

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Hamma Lakhdar -El Oued-

Faculté de Technologie

Département D'Hydraulique et de Génie civil



جامعة حمه لخضر - الوادي -

كلية التكنولوجيا

قسم الري والهندسة المدنية

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

**Master**

**en génie civil**

Option : **Matériaux de Construction**

Thème

***ETUDE DE LA CORROSION DES  
INFRASTRUCTURES SOUS L'EFFET DES  
EAUX AGRESSIVES ET/OU SOLS AGRESSIFS***

**Présenté par** : Tliba Mohammed

**Devant le jury:**

|                                |                               |                    |
|--------------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Dr SOULIMANE Ilyas : Examineur | Maitre de conférence classe B | Université El-Oued |
| Meur FARIK Ali : Examineur     | Maitre Assistant Classe A     | Université El-Oued |
| Mme HACHE M Rafika: Rapporteur | Maitre Assistante Classe A    | Université El-Oued |

Année universitaire: 2019/2020

## شكر و تقدير

الحمد لله رب العالمين القائل في محكم التنزيل (وَإِذْ تَأَذَّنَ رَبُّكُمْ لَئِنْ شَكَرْتُمْ لَأَزِيدَنَّكُمْ) وَعَنْ أَبِي هُرَيْرَةَ عَنِ النَّبِيِّ ﷺ قَالَ: «لَا يَشْكُرُ اللَّهُ مَنْ لَا يَشْكُرُ النَّاسَ»  
فالحمد لله الذي وفقني لإتمام هذا العمل المتواضع

ثم أشكر بجملة ما أطرق السيد هاشم رفيقة ، الأستاذة في جامعة حمه لخضر بالوادي على الشرف الذي قدمه لي بقبوله قيادتها هذا العمل ، وأشكرها جزيل الشكر على مساعدتها ونصائحها وتوجيهاتها السليمة حتى أتمكن من استكمال هذا العمل .

أشكر أساتذتي كل بسمه:

الدكتور: سليمان إلياس

الدكتور: جديد طارق

الدكتور: ماني محمد

الدكتور: كعب محمد زهير

الأستاذ: علي فريك

ولجميع أساتذتي الذين ساهموا في تكوين للوصول إلى هذا الموضوع.

أتوجه بالشكر أيضاً إلى كل المهندسين المشرفين هيئة المراقبة التقنية الموارد المائية فرع الوادي CTH على

جميع المعلومات التي تمكنوا من تزويدنا بها ودعمهم.

أتوجه بالشكر أيضاً لصديقي و زميلي زيتوني فريد لإعانتته لي.

أتوجه بالشكر أيضاً لصديقي و زميلي زريق الطاهر لمساندته و نصائحه.

## الإهداء

الحمد لله تعالى على كل ما منحني إليه حتى أنهي هذه المذكرة

بادئ ذي بدء ، أود أن أهدي هذا العمل لكل الطلاب الأجيال القادمة ، لكل من يبحث عن العلم لكل من

يريد أن يستفيد في حياته المهنية.

أخيراً ، أكرس هذا العمل المتواضع لعائلتي وخاصة والديّ وروح أبي ، ولأرواح شهداء الوطن .

## RESUMÉ

Le béton armé est largement utilisé dans le domaine de la construction car c'est un matériau résistant, économique et durable avec une mise en œuvre assez simple. Cependant le béton est un matériau qui se dégrade au cours du temps en réagissant avec son environnement. Parmi les pathologies du béton armé la corrosion des aciers est un des problèmes les plus étudiés. Les principales conséquences de la corrosion sur la sécurité de l'ouvrage sont la perte de section, la perte de ductilité de l'acier et la perte d'adhérence acier-béton, qui entraînent la défaillance de la structure en béton armé.

L'évaluation de la teneur en eau et de son gradient est donc une étape importante pour le diagnostic des structures en béton armé.

Dans le cadre de ce travail nous avons élaboré un état de lieu de quelques ouvrages corrodés dans la région d'El Oued (Sud Est de l'Algérie), cette étude est réalisée premièrement après une synthèse bibliographique qui porte essentiellement sur le phénomène de la corrosion dans les ouvrages en béton armé et son diagnostic, deuxièmement on a expliqué les méthodes de réparation et de prévention pour rendre l'ouvrage capable de fonctionner .

Où nos efforts ont été orientés vers une étude analytique qui comprenait un réservoir d'eau ( château d'eau) dans la ville d'EL-OUED Commune Oued El Alanda, où nous sommes passés par les étapes suivantes:

- \* Recherche approfondie des causes probables des désordres constatés.
- \* Mécanisme de dégradation par le principal agent agressif.
- \* Solution technique de réparation et de prévention.

Après ce diagnostic qui est basé sur une inspection visuelle, nous avons proposé une simple méthode de réparation qui consiste à un chemisage ou l'utilisation d'un mortier de réparation suivant le cas rencontré afin de remplacer le béton décollé.

**Mots clés:** La corrosion, les effets de sol et eaux, milieu agressives, electrochemical réactions.

## ABSTRACT

Reinforced concrete is widely used in the construction industry because it is a strong, economical and durable material with a fairly simple implementation. However concrete is a material which degrades over time by reacting with its environment. Among the pathologies of reinforced concrete, corrosion of steels is one of the most studied problems. The main consequences of corrosion on the safety of the structure are the loss of section, the loss of ductility of the steel and the loss of steel-concrete adhesion, which lead to the failure of the reinforced concrete structure.

The evaluation of the water content and its gradient is therefore an important step for the diagnosis of reinforced concrete structures.

As part of this work we have drawn up an inventory of some corroded structures in the region of El-Oued (South East of Algeria), this study is carried out first after a bibliographical synthesis which mainly relates to the phenomenon of corrosion in reinforced concrete structures and its diagnosis, secondly we explained the repair and prevention methods to make the structure capable of functioning.

Where our efforts were directed towards an analytical study which included a water reservoir (water tower) in the town of EL-OUED Commune Oued El Alenda, where we went through the following stages:

- \* In-depth research into the probable causes of the disorders observed.
- \* Mechanism of degradation by the main aggressive agent.
- \* Technical solution for repair and prevention.

After this diagnosis, which is based on a visual inspection, we proposed a simple repair method consisting of a lining or the use of a repair mortar, depending on the case encountered, to replace the loose concrete.

**Key words:** Corrosion, soil and water effects, aggressive environment, Réactions électrochimiques.

## ملخص

تستخدم الخرسانة المسلحة على نطاق واسع في صناعة البناء لأنها مادة قوية واقتصادية رغم مكوناتها و تكوينها البسيط. ومع ذلك فإن الخرسانة مادة تتحلل بمرور الوقت من خلال التفاعل مع بيئتها فمن بين أمراض الخرسانة المسلحة تآكل الفولاذ حيث أنه واحد من أكثر المشاكل التي تمت دراستها. وهو مشكل رئيسي الذي يؤثر على سلامة الهيكل، بحيث فقدان ليونة الفولاذ مع فقدان التصاق الفولاذ مع الخرسانة يؤدي إلى انهيار الهيكل أو إنهاء عملية.

ففي الواقع تتطلب التفاعلات الكيميائية وكذلك تغلغل العوامل العدوانية في الخرسانة وجود الماء. لذلك يعتبر تقييم محتوى الماء خطوة مهمة لتشخيص الهياكل الخرسانية المسلحة في إطار هذا العمل قمنا بانجاز دراسة على منشئ تعرض للصدأ في منطقة الوادي ( جنوب شرقي الجزائر). هذه الدراسة أنجزت أولاً بعد بحث مكتبي انصب أساساً حول ظاهرة الصدأ في المنشآت الخرسانية المسلحة و تشخيصها ، وكذا قمنا بشرح طرق الإصلاح والوقاية من اجل إعادة المنشأ للاستغلال. حيث تم توجيه جهودنا نحو دراسة تحليلية تضمنت خزان مياه (برج مياه) في بلدية واد العلندة بولاية الوادي ، حيث مررنا بالمراحل التالية:

\* بحث دقيق عن الأسباب المحتملة للأضرار المسجلة.

\* آلية الانهيار بواسطة العامل العدائي الرئيسي.

\* الحل التقني للإصلاح والوقاية.

وبعد التشخيص الذي يعتمد على الفحص البصري ، اقترحنا طريقة إصلاح بسيطة تتكون من استخدام ملاط خاص للإصلاح ، اعتماداً على الحالة التي تمت مواجهتها ، لاستبدال الخرسانة المتآكلة و الملاط المنفك.

