentes-et-charges-d-exploitation-pdf>
- DZAYER INFO. (2023, Septembre 15). Les prix officiels des matériaux de construction en Algérie.. Le prix du fer de construction en Algérie. Le prix des matériaux de construction.. Le prix du ciment. Récupéré sur <https://dzayerinfo.com/les-prix-officiels-des-materiaux->

de-construction-en-algerie-le-prix-du-fer-de-construction-en-algerie-le-prix-des-materiaux-de-construction-le-prix-du-ciment/

- EBourse DZ. (2024, Aout 24). «La révision des indices des salaires et matières a pour but de réguler le marché du BTPH». Récupéré sur <https://ebourse.dz/la-revision-des-indices-des-salaires-et-matieres-a-pour-but-de-reguler-le-marche-du-btph/>
- Emmanuel Rozière. (2007). Étude de la durabilité des bétons par une approche performantielle. *Thèse de doctorat, Génie civil, École doctorale mécanique, thermique et génie civil (Nantes) Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (Nantes)*. Récupéré sur <https://theses.fr/2007NANT2125>
- emwelt.lu. (2025). FAQ: Evaluation des incidences sur l'environnement (EIE). Récupéré sur <https://environnement.public.lu/fr/support/faqs/faq-eie-new.html>
- EPE SAPTA. (2025). L'encyclopédie libre.Société Algérienne des ponts et travaux d'arts. Récupéré sur <https://www.facebook.com/100083566530607/photos/579296024865944/>
- FABEM 1. (2021, Décembre). Reprise des bétons dégradés. Récupéré sur https://www.stres.org/wp-content/uploads/2025/01/1_FABEM_2024-compresse.pdf
- FABEM 7. (2011, Novembre). Réparation et renforcement des structures par armatures passives. Récupéré sur https://www.stres.org/wp-content/uploads/2025/01/7_FABEM_2024-compresse.pdf
- Générateur de Prix. (2025). Préparation de la surface des armatures dans des éléments en béton armé. Récupéré sur http://www.algerie.prix-construction.info/renovation/Structure_et_gros_oeuvre/Transformations_et_reparations/P_reparation_des_surfaces_en_beton/GAB020_Preparation_de_surface_en_beton_str_2_0.html
- GPR.A. (2025). Mortier de réparation structurale en béton, à base de résine époxy. Récupéré sur http://www.algerie.prix-construction.info/renovation/Structure_et_gros_oeuvre/Transformations_et_reparations/R_reparation_des_elements_en_beton/GAE060_Mortier_de_reparation_structurale_e.html
- Hossam Zakaria. (2024, 06 04). Meilleures pratiques juridiques pour la gestion de projets de construction. *droit de la construction*. Récupéré sur <https://hzlegal.ae/fr/legal-best-practices-for-construction-project/>
- Houst, Y. F. (1989). Le retrait de carbonatation. *Chantiers* ., 20, pp. 55-60. Suisse. Récupéré sur https://www.researchgate.net/profile/Yves-Houst/publication/37459778_Le_retrait_de_carbonatation/links/590afc13a6fdcc4961795225/Le-retrait-de-carbonatation.pdf
- Infociments. (2025). Réparation des ouvrages en béton armé dégradés par corrosion des armatures. Récupéré sur <https://www.infociments.fr/genie-civil/reparation-des-ouvrages-en-beton-arme-degrades-par-corrosion-des-armatures>
- Kouadio Yao. (2018). Développement d'une méthodologie pour une meilleure évaluation des impacts environnementaux de l'industrie extractive. Récupéré sur https://www.researchgate.net/publication/324121286_Developpement_d%27une_method

ologie_pour_une_meilleure_evaluation_des_impacts_environmentaux_de_1%27industrie_extractive/figures