**الكلمات المفتاحية :** الصدداء ، تأثيرات التربة والماء، الأوساط العدوانية ، التفاعلات الكهروكيميائية.

## Table des matières

|                                                                                                            |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduction Générale.....                                                                                 | 1  |
| <b>Chapitre I: Vue d'ensemble de l'infrastructure dans les milieux agressifs</b>                           |    |
| I-1. Introduction.....                                                                                     | 4  |
| I-2. Caractéristiques de performance du bâtiment.....                                                      | 4  |
| I-2-1. Dommages et effondrement des installations.....                                                     | 4  |
| I-2-1.1. Non-respect des précautions techniques et des normes<br>d'ingénierie lors de l'établissement..... | 5  |
| I-2-1.2. Construire dans des zones sujettes aux glissements de terrain.....                                | 5  |
| I-2-1.3. Caractère inapproprié des conceptions structurelles.....                                          | 5  |
| I-2-1.4. Utilisation de matériaux non valides ou non conformes aux<br>spécifications.....                  | 6  |
| I-2-1.5. Erreurs de mise en œuvre.....                                                                     | 7  |
| I-2-1.6. Accidents et traumatismes.....                                                                    | 7  |
| I-2-1.7. Modifications et changements d'usage des bâtiments.....                                           | 7  |
| I-2-1.8. Eau, humidité et négligence de l'imperméabilisation.....                                          | 8  |
| I-2-1.9. Restaurations et agrandissements sans étude.....                                                  | 9  |
| I-2-1.10. Négligence dans la maintenance.....                                                              | 9  |
| I-2-1.11. Corrosion du fer et du béton.....                                                                | 10 |
| I-2-1.12. Problèmes des bâtiments voisins.....                                                             | 10 |
| I-2-1.13. Facteurs climatiques conduisant à l'apparition de déformations<br>du bâtiment.....               | 11 |
| I-2-1.13.1. Humidité.....                                                                                  | 11 |
| A. Humidité relative élevée.....                                                                           | 11 |
| B. L'effet d'une humidité relative faible et semi-constante.....                                           | 11 |
| C. Impact de l'humidité.....                                                                               | 12 |
| D. Les causes de l'humidité.....                                                                           | 12 |
| I-2-1.13.2. Facteurs météorologiques externes.....                                                         | 14 |
| A. Mouvement du vent.....                                                                                  | 14 |
| B. Mouvement thermique.....                                                                                | 15 |
| I-2-1.13.3. Mouvement et fissures résultant de l'humidité et de l'influence                                | 15 |

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| du soleil ou de la chaleur.....                                     | 16 |
| A. Types de Fissures.....                                           | 16 |
| A.1. Fissures non structurales.....                                 | 16 |
| A.1.1. Fissures thermiques.....                                     | 16 |
| A.1.2. Fissures de retrait plastique.....                           | 17 |
| A.1.3. Fissures de retrait par sécheresse.....                      | 17 |
| A.1.4. Fissures dues à la corrosion.....                            | 18 |
| I-3. Conclusion.....                                                | 18 |
| <b>Chapitre II : Corrosion dans le béton armé et son diagnostic</b> |    |
| II-1. Introduction.....                                             | 19 |
| II-2. Le béton arme.....                                            | 19 |
| II-2-1. Historique.....                                             | 19 |
| II-2-2. Le béton.....                                               | 20 |
| II-2-3. L'acier.....                                                | 21 |
| II-2-4. Définition du béton arme.....                               | 23 |
| II-2-5. Les pathologies du béton arme : causes et conséquences..... | 23 |
| II-2-5.1. Les causes physiques de dégradation.....                  | 23 |
| II-2-5.2. Les causes chimiques de dégradation.....                  | 24 |
| II-2-5.3. Les autres causes de dégradation des bétons.....          | 24 |
| II-2-6. Le béton arme en milieu marin.....                          | 25 |
| II-3. La corrosion.....                                             | 27 |
| II-3-1. Généralités.....                                            | 28 |
| II-3-2. La corrosion des aciers dans le béton.....                  | 30 |
| II-3-2.1. Présentation générale.....                                | 30 |
| II-3-2.2. Processus de la corrosion.....                            | 31 |
| II-3-2.3. La dépasseivation des armatures.....                      | 35 |
| II-3-2.4. Facteurs influents sur la corrosion.....                  | 42 |
| II-3-2.4.1. Influence de l'enrobage.....                            | 43 |
| II-3-2.4.2. Influence de la composition du béton.....               | 43 |

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II-3-2.4.3. Influence de l'humidité.....                                           | 44 |
| II-3-2.4.4. Influence de la résistivité du béton.....                              | 44 |
| II-3-2.4.5. Effet de l'oxygène.....                                                | 48 |
| II-3-2.4.6. Autres agents agressifs.....                                           | 48 |
| II-4. Essais non destructifs du béton.....                                         | 49 |
| II-4-1. Introduction.....                                                          | 49 |
| II-4-2. But d'utilisation.....                                                     | 50 |
| II-4-2-1. Principaux domaines d'application.....                                   | 50 |
| II-4-2-1.1. historique.....                                                        | 50 |
| II-4-2-1.2. Avantages des méthodes non destructifs.....                            | 51 |
| II-4-2-1.3. Méthodes D'essais.....                                                 | 51 |
| II-4-3. Essai au scléromètre.....                                                  | 52 |
| II-4-3-1. Principe.....                                                            | 53 |
| II-4-3-2. Appareillage.....                                                        | 54 |
| II-4-3-3. Mode Opératoire.....                                                     | 54 |
| II-4-3-3.1. Préparation de la surface.....                                         | 54 |
| II-4-3-3.2. Points de mesures.....                                                 | 54 |
| II-4-3-4. Méthodes de mesure de l'Indice de rebondissement.....                    | 55 |
| II-4-3-5. Étalonnage de l'appareil.....                                            | 56 |
| II-4-3-5.1. Sur bloc en néoprène armé.....                                         | 56 |
| II-4-3-5.2. Sur éprouvettes de béton.....                                          | 56 |
| II-4-3-6. Inconvénients de la méthode sclérométrique .....                         | 57 |
| II-4-3-7. Interprétation Des Résultats De Contrôle Du Béton Au<br>Scléromètre..... | 58 |
| II-4-3-7. 1. Méthode de la courbe de calibrage.....                                | 58 |
| II-4-3-7. 2. Méthode de la courbe unique.....                                      | 58 |
| II-4-3-7. 3. Références normatives.....                                            | 59 |
| II-4-3-8. Les avantages.....                                                       | 59 |
| II-4-4. Essai d'auscultation dynamique.....                                        | 60 |

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II-4-4-1. Principe.....                                                                          | 60 |
| II-4-4-2. Mode Opérateur.....                                                                    | 63 |
| II-4-4-2.1. Travaux préparatoires.....                                                           | 63 |
| II-4-4-2.2. Points de mesures.....                                                               | 64 |
| II-4-4-3. Distances minimales entre points de mesures.....                                       | 64 |
| II-4-4-4. Étalonnage de l'appareil.....                                                          | 64 |
| II-4-4-5. Manières de mesure.....                                                                | 64 |
| II-4-4-5.1. Mesure en transparence (directe).....                                                | 64 |
| II-4-4-5.2. Mesures en surface (indirecte).....                                                  | 65 |
| II-4-4-5.3. Mesures semi directe.....                                                            | 66 |
| II-4-4-6. Interprétation Des Résultats De Mesure Aux Ultrasons.....                              | 66 |
| II-4-4-6.1. Corrélation entre la vitesse de propagation du son et la<br>résistance du béton..... | 67 |
| II-4-4-6.2. Paramètres influents la vitesse des ultrasons.....                                   | 67 |
| II-4-4-6.3. Autres interprétations possibles.....                                                | 69 |
| II-4-4-7. Références normatives.....                                                             | 70 |
| II-4-4-8. Les avantages.....                                                                     | 70 |
| II-5. Conclusion.....                                                                            | 71 |

### **Chapitre III : Dynamique de traitement et étude de cas**

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| III-1. Introduction.....                                     | 74 |
| III-2. Méthodes de réparation.....                           | 74 |
| III-2-1. Réparation traditionnelle.....                      | 75 |
| III-2-2. Revêtements en surface du béton(Imprégnations)..... | 76 |
| III-2-3. Inhibiteurs de corrosion.....                       | 77 |
| III-2-4. Béton projeté.....                                  | 81 |
| III-2-5. Traitements électrochimiques.....                   | 83 |
| III-2-5.1. Traitement de protection cathodique.....          | 83 |
| III-2-5.1.1. Principe de la protection cathodique.....       | 83 |
| III-2-5.1.2. Développement de la technique.....              | 84 |

|                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| III-2-5.1.3. Application de la protection cathodique.....                                 | 86  |
| A. Protection cathodique par courant imposé.....                                          | 86  |
| B. Protection cathodique par anode sacrificielle (courant galvanique).....                | 88  |
| III-2-5.1.4. Les types d'anode.....                                                       | 90  |
| III-2-5.1.5. Effet de la protection cathodique sur la teneur critique en ions Chlore..... | 92  |
| A. Initiation de la corrosion et sa prévention.....                                       | 92  |
| B. Propagation de la corrosion et son contrôle.....                                       | 94  |
| III-2-5.2. Extraction électrochimique des ions chlores.....                               | 95  |
| III-2-5.2.1. Généralités.....                                                             | 95  |
| III-2-5.2.2. Principe d'extraction électrochimique des ions chlores.....                  | 97  |
| III-2-5.2.3. Efficacité d'extraction des ions chlore.....                                 | 98  |
| III-2-5.3. Effets secondaires des techniques électrochimiques.....                        | 98  |
| III-2-5.3.1. Production d'hydrogène sur la surface d'acier.....                           | 99  |
| III-2-5.3.2. Diminution de l'adhérence acier-béton.....                                   | 99  |
| III-3. Prévention des armatures dans le béton.....                                        | 100 |
| III-3-1. Introduction.....                                                                | 100 |
| III-3-2. Mesures préventives.....                                                         | 101 |
| III-3-2.1. Armatures résistantes à la corrosion.....                                      | 101 |
| III-3-2.1.1. Les armatures en acier inoxydable.....                                       | 101 |
| III-3-2.1.2. Acier micro-composite.....                                                   | 103 |
| III-3-2.2. Revêtement des armatures.....                                                  | 103 |
| III-3-2.2.1. Barres recouvertes d'époxy.....                                              | 103 |
| III-3-2.2.2. Revêtements de l'acier (galvanisation).....                                  | 105 |
| III-3-2.2.3. Faible perméabilité / Diffusivité du béton.....                              | 107 |
| III-4. Étapes à suivre pour réhabiliter une structure en béton armé corrodée.....         | 108 |
| III-5. Cas d'étude.....                                                                   | 110 |
| III-5-1. Introduction.....                                                                | 111 |

|                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| III-5-2. Réhabilitation de deux châteaux d'eau à EL-OUED.....                                        | 112 |
| III-5-2.1. Description des ouvrages.....                                                             | 114 |
| III-5-2.2. Description des désordres observées.....                                                  | 115 |
| III-5-2.3. Causes probables des dégradations.....                                                    | 119 |
| III-5-2.4. Infiltrations des eaux potables.....                                                      | 119 |
| III-5-2.5. Pénétrations des agents agressifs dans l'eau potable (chlorure)<br>le corps du béton..... | 119 |
| III-5-2.6. Méthodes de restauration.....                                                             | 120 |
| III-5-2.7. Nature des travaux de confortement.....                                                   | 120 |
| III-5-2.8. Traitement des armatures corrodées.....                                                   | 120 |
| III-5-2.9. Reconstitution du béton.....                                                              | 121 |
| III-5-2.9.1. Préparation des SIKA MONOTOP.....                                                       | 122 |
| III-5-2.9.2. Mise en œuvre des SIKA MONOTOP.....                                                     | 122 |
| III-5-2.10. Conditions atmosphériques.....                                                           | 122 |
| III-5-2.11. Mise en peinture (ou revêtement de protection).....                                      | 123 |
| III-5-2.12. Prévention.....                                                                          | 123 |
| III-5-2.13. Réfection du revêtement d'étanchéité à l'intérieur de la cuve<br>du château.....         | 123 |
| III-5-2.14. Réfection des fissures sur poteaux.....                                                  | 125 |
| III-5-2.15. Réfection des murs voiles.....                                                           | 126 |
| III-5-2.16. Réfection de la plate forme.....                                                         | 127 |
| III-6. Conclusion.....                                                                               | 128 |
| Conclusions Générales.....                                                                           | 129 |
| Références bibliographiques.....                                                                     | 133 |

## Liste des figures

### Chapitre II : Corrosion dans le béton armé et son diagnostic

|                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b><u>Figure (II.1):</u></b> Représentation schématique de processus de base de la corrosion des aciers dans le béton                                                                                                                                     | 31 |
| <b><u>Figure (II.2):</u></b> Les étapes de la corrosion des aciers dans les bétons, induite par des agents agressifs. L'agent agressif pénètre dans l'entourage puis déclenche la formation de rouille. Celle-ci se développe et peut fissurer l'enrobage | 32 |
| <b><u>Figure( II.3):</u></b> Schéma de la cinétique de corrosion des armatures dans le béton                                                                                                                                                              | 34 |
| <b><u>Figure( II.4):</u></b> Evolution du niveau de corrosion des armatures                                                                                                                                                                               | 35 |
| <b><u>Figure( II.5):</u></b> Schéma montrant les étapes de dégradation                                                                                                                                                                                    | 35 |
| <b><u>Figure( II.6):</u></b> Principe de la réaction chimique aboutissant la formation de rouille                                                                                                                                                         | 36 |
| <b><u>Figure( II.7):</u></b> Schéma de principe de la formation de la carbonatation                                                                                                                                                                       | 38 |
| <b><u>Figure( II.8):</u></b> Schéma de principe de la formation de la carbonatation                                                                                                                                                                       | 39 |
| <b><u>Figure( II.9):</u></b> Modèle de PAGE et al. Attaque de l'acier par les ions chlorure                                                                                                                                                               | 41 |
| <b><u>Figure (II.10):</u></b> Illustration du principe de la mesure de résistivité                                                                                                                                                                        | 46 |
| <b><u>Figure (II.11):</u></b> Grille de mesure sur ouvrage                                                                                                                                                                                                | 55 |
| <b><u>Figure (II.12):</u></b> Inclinaisons possibles par rapport à l'élément à ausculter                                                                                                                                                                  | 56 |
| <b><u>Figure (II.13):</u></b> Graphe de contrôle du fonctionnement de l'appareil                                                                                                                                                                          | 57 |
| <b><u>Figure (II.14):</u></b> Courbe de transformation unique                                                                                                                                                                                             | 59 |
| <b><u>Figure (II.15):</u></b> Appareil de mesure                                                                                                                                                                                                          | 61 |
| <b><u>Figure (II.16):</u></b> Courbes de calibrages                                                                                                                                                                                                       | 68 |

|                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b><u>Figure (II.17):</u></b> Courbe RILEM                                                                                                                                                                                                  | 69 |
| <b><u>Figure (II.18):</u></b> Courbe d'estimation de la résistance à la compression in situ par utilisation conjointe de la mesure de la propagation d'ondes ultrasoniques et des résultats d'essai au scléromètre selon U BELLANDER (1977) | 73 |

### Chapitre III : Dynamique de traitement et étude de cas

|                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b><u>Figure (III.1)</u></b> : Béton projeté par voie sèche                                                                                                                                                             | 82 |
| <b><u>Figure (III.2)</u></b> : Béton projeté par voie mouillée                                                                                                                                                          | 82 |
| <b><u>Figure (III.3)</u></b> : Protection cathodique par courant imposé                                                                                                                                                 | 86 |
| <b><u>Figure (III.4)</u></b> : Schéma d'une protection cathodique galvanique (Broomfield, 2007)                                                                                                                         | 88 |
| <b><u>Figure (III.5)</u></b> : Comportement anodique de l'acier dans le béton en présence de chlorures (P. Pedferri, 1996)                                                                                              | 93 |
| <b><u>Figure (III.6)</u></b> : Valeurs des potentiels de piqure et de protection mesurées sur l'acier immergé dans une solution saturé de $\text{Ca(OH)}_2$ en fonction de la teneur en ions chlore (P. Pedferri, 1996) | 93 |
| <b><u>Figure (III.7)</u></b> : Comportement de l'acier dans le béton selon le potentiel de l'acier et la teneur en ions chlore par rapport au poids de ciment (PPedferri,1996)                                          | 95 |
| <b><u>Figure (III.8)</u></b> : Réactions de principe impliquées dans l'extraction de chlorure (L. Bertolini et al, 2004)                                                                                                | 96 |

## Liste des Tableaux

### Chapitre II : Corrosion dans le béton armé et son diagnostic

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b><u>Tableau (II.1)</u></b> : Masse du constituant contenue dans un Kg d'eau de mer, rapportée à la Salinité | 26 |
| <b><u>Tableau (II.2)</u></b> : Gamme de résistivité électrique de différents bétons [Polder et al., 2000]     | 47 |
| <b><u>Tableau (II.3)</u></b> : Probabilité de corrosion en fonction de la valeur de la résistivité            | 47 |
| <b><u>Tableau (II.4)</u></b> : Moyens de mesure selon type de recul au scléromètre                            | 54 |

### Chapitre III : Dynamique de traitement et étude de cas

|                                                                        |     |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b><u>Tableau (III.1)</u></b> : inhibiteurs de corrosion pour le béton | 79  |
| <b><u>Tableau (III.2)</u></b> : PROCEDURE SIKA, 2005                   | 121 |

## Liste des photos

### Chapitre II : Corrosion dans le béton armé et son diagnostic

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b><u>Photo (II.1)</u></b> : Poutre de tablier de pont                        | 26 |
| <b><u>Photo (II.2)</u></b> : Poteau support de ligne électrique               | 27 |
| <b><u>Photo (II.3)</u></b> : Tuyau en béton armé                              | 27 |
| <b><u>Photo (II.4)</u></b> : Pile en zone de marnage                          | 27 |
| <b><u>Photo (II.5)</u></b> : scléromètre                                      | 53 |
| <b><u>Photo (II.6)</u></b> : Appareil d'auscultation sonore avec oscilloscope | 63 |
| <b><u>Photo (II.7)</u></b> : Mesures en transparence (directe)                | 65 |
| <b><u>Photo (II.8)</u></b> : Mesures en surface                               | 65 |
| <b><u>Photo (II.9)</u></b> : Mesures semi directe                             | 66 |

### Chapitre III : Dynamique de traitement et étude de cas

|                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b><u>Photo (III.1)</u></b> : Quelques renforts visuels du dôme inférieur du château d'eau érodé | 116 |
| <b><u>Photo (III.2)</u></b> : Éclat de béton à certains endroits du dôme inférieur               | 117 |
| <b><u>Photo (III.3)</u></b> : L'impact des fissures au niveau de la scène                        | 118 |

## **Introduction Générale**

La durabilité des ouvrages en béton armé dépend de leur comportement face aux conditions climatiques et environnementales qui existent dans les milieux où ils sont construits. Ces ouvrages sont souvent exposés à de nombreuses agressions physico-chimiques auxquelles ils doivent résister afin de remplir de façon satisfaisante pendant leur période d'utilisation, toutes les fonctions pour lesquelles ils ont été conçus. Lorsqu'ils ne peuvent résister pas à ces agressions, des désordres dont le plus fréquent est la corrosion des armatures apparaissent dans le béton de ces structures. Ces désordres sont généralement dus à des défauts de conception, à une mauvaise mise en œuvre ou à des causes accidentelles ; ils hypothèquent la durabilité, la résistance et la stabilité des ouvrages et peuvent entraîner leur dégradation et leur ruine.