- La Sentinelle. (2025, 04 10). Barrage de Beni Haroun (Mila) : Feu vert à l'extension des surfaces agricoles irriguées. Récupéré sur <https://lasentinelle.dz/index.php/2025/04/10/barrage-de-beni-haroun-mila-feu-vert-a-lextension-des-surfaces-agricoles-irriguees/>
- L'Algérie Aujourd'hui. (2023, Aout 30). Chute des prix du ciment et du rond à béton : Une opportunité pour la relance du bâtiment. Récupéré sur <https://lalgerieaujourd'hui.dz/chute-des-prix-du-ciment-et-du-rond-a-beton-une-opportunite-pour-la-relance-du-batiment/>
- LCPC. (2002). Guide technique. Protection des bétons par application de produits à la surface du parement : (inhibiteurs de corrosion, produits d'imprégnation, lasures, peintures, revêtements).
- MaBricole. (2025). Récupéré sur https://www.mabricole.com.dz/fr/accueil?srsltid=AfmBOoqlDh20Ka3myODmxDdLVpkAvcTVv1zn8Ftt5PmCLaWrw_i7Tqv?srsltid=AfmBOoqlDh20Ka3myODmxDdLVpkAvcTVv1zn8Ftt5PmCLaWrw_i7Tqv
- Mehta, P.K. (1980). Performance of concrete in marine environment, ACI SP-65. Dans S. I. PL01 (Éd.), (pp. 1-20). Récupéré sur <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1204&context=icdcs>
- P. Pedferri. (1996, July). "Cathodic Protection and Cathodic Prevention," Construction and Building Material. 10(5), 391-402. doi:10.1016/0950-0618(95)00017-8
- PME et Innovation. (2024). PME et Innovation : les perspectives pour le secteur de la construction. Récupéré sur <https://www.cercle-promodul.inef4.org/publication/pme-et-innovation-les-perspectives-pour-le-secteur-de-la-construction/>
- Projet Diamond. (2025). Maintenance des ouvrages de Génie civil. Récupéré sur <https://www.projet-diamond.com/maintenance-des-ouvrages>
- R. BOUKELOUHA. (2014, 06 05). Pour un projet urbain stratégique à Mila, la cohérence urbaine et la question foncière. MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER EN URBANISME. Sous la direction de : Pr. LABII Belkacem.
- Rababe NADIR. (2024). La gestion des ressources en génie civil : Un guide complet pour les conducteurs de travaux. Récupéré sur <https://geotechniquehse.com/gestion-ressources-construction/>
- S. HAOUARA, A. GUETTALA. (2025, Avril 21). LES FACTEURS D'INFLUENCE SUR LADÉGRADATION DES OUVRAGES EN BÉTON ARME DANS LA RÉGION DE BISKRA. *Courrier du Savoir*, v. 6, avr. 2014. ISSN 1112-3338. Récupéré sur <https://revues.univ-biskra.dz/index.php/cds/article/view/329>
- Shamsad, A. (2003). "Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction-a review . 25(May-July), pp. 459-471.
- SIKA. (2025). Sika MonoTop®-620 F. Récupéré sur <https://dza.sika.com/fr/construction/reparation-du-beton/sika-monotop-620f.html>

- STI Algerie. (2025). Revêtements anti-corrosion. Récupéré sur <https://sti-algerie.com/revetements-anti-corrosion/>
- Tache G. & Vie D. (1998). Diagnostic des ouvrages en béton armé, facteurs de vieillissement des ouvrages, Centre expérimental du bâtiment et des travaux publics. *Annales du bâtiment et des travaux publics*.
- Taiwo A. Adebisi et al. (2024, 08 07). Digital Twins and Civil Engineering Phases: Reorienting Adoption Strategies. *Computational Engineering, Finance, and Science*. doi:<https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.02426>
- Tuutti, K. (1982). *Corrosion of steel in concrete*. [Doctoral Thesis (monograph), Division of Building Materials], 468. (S. C. Institute, Éd.) Stockholm. Récupéré sur <https://lucris.lub.lu.se/ws/files/4709458/3173290.pdf>
- Wattsc. (2025). Etude d'impact environnemental . Récupéré sur <https://wattsc.com/service/etude-dimpact-sur-lenvironnement/>
- Z E A, Ould El Hacem. (2016). «renforcement du béton par les matériaux composites», Mémoire de Master.