Bien conçu et mis en œuvre suivant les règles de l'art, le béton offre aux armatures une protection à la fois physique et chimique. L'enrobage assure la protection physique en jouant un rôle de barrière vis-à-vis de l'environnement. Sa qualité (compacité, teneur en ciment, imperméabilité, etc.) et son épaisseur (3 cm en milieu non agressif et 5 cm en milieu marin) sont des facteurs essentiels à la bonne tenue des armatures face à la corrosion.

L'alcalinité élevée du béton assure la protection chimique en recouvrant, selon le phénomène de passivation, les armatures d'un film extrêmement mince d'hydroxyde de fer. Mais, en présence d'eau et d'oxygène, ce film est détruit par différents agents tels que les chlorures, le dioxyde de carbone... etc. La corrosion pourrait donc apparaître avec comme conséquences la réduction des sections d'acier et la formation de rouille, dont le volume, aux moins deux fois supérieur à celui du fer initial, entraînera des fissures du béton qui accéléreront le processus de corrosion en facilitant la diffusion de l'oxygène et des espèces corrosives.

Il existe actuellement plusieurs méthodes de protection ou de réparation. Celles-ci agissent directement au niveau de l'acier (revêtements organiques ou métalliques des armatures, inhibiteurs de corrosion, protection cathodique) ou au niveau du béton, soit en empêchant la pénétration d'éléments agressifs (revêtement du béton par des peintures spéciales), soit en réhabilitant la qualité du béton (changement des parements, déchlorurassions, ré-alcalinisation).

Des études faites à travers le monde montrent que la corrosion des armatures est responsable de la dégradation de 75% des ouvrages en béton armé et absorbe la plus grande partie des ressources financières destinées aux activités d'entretien et de renouvellement des ouvrages de génie civil; ceci est la preuve que ce phénomène doit être pris très au sérieux. Que de nombreux ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures exigent de nouvelles interventions peu de temps seulement après qu'ils aient été réparés cette même raison; a attiré notre attention et nous a amené à penser que la corrosion qui fait tant de mal à nos ouvrages en béton armé n'est pas traitée avec tout le sérieux qui doit lui être dû. Cela peut résulter du fait que beaucoup d'ingénieurs et de techniciens ne procèdent pas au préalable à des investigations sérieuses pour évaluer l'ampleur des dégâts dans la structure avant d'engager des travaux de réparation, soit par leur méconnaissance du phénomène de la corrosion et de la démarche à suivre pour résoudre ses problèmes, soit alors qu'ils ne se fient uniquement qu'à l'apparition des dégradations visuelles sur l'ouvrage telles que : les tâches de rouille, les infiltrations d'eau, l'éclatement du béton, les fissures...etc. Les conséquences qui en découlent sont : la non détection des dégradations cachées qui vont se propager avec le temps, le risque de baser les travaux sur un concept erroné, et la mauvaise évaluation du coût des réparations.

Pour remédier à cette situation et œuvrer à la réhabilitation efficace et durable des ouvrages en béton armé dont les armatures sont corrodées, nous avons décidé de travailler dans notre mémoire de fin d'étude, sur le thème « **Etude de la**

***corrosion des infrastructures sous l'effet des eaux agressives et/ou sol agressives»***

Avec l'étude du cas E (Réhabilitation de structures en béton armé par corrosion des barres d'armature), le projet est un château d'eau .

Le château d'eau, objet de cette étude, est situé dans la ville d'El-Oued (Algérie), c'est-à-dire sur la commune de Oued Al-Alanda.

Retrouvez un résumé de nos objectifs d'étude sur:

- expliquer les mécanismes de la corrosion des armatures du béton
- présenter les techniques d'investigation pour la détection de la corrosion des armatures et l'évaluation de son ampleur .
- présenter et expliquer les méthodes de réparation des ouvrages corrodés.
- proposer une démarche à suivre pour réhabiliter efficacement les ouvrages corrodés .
- donner des mesures préventives pour empêcher ou retarder le plus longtemps possible la corrosion des armatures conformément à l'adage qui dit que : »prévenir vaut mieux que guérir ».
- Moyens d'identifier la rouille et la corrosion.

---

# **Chapitre I**

*Vue d'ensemble de l'infrastructure dans les  
milieux agressifs*

---

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

Les déformations des bâtiments dues à certains facteurs environnementaux font référence aux problèmes et aux maladies qui entraînent des déformations et des défauts dans les bâtiments, dues au climat et à des facteurs environnementaux naturels. Comprendre leurs causes et défauts qui en résultent et essayer de les mesurer permet de prendre des préventions pour éviter leur apparition, et peuvent être traitées.

## **I-2.Caractéristiques de performance du bâtiment**

Les bâtiments ont des caractéristiques qui doivent être étudiées et reconnues, dont les plus importantes sont les capacités de la structure de service en plus de en termes de durabilité et , une attention particulière doit être portée à la sûreté et à la sécurité du feu, ainsi qu'aux possibilités d'adaptation et de coexistence avec le milieu environnant, augmentant efficacement les caractéristiques de performance du bâtiment et fonctionne donc bien pour résister aux déformations et aux défauts des éléments de construction, et la composante de coexistence et d'adaptation des bâtiments est considérée comme l'un des facteurs affectant la création d'un bon cadre de vie Par plusieurs facteurs:

- Performances thermiques efficaces (dilatation, résistance, choc).
- Permettre à l'humidité et à l'eau de pénétrer et de percoler (absorption d'eau, perméabilité à l'humidité, dilatation par l'humidité et retrait par séchage).
- Assurer la santé et l'hygiène, propagation de moisissures, fuite d'air.<sup>[1]</sup>

### **I-2-1. Dommages et effondrement des installations**

Les causes qui conduisent à l'apparition de dommages et à l'effondrement du bâtiment varient des raisons techniques, de conception, de construction et de mise

---

[1] Diagnostic des ouvrages en béton armé facteurs de vieillissement des ouvrages, Annales du Bâtiment et des Travaux Publics

en œuvre et d'autres liées à des facteurs environnementaux, et nous aborderons ici brièvement les causes générales qui entraînent des déformations des bâtiments.

### **I-2-1.1. Non-respect des précautions techniques et des normes d'ingénierie lors de l'établissement:**

Construire sur des sols limoneux (agressifs) sans faire de substitution de sol et un bon compactage du sol, et ne pas être conscient de la présence de produits chimiques dans le sol qui peuvent conduire à l'érosion et aux réactions du béton et de l'acier d'armature, cela se produit chaque fois que le bâtiment est à proximité d'usines et de déchets. Négliger le travail des tests, car les tests de résistance du sol sont un facteur majeur et important que beaucoup oublient pour de nombreuses raisons, dont la plus importante est le désir de sauvegarder et d'extraire des permis de manière incorrecte et d'octroyer du travail à un non-spécialiste.

Il y a aussi un problème de fondation sur des ruines, des zones de remblai ou des sites archéologiques, car cela signifie la présence de couches de remblai qui doivent être enlevées pour atteindre le terrain approprié pour la fondation et selon les rapports techniques reçus des spécialistes.<sup>[2]</sup>

### **I-2-1.2. Construire dans des zones sujettes aux glissements de terrain**

Il y a des zones qui peuvent être sujettes à des tremblements de terre au sol, où les tremblements de terre et les tremblements de terre sont censés être pris en compte lors de la conception d'ouvrages et de bâtiments en béton, où l'effort résultant des tremblements de terre est calculé selon les lois.

### **I-2-1.3. Caractère inapproprié des conceptions structurelles**

Cela se produit en cas de négligence du propriétaire, de l'administrateur ou du concepteur lors de la réalisation de la conception en tout ou en partie, telle que :

---

[2] Diagnostic des ouvrages en béton armé : facteurs de vieillissement des ouvrages

- Négligence dans la conception du mélange de béton et la réalisation des essais pour le sable, l'agitation, l'eau et les additifs chimiques.
- Conception structurelle inexacte et négligente dans l'adoption de normes et de codes techniques et de calculs erronés pour des charges de divers types.
- Manque de rapports fiables et de bonne qualité provenant de sources concernant les travaux de sol et de fondation.
- Non-respect des spécifications et des plans lors de la mise en œuvre ou mise en œuvre incorrecte.
- Perte du respect du code et de la familiarité avec les spécifications, les matériaux et les plans de mise en œuvre, tout cela en plus du manque de soin dans le contrôle et le contrôle de la qualité lors de la mise en œuvre tout cela peut entraîner des problèmes dans le bâtiment ou son effondrement dans le futur.
- Chaque ingénieur doit comprendre comment contrôler la qualité de tous les matériaux utilisés dans son projet et l'étendue de leur impact sur le projet.

#### **I-2-1.4. Utilisation de matériaux non valides ou non conformes aux spécifications**

- La plupart des ingénieurs sont satisfaits de l'inspection apparente des matériaux sans effectuer de test pour ces matériaux, et ici, il est nécessaire de prêter plus d'attention aux matériaux qui entrent dans le béton tels que l'eau, le sable, les agrégats, l'acier d'armature, le ciment et les additifs.
- L'armature doit être utilisée conformément à ce qui est indiqué dans les plans, et si une modification est nécessaire, des calculs de conception précis doivent être effectués à cet effet.
- Le fer doit être reçu et inspecté avant de l'étirer et de le nettoyer de la rouille de surface, le cas échéant, et il est nécessaire de ne pas utiliser de type d'acier

d'armure de source inconnue.

### **I-2-1.5. Erreurs de mise en œuvre**

De nombreuses erreurs peuvent être commises lors de la mise en œuvre, par exemple :

- Absence de suivi adéquat et de réception correcte des armatures et de leurs secteurs.

- L'apparition d'une séparation du béton lors de la coulée en raison du retard du mélange des malaxeurs et des pompes, ce qui peut conduire à plus de volatilité que nécessaire pour les composants du mélange de béton, car la période de volatilité dépend de la vitesse du malaxeur en plus de Utilisez les vibrateurs dans le mauvais sens et pendant trop longtemps.

### **I-2-1.6. Accidents et traumatismes**

Certains bâtiments et installations peuvent être exposés aux chocs et aux accidents, en particulier ceux proches des rues principales et des autoroutes, il est donc préférable de prendre des précautions et de les protéger en fonction de leur emplacement et de leur état.

### **I-2-1.7. Modifications et changements d'usage des bâtiments**

Il existe de grandes différences pour les charges vives ou permanentes (fixes et mobiles) entre les activités pour chaque type de bâtiment, de sorte que l'école diffère de la bibliothèque et l'hôpital diffère du magasin et l'usine diffère du laboratoire et la résidence privée diffère de l'hôtel ... Ainsi, tout changement ou modification du type d'activités Des problèmes peuvent survenir dans le bâtiment et augmenter au fur et à mesure que la charge augmente. Il est déraisonnable de transformer une petite villa dédiée et conçue pour des charges spécifiques en une école contenant plusieurs fois ce qui a été préparé pour elle.

**I-2-1.8. Eau, humidité et négligence de l'imperméabilisation**

- Les fondations peuvent être exposées à la corrosion et au mélange de divers produits chimiques en raison de la présence d'eau sous le bâtiment qui entraîne des réactions avec le Acier et le béton, et la présence d'eau seule provoque la rouille et la corrosion du Acier, en plus de ce qui est causé par les eaux souterraines, les eaux usées ou l'eau résultant de fuites dues à des dommages à la Avec extensions ...Etc.
- L'eau de pluie s'infiltre des surfaces non isolées d'une bonne manière, ce qui entraîne une séparation entre le fer et le béton en raison de la corrosion du fer due à la rouille.
- Négliger l'enduit et l'habillage des façades, ce qui expose le béton aux intempéries sans protection, car la blancheur des façades ne se limite pas à l'aspect esthétique, mais consiste à protéger le béton également des intempéries.
- Le manque d'attention au béton et de prendre soin de celui-ci de l'intérieur en traitant les dommages à l'isolation et au drainage des salles de bain et de la plomberie de manière inappropriée. Le drainage des machines à laver et de l'eau des salles de bain a un effet négatif en raison des produits chimiques qu'ils contiennent qui affectent le Acier et le béton en plus des fuites d'eau vers les installations électriques dans les plafonds des salles de bains et des chambres. Par conséquent, les salles de bains et les cuisines doivent être isolées avec un système d'étanchéité approprié, et il doit être clair pour les utilisateurs comment utiliser et éviter d'endommager l'isolation, que ce soit pour les salles de bains ou les toits, par des méthodes directes telles que la fissuration ou indirecte, comme l'utilisation fréquente d'eau et l'immersion des murs et des portes, ce qui facilite la pénétration de l'eau même avec une bonne isolation.

**I-2-1.9. Restaurations et agrandissements sans étude**

- Restauration irréfléchie et utilisation de matériaux corrodant l'acier d'armature.
- Créer des supports supplémentaires de dimensions qui ne peuvent être tolérées par les fondations ou le sol.
- Réparation avec des matériaux non spécialisés et des matériaux inappropriés.
- Non prise en compte lors de la réparation par de toute considération de poids, de stress et de facteur de sécurité.
- Fissuration des murs porteurs.
- Augmenter les planchers sans étudier ou examiner des spécialistes et sans licences.

**I-2-1.10. Négligence dans la maintenance**

Malheureusement, le concept de maintenance fait défaut dans notre société arabe pour de nombreuses raisons auxquelles nous ne pouvons pas nous limiter, mais la plus importante est ce qui paie pour effectuer des travaux de maintenance, ce qui n'est pas considéré comme étrange s'il paie pour la santé d'un individu ou la réparation de sa voiture ou de son appareil alors que cela est étrange et illogique du point de vue de l'individu dans notre société. Pour le bâtiment dans lequel il vit et ses générations après lui, les sociétés occidentales accordent une importance à l'entretien qui peut l'emporter sur l'importance de la construction du bâtiment.

L'entretien signifie l'inspection périodique de chaque élément du bâtiment, et le plus important de ces éléments sont les éléments structurels avec des dispositifs modernes et avancés pour traiter tout défaut lors de sa création, ainsi que pour prendre soin de tout ce qui peut affecter le bâtiment et sa sécurité.

**I-2-1.11. Corrosion d'Acier d'armature et du béton**

L'acier d'armature et le béton sont corrodés pour l'une des raisons suivantes :

- La proximité des fondations avec les lieux de drainage, que ce soit pour les usines ou les déchets humains.
- Corrosif en raison du manque d'entretien et des traitements immédiats des fuites d'eau.
- La hauteur du niveau des eaux souterraines sans en tenir compte lors de la conception et de la mise en œuvre.
- Charges importantes ou équipement lourd.
- Tremblements de terre.
- Un changement d'usage.
- L'excavation fonctionne à proximité des fondations sans prendre de précautions.
- Fuite d'eau, qu'elle soit due à la pluie ou autre, et survenue d'un affaissement soudain du sol.
- Températures dues aux incendies à proximité ou à la météo.

**I-2-1.12. Problèmes des bâtiments voisins**

Un bâtiment voisin peut s'effondrer, en tout ou en partie, et il peut être en danger de chute. Par conséquent, l'état des bâtiments voisins doit être pris en compte, que ce soit lors de la conception ou de la mise en œuvre, de l'entretien et des réparations.

### **I-2-1.13. Facteurs climatiques conduisant à l'apparition de déformations du bâtiment**

#### **I-2-1.13.1. Humidité**

L'humidité relative de l'air entourant le bâtiment représente une cause directe de ses dommages, que cette humidité relative soit faible ou élevée et le risque de ce facteur est déterminé à la lumière des conditions du bâtiment et du degré de cette humidité et des caractéristiques du milieu environnant. En revanche, l'augmentation de l'humidité relative conduit à des réactions chimiques dont la plus importante est la conversion des gaz acides en Acides correspondants qui présentent un risque pour les matériaux de construction en général.<sup>[3]</sup>

Il aide également à la croissance des micro-organismes qui attaquent non seulement la matière organique mais aussi les pierres. La grande difficulté réside dans l'identification des sources d'humidité qui causent des dommages à la pierre et autrement, car la pierre qui a commencé à endommager ne s'arrêtera pas, mais continuera son effondrement sans s'arrêter à moins que les mesures nécessaires.

#### **A. Humidité relative élevée**

Il conduit à dissoudre les sels hydrosolubles qui se trouvent habituellement dans les pierres sédimentaires (calcaire, sable) et à les transporter vers les surfaces exposées, où ils cristallisent dans les couches extérieures de ces surfaces lorsque leurs solutions sèchent par évaporation et par les énormes pressions locales qui accompagnent la croissance cristalline des sels les surfaces extérieures des pierres se désintègrent.<sup>[4]</sup>

#### **B. L'effet d'une humidité relative faible et semi-constante**

L'élimination des sels solubles et insolubles de l'intérieur vers l'extérieur avec

[3] Effect of Environmental Factors on Building- Mémoire Option : Génie civil \*Université des sciences et technologies du Soudan 2015\*

[4] Effect of Environmental Factors on Building- Mémoire Option : Génie civil \*Université des sciences et technologies du Soudan 2015\*

le mouvement de l'eau à l'intérieur des pores vers la surface par l'effet du processus d'évaporation conduit au dépôt d'oxydes et d'impuretés dans la pierre à la surface et avec la poussière atmosphérique, la croûte dite durcie se forme et au fil du temps se forme une couche épaisse qui se déforme et pollue la forme esthétique du bâtiment et devient La pierre en dessous est faible, désintégrée et décomposée.

À la suite de la condensation de la vapeur d'eau tôt le matin à la surface et à l'intérieur des pores et de la propagation de l'eau résultante à l'intérieur des pores des pierres sédimentaires, puis en la dissolvant dans les sels solubles, que ce soit dans la pierre elle-même ou dans les composants, et un mouvement des solutions de ces sels se produit vers les surfaces externes pour commencer le processus d'évaporation et ainsi des processus commencent à apparaître et à cristalliser ces sels avec la poursuite de Dans la croissance de ces cristaux.

### **C. Impact de l'humidité**

- État insalubre pour les utilisateurs du bâtiment.
- Le manque de cohésion de toutes sortes de revêtement dans les bâtiments
- Mettre fin à la vie du bois usagé.
- corrosion des armatures du béton armé.
- Dommages à la peinture.
- Endommagement des extensions électriques.
- Le revêtement des sols, des murs et des plafonds est endommagé.
- La multiplication des champignons et des bactéries dans le bâtiment.

### **D. Les causes de l'humidité**

- Orientation du bâtiment: les murs anti-pluie et le faible ensoleillement les rendent

plus sensibles à l'humidité.

- Quantité d'eau de pluie: l'eau de pluie représente un grand danger pour les bâtiments si des précautions ne sont pas prises.
- Eaux de surface: rivières, mers et étangs résultant des torrents et des pluies.
- Les eaux souterraines: c'est l'eau qui se forme sous la surface de la terre et c'est ce que notre région souffre le plus en raison du niveau élevé des eaux souterraines et à sa proximité avec la surface de la terre et du résultat de l'absence de réseaux ou réseau de drainage.
- Capillarité: est la raison de l'augmentation de l'humidité des étages inférieurs à travers les pores du sol et des matériaux utilisés dans la construction.
- Condensation: L'air contient une quantité de vapeur d'eau qui augmente avec l'augmentation de la température de l'air, ce qui provoque la condensation de l'humidité sur les murs froids, les plafonds et les planchers lorsque l'air chaud entre en contact avec lui.
- Mauvais drainage de l'eau: se produit à la suite de fuites d'eau des endroits hauts vers bas, ce qui crée de l'humidité.
- Construction moderne: les murs nouvellement construits restent à l'état humide pendant un certain temps.
- Mauvais travail: l'utilisation d'un mauvais travail entraîne des défauts dans le drainage de l'eau.
- La nature architecturale du bâtiment: la forme du bâtiment de l'intérieur, l'emplacement des cuisines ou des salles de bain, des salles de lavage, et le manque de ventilation provoque la préservation de la vapeur d'eau.

### **I-2-1.13.2. Facteurs météorologiques externes**

Les facteurs météorologiques externes qui contribuent à modifier l'humidité à l'intérieur des bâtiments sont les suivants: pluie et eau de neige, humidité externe élevée, humidité de l'air, humidité du sol, niveau de l'eau souterraine, vitesse du vent et direction du mouvement.

#### **A. Mouvement du vent**

La vitesse du vent augmente aux abords des bâtiments et s'intensifie en particulier aux extrémités des grands et hauts bâtiments, et la différence des valeurs de pression augmente dans ces zones à mesure que la vitesse du vent devient plus intense aux coins extérieurs du bâtiment qui séparent deux zones de basse et haute pression. Sur le pourcentage d'humidité à l'intérieur des bâtiments, comme sa contribution à l'augmentation des dégâts de la pluie et de la neige et ses avantages ou inconvénients dans les opérations de ventilation.

En ce qui concerne la façon dont le vent contribue à l'augmentation des dommages causés par la pluie et la neige, le vent agit en raison de son changement continu de direction autour du bâtiment pour déplacer les morceaux de neige qui tombent dans toutes les directions, ce qui facilite l'entrée de la neige dans le bâtiment à travers des espaces où l'eau de pluie ne peut pas s'infiltrer dans des conditions normales. À travers elle, comme les trous dans les pieux, les fissures et les joints dans les ouvertures extérieures.

Quant à la contribution du vent à l'augmentation de l'intensité de l'eau de pluie, il frappe sévèrement les perles de pluie sur les surfaces des murs extérieurs et les zones de haute pression contribuent à pousser la pluie dans les zones profondes à l'intérieur des murs et les zones les plus touchées par le vent et la gravité de l'impact de l'eau de pluie sont les extrémités des bâtiments supérieurs et latéraux si les parties Le fond est fermé.

## **B. Mouvement thermique**

Le mouvement thermique se produit lorsqu'un changement de température se produit sous la forme d'une expansion ou d'une contraction des composants constructifs. Les principaux problèmes sont le mouvement différentiel entre les matériaux voisins et différents.

Tous les matériaux de construction font face à un mouvement thermique, où le coefficient de dilatation varie entre les matériaux en fonction du mouvement réel de la chaleur, ce qui est important pour les bâtiments.

- La chaleur ou la lumière du soleil affectent les bâtiments ou les surfaces des bâtiments, car ils déforment les façades ou peignent les surfaces extérieures.
- Peintures écaillées ou couleurs décolorées Peintures Cette déformation est apparente dans les zones chaudes où les surfaces externes ne sont pas peintes avec les peintures spécifiées pour elles.

### **I-2-1.13.3. Mouvement et fissures résultant de l'humidité et de l'influence du soleil ou de la chaleur**

La plupart des matériaux de structure se déplacent en raison d'une exposition à Le cycle de la sécheresse et de l'humidité , et ce mouvement est parfois limité par des éléments structurels solides qui résistent à leur mouvement et retiennent les fissures entre eux et d'autres fois les éléments structurels de contrôle sont faibles, ce qui conduit à des fissures s'il s'agit d'éléments solides tels que le béton ou la pierre, ou à les comprimer s'ils le sont. Comme l'asphalte, à d'autres moments, le mouvement des matériaux de structure est illimité, de sorte qu'ils se déplacent dans la direction qui leur est plus facile à déplacer.<sup>[5]</sup>

---

[5] Effect of Environmental Factors on Building - Mémoire Option : Génie civil \*Université des sciences et technologies du Soudan 2015\*

## **A. Types Des Fissures**

Les fissures sont considérées comme l'un des types de défauts les plus importants dans les bâtiments en béton et la cause la plus répandue d'effondrements et de catastrophes, malgré l'évolution du domaine de la construction et l'attention portée à la qualité de la conception et à la bonne mise en œuvre. Cependant, la méthode par laquelle les fissures dans les bâtiments sujets à des fissures sont diagnostiquées au niveau local peut ne pas être Il est suffisamment précis, car il est fait selon une approche traditionnelle qui repose la plupart du temps sur des conjectures et une appréciation personnelle des causes apparentes sans une considération et une attention suffisantes aux causes de ces fissures. Cela entraîne souvent un diagnostic incorrect Pour des raisons....., et cela se reflète inévitablement dans toute méthode de traitement des fissures, qui sont classées comme suit: <sup>[6]</sup>

### **A.1. Fissures non structurelles**

#### **A.1.1. Fissures thermiques**

Pendant le processus de durcissement précoce, la chaleur est générée par la réaction chimique entre l'eau et le ciment, et les éléments préfabriqués sont souvent traités à la vapeur, et ce traitement thermique génère une grande quantité de chaleur. Lorsque le béton refroidit et rétrécit, les forces thermiques commencent à apparaître et à se développer, surtout s'il est En raison d'un refroidissement irrégulier, la contrainte de traction thermique peut provoquer des fissures très fines qui peuvent avoir une importance structurelle. Cependant, cela crée des surfaces faibles à l'intérieur du béton, et le retrait de la sécheresse normale conduit à l'expansion de ces fissures après la connexion des éléments préfabriqués.

---

[6] Effect of Environmental Factors on Building - Mémoire Option : Génie civil \*Université des sciences et technologies du Soudan 2015\*

### **A.1.2. Fissures de retrait en plastique**

Du fait de l'évaporation rapide de l'eau de la surface du béton et de son élasticité lors de son durcissement, cette évaporation rapide dépend de nombreux facteurs, dont le plus important est la température et la vitesse du soleil direct, qui rend le taux d'évaporation supérieur au taux de flottabilité de l'eau à la surface du béton. Les fissures de retrait en plastique sont généralement courtes et superficielles et apparaissent dans deux directions opposées en même temps, et dans le cas d'éléments d'installations préfabriquées qui sont fabriqués dans des endroits fermés et sont bien traités, il n'y a pas de risque de fissures de retrait du plastique en raison de leur petite taille.

### **A.1.3. Fissures de retrait par sécheresse**

Ce type de fissure se produit lorsque des éléments courts et à faible armature rencontrent des barrières qui les obstruent, par exemple lorsqu'une paroi de protection de faible épaisseur est reliée à une dalle de balcon de grande épaisseur). Dans les poutres préfabriquées, le béton des extrémités des charnières est coulé dans des conduits à partir de joints rigides préfabriqués) et en raison des conduits relativement étroits pour faciliter le processus de coulée, de fines fissures se produisent dans les joints verticaux à la suite du déflation.

Cet effet est rare dans les établissements résidentiels. Cependant, cela peut se produire dans certaines installations, telles que les parois du réservoir et dans des cas particuliers lorsque le liquide stocké à l'intérieur du réservoir est très chaud ou froid. Une déformation se produit également dans la structure en raison de la différence de température entre ses différentes parties, par exemple les bords de la façade sont exposés à la lumière directe du soleil et se dilatent, tandis que la température du reste de la structure reste basse, entraînant l'émergence de fissures diagonales des coins sur les sols d'installations très longues ou très durables.

#### **A.1.4. Fissures dues à la corrosion**

Il existe des réactions chimiques qui conduisent à l'érosion du béton, et le cas le plus courant est le résultat de la combinaison de soufre avec des aluminates de ciment en présence d'eau et du sel résultant d'une taille plus grande que les éléments constitutifs, et l'expansion qui en résulte conduit à l'éruption de fissures et à la chute des pièces de béton corrodées. Un défaut chimique peut apparaître suite à la sélection de grains inappropriés (gravier) Les fosses qui apparaissent à la surface du béton signifient que les granules isolés se sont décomposés.<sup>[7]</sup>

### **I-3. Conclusion**

Les bâtiments, comme n'importe quoi sur terre, est exposés aux étapes de la croissance et de la vie, de l'émergence à l'ascension puis au vieillissement à la destruction et à la disparition et ainsi de suite, aux éléments environnementaux qui peuvent affecter négativement le bâtiment (rayonnement solaire; pluie; pollution de l'air, organismes vivants et humidité ... etc.). Les opérations de chauffage et de refroidissement provoquent la dilatation et la contraction des matériaux de construction, et par conséquent des fissures dans les éléments de construction en l'absence de joints de dilatation du bâtiment.

La maîtrise de la durabilité des bétons, qu'ils soient structurels ou architecturaux, constituent un enjeu majeur pour toute la filière. C'est pourquoi la durabilité occupe aujourd'hui une position déterminante dans le nouveau contexte normatif européen sur le béton. Alors que nous traiterons dans le prochain chapitre étude concerne les structures en béton armé potentiellement soumises à des phénomènes de corrosion des armatures par carbonatation ou par action des ions chlorure .

---

[7] Paradis, F. (2009). Influence de la fissuration du béton sur la corrosion des armatures, Caractérisation des produits de corrosion formés dans le béton. Thèse de doctorat de l'Université Laval, 289p

---

# **Chapitre II**

## **Corrosion dans le béton armé et son diagnostic**

---

## **II-1. Introduction:**

Ciment, gravats, sable et un peu d'eau, avec ce mélange, vous avez obtenu les matériaux de construction les plus couramment utilisés dans le domaine de la construction dans le monde, malgré les composants primitifs de ce mélange produit un matériau solide et durable idéal pour la construction de types d'installations humaines telles que des bâtiments, des ponts, des barrages, des tunnels et des gratte-ciel, qui sont. Il a nommé, au passage de la nourriture, une quantité de tiges renforcées qui lui ont été ajoutées, pour lui donner son nom scientifique, qui roule avec du béton armé.

Dans ce chapitre, nous avons tenté de l'étudier sous tous ses aspects (son histoire, ses composants et ses caractéristiques), ainsi que le diagnostic du processus de corrosion.

## **II-2. Le béton arme**

### **II-2-1. Historique**

L'apparition des premiers bétons se situe à la fin du premier quart du XIX<sup>ème</sup> siècle lorsque la chaux hydraulique, liant utilisé jusqu'alors, est remplacée par le ciment Portland.

C'est vers 1870 que l'on introduit des barres d'acier dans le béton afin de compenser sa faible résistance à la traction, donnant ainsi naissance au béton armé. Cependant, ce n'est que vers 1900 que le béton armé remplace peu à peu les structures métalliques dans la construction d'ouvrage de génie civil. Les premières théories des calculs statiques apparaissent 30 ans plus tard et les progrès réalisés au XX<sup>ème</sup> siècle ont fait du béton armé, le principal matériau de construction utilisé aujourd'hui.

## II-2-2. Le béton

Le béton est un matériau obtenu après malaxage de ciment, d'eau, de granulats (sable, gravier, caillou...) et éventuellement d'adjuvants dans des proportions bien déterminées et en fonction des caractéristiques voulues. L'ensemble doit être homogène et la pâte résultant des réactions entre le ciment et l'eau est l'élément actif du béton.

Parmi la grande variété de ciments, un des plus couramment utilisé est le ciment Portland composé de clinker, de gypse ( 5%) et éventuellement d'ajouts (< 5%). Le clinker, obtenu par broyage d'une roche artificielle produite par calcination vers 1450°C d'un mélange de calcaire et d'argile en proportion moyenne 80%-20%, est composé de :

- Dicalcium silicate :  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  ou  $\text{C}_3\text{S}$  ( 60-65%).
- Calcium aluminates :  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  ou  $\text{C}_3\text{A}$  ( 5-10%).
- Ferro-aluminate tétracalcique:  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  ou  $\text{C}_4\text{AF}$  ( 5-10 %).

L'eau est avec le ciment l'ingrédient le plus important du béton. Elle remplit à la fois une fonction physique conférant au béton frais les propriétés rhéologiques d'un liquide, et une fonction chimique contribuant au développement de la réaction d'hydratation du ciment et par la suite à la résistance mécanique du béton.

Les granulats, appelés aussi agrégats sont des éléments inertes composés de roches carbonatés ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) ou siliceuses ( $\text{SiO}_2$ ) qu'on ajoute à un liant pour former une pierre artificielle, ils constituent dans les conditions normales, le squelette du béton, lui conférant sa compacité et participant à sa résistance mécanique.<sup>[8]</sup>

---

[8] Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures - (Mémoire Option : Structures \*Université de Douala.2007\*)

**Calcaire  $\text{CaCO}_2$**   
**Argile si  $\text{O}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$**   
 +  
**Cuisson à  $1450^\circ\text{C}$**   
**Trempe**  
**linker**  
**Gypse  $\text{CaSO}_4$  ;  $2\text{H}_2\text{O}$**   
**Ajouts éventuels**  
 +  
**Dosage broyage**  
**Ciment**  
**Eau, granulats**  
**Adjuvants**  
 =  
**Béton**

### II-2-3. L'acier

Le béton résiste bien à la compression mais possède une faible résistance à la traction. C'est pourquoi, pour lui conférer une bonne résistance à la traction, on dispose dans la partie tendue des armatures. Les armatures pour béton armé sont généralement des assemblages de barres en acier à caractéristiques de forme, de résistance et de section bien déterminées. On distingue :<sup>[9]</sup>

- Les ronds lisses ou ronds à béton.
- Les aciers, haute d'adhérence, qui possèdent des nervures tout le long de la barre, améliorant l'adhérence béton-acier .
- Les aciers crénelés.
- Les treillis soudés.

Les minerais de base de l'acier sont des oxydes dont :

- L'oxyde magnétique ou magnétite :  $\text{Fe}_3\text{O}_4$
- L'oxyde ferrique anhydre :  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

[9] Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures -( Mémoire Option : Structures \*Université de Université de Douala.2007\*)

- L'oxyde ferrique hydrate :  $2\text{Fe}_2\text{O}_3, 3\text{H}_2\text{O}$

Les principales étapes conduisant à l'obtention de l'acier sont :

- Elaboration de la fonte à partir des oxydes. En brûlant les oxydes en présence des carbures, on obtient :

- l'élimination des oxydes

- la fonte qui contient entre 2 et 5% de carbone

- la scorie qui est le résidu du haut fourneau

- La fonte est ensuite affinée pour obtenir soit du fer pur (élimination totale du carbone) soit de l'acier (fer + /- 1% de carbone).

La fonte qui sort du haut fourneau contient moins de 94% de fer, 2 à 5% de carbone et le reste sous forme d'autres éléments tels que : silicium, manganèse, phosphore, soufre.

L'adhérence entre l'acier et le béton est nécessaire. Celle-ci est fonction de la forme des armatures, de leur surface, de la rugosité de l'acier et de la résistance du béton. La qualité d'armatures et leur disposition, dictées par la répartition des contraintes, résultent de calculs qui font appel aux lois de comportement des matériaux. Les spécifications concernant les barres sont détaillées dans les normes AFNOR NF A35015 et NF A35016.

Vis-à-vis de la corrosion, l'acier inoxydable est bien plus résistant qu'un acier ordinaire mais son coût très élevé fait que, l'acier ordinaire, capable de durer assez longtemps pour satisfaire une durée de service déterminée, est utilisé dans la plupart des constructions en béton armé (BA).

## II-2-4. Définition du béton arme

Le béton armé est l'intime assemblage d'armatures (généralement en acier) et de béton afin de compenser la mauvaise tenue de ce dernier à la traction. Cet assemblage est rendu possible grâce à la dilatation comparable des deux matériaux.

## II-2-5. Les pathologies du béton arme : causes et conséquences

Les principales causes de dégradation des bétons proviennent des attaques physiques et chimiques supportées dans le temps par les structures placées dans un environnement plus ou moins agressif. Les dégradations peuvent provenir de défauts initiaux dus soit à une conception mal adaptée, soit à une mauvaise mise en œuvre des bétons.

### II-2-5.1. Les causes physiques de dégradation

- **Abrasion** : Usure accompagnée d'une perte de matière consécutive au frottement d'un élément par un abrasif ou par le passage répétitif des piétons, véhicules et chariots industriels, etc.
- **Erosion** : Perte de matière résultant du frottement d'un corps solide et d'un fluide contenant des particules solides en suspension et en mouvement.
- **Cavitation** : Usure d'une structure hydraulique caractérisée par une perte de masse en présence de bulbes de vapeur qui se forment lors d'un changement brusque de direction d'un écoulement rapide de l'eau.
- **Chocs** : Le béton éclate sous l'effet de chocs produits par des engins de transport ou de levage, des outils.
- **Surcharges** : Il s'agit d'ouvrages ayant supporté des charges trop importantes qui ont entraîné des fissurations et des éclatements du béton.
- **Le feu** : Les très fortes élévations de température lors d'un incendie par exemple, entraînent un éclatement du béton.

- **Cycle gel/ dégel** : Après un nombre important de cycles gel/dégel, certains bétons peuvent se déliter en surface et se désagréger. C'est le cas des ouvrages de montagne, des chambres froides.

### II-2-5.2. Les causes chimiques de dégradation

- **Alcali-réaction ou cancer du béton** : Réaction qui se produit entre la solution interstitielle du béton, riche en alcalin, et certains granulats lorsqu'ils sont placés dans un environnement humide. Des gels gonflants apparaissent en développant des microfaiençages et un éclatement du béton.

- **Réactions sulfatiques** : Les sulfates proviennent essentiellement du milieu extérieur. Ces ions ne sont pas passifs vis-à-vis de la matrice cimentaire et conduisent à la formation de certains composés chimiques expansifs tels que : L'étringite, le gypse et la thaumasite. Ces composés provoquent le gonflement du béton créant en son sein des tensions qui engendrent des fissurations.

- **Corrosion** : Attaque des matériaux par les agents chimiques. Sur les métaux, la corrosion est une oxydation.

### II-2-5.3. Les autres causes de dégradation des bétons

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

#### - Mauvais positionnement des armatures

Les armatures (généralement en acier) placées trop près du parement béton lors du coulage provoquent à terme des fissurations de surface.

**- Mauvaise qualité des bétons employés**

Un béton trop faiblement dosé en ciment, mal vibré, présentera un aspect défectueux : nids d'abeilles, faïençage, fissures superficielles, trous laissant les armatures apparentes.

**- Vibration trop importante**

Une vibration trop longue peut entraîner une ségrégation du béton et par conséquent une mauvaise répartition des constituants. Les efforts mal répartis entraînent alors des fissurations et des élancements du béton.

**- Absence de cure du béton**

La cure du béton est indispensable par temps chaud venté. Sans protection de surface, le béton se faïence en surface.

**- Cycle humidité / sécheresse**

Les cycles répétés d'humidité/sécheresse entraînent des variations dimensionnelles du béton pouvant créer des fissures et par conséquent la corrosion des aciers.

**II-2-6. Le béton arme en milieu marin**

L'eau de mer est constituée de sels chargés en ions chlorures de composés sulfatiques contenant les ions sulfates, etc. Ces ions sont nocifs au béton lorsqu'ils pénètrent en son sein.

La grande particularité de l'eau de mer est que les proportions relatives de ses constituants sont sensiblement constantes (c'est-à-dire indépendante de la salinité (teneur en sels dissous) ; cette propriété a été établie par le chimiste écossais William DITTMAR, et permet de considérer l'eau de mer comme une solution des onze constituants suivants :

| Anions                 |          | Cations                                      |         |
|------------------------|----------|----------------------------------------------|---------|
| Cl <sup>-</sup>        | 0,5529   | Na <sup>+</sup>                              | 0,3075  |
|                        | 0,0775   | Mg <sup>2+</sup>                             | 0,0370  |
|                        | 0,0041   | Ca <sup>2+</sup>                             | 0,0118  |
|                        | 0,0019   | K <sup>+</sup>                               | 0,0114  |
| F <sup>-</sup>         | 0,000037 | Sr <sup>2+</sup>                             | 0,00022 |
| Molécule non dissociée |          | H <sub>3</sub> B <sub>3</sub> O <sub>3</sub> | 0,0076  |

**Tableau (II.1)** : Masse du constituant contenue dans un Kg d'eau de mer,  
rapportée à la salinité

La salinité moyenne de l'eau de mer est 35g/l. Le pH de l'eau de mer est proche de 8,2. Les gaz dissous comprennent principalement : 64% d'azotes, 34% d'oxygène ; 1,8% de dioxyde de carbone (soit 60 fois la proportion de ce gaz dans l'atmosphère terrestre).

### QUELQUES PHOTOS D'OUVRAGES EN BETON ARME DEGRADES PAR CORROSION DES ARMATURES



**Photo (II.1)** : Poutre de tablier de pont



photo 1.3 : Poteau porteur sous garage



photo 1.4 : Poteau support de ligne électrifiée

**Photo(II.2)** : Poteau support de ligne électrique



photo 1.10 : Tuyau en béton armé

**Photo (II.3)** : Tuyau en béton armé



photo 1.7 : Pile en zone de marnage

**Photo (II.4)** : Pile en zone de marnage

## II-3. La corrosion

Le terme corrosion vient du latin "*corrodere*" qui signifie ronger, attaquer. La corrosion affecte tous les métaux. Elle résulte d'interactions physico-

chimiques entre le matériau et son environnement entraînant des modifications de propriétés du métal souvent accompagnées d'une dégradation fonctionnelle de ce dernier (altération de ses propriétés mécaniques, électriques, optiques, esthétiques, etc.) Evans puis WAGNER et TRAUD sont les premiers à avoir défini la corrosion, en présence d'une phase liquide, comme un processus électrochimique.

### II-3-1. Généralités

Il existe plusieurs types de corrosions :

- **La corrosion uniforme** : C'est une perte de matière plus ou moins régulière sur toute la surface. Cette attaque est observée sur les métaux exposés aux milieux acides.
- **La corrosion galvanique ou corrosion bimétallique** : Elle est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux qui diffèrent par leur potentiel de corrosion. Le métal ayant le potentiel de corrosion le plus négatif, subit une corrosion accélérée provoquée par l'autre métal.<sup>[10]</sup>
- **La corrosion caverneuse** : Elle est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant ainsi une pile électrochimique. Cette attaque sélective du métal est observée dans les fissures et autres endroits peu accessibles à l'oxygène.
- **La corrosion par piqûres** : Elle est produite par certains anions, notamment les halogénures, et plus particulièrement les chlorures, sur les métaux protégés par un film d'oxyde mince. Elle induit typiquement des cavités de quelques dizaines de micromètres de diamètre.
- **La corrosion sous contrainte** : C'est une fissuration du métal qui résulte de l'action commune d'une contrainte mécanique et d'une réaction électrochimique.

---

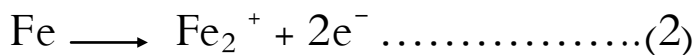
[10] Andrade, C., Garcés, P., Martínez, I. (2008). Galvanic currents and corrosion rates of reinforcements measured in cells simulating different pitting areas caused by chloride attack in sodium hydroxide, Corrosion Science 50 (2008) 2959–2964

Dans la plupart des cas (corrosion galvanique, caverneuse, par piqûres, etc.), c'est la formation d'une pile de corrosion qui est à l'origine de la corrosion.

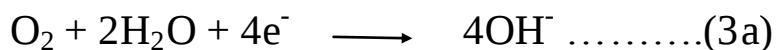
Une pile de corrosion est une pile électrochimique qui se forme lorsque deux parties d'une structure possèdent un potentiel électrique différent. La différence de potentiel résulte souvent des hétérogénéités du matériau ou du milieu environnant. La surface de l'acier est alors constituée d'une multitude de micro-piles, elles-mêmes constituées de zones dites anodiques où les électrons sont libérés et de zones cathodiques où les électrons sont consommés.

En milieu aqueux, le processus de corrosion électrochimique de l'acier peut être décrit de manière simplifiée par deux réactions électrochimiques élémentaires simultanées.

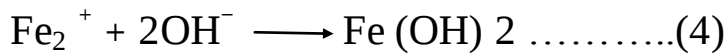
Dans la zone anodique, l'acier se dissout :



Les ions ferreux  $\text{Fe}^{2+}$  passent dans la solution et peuvent s'oxyder ultérieurement en ions ferriques  $\text{Fe}^{3+}$ . Dans la zone cathodique, les électrons produits sont consommés afin de maintenir l'équilibre électronique. Les réactions cathodiques correspondantes sont la réaction de l'oxygène dissous dans l'eau (3a) ou la réduction du proton avec dégagement d'hydrogène (3b) :



Les ions hydroxyde  $\text{OH}^{-}$  formés dans la solution peuvent ensuite se combiner aux ions ferreux  $\text{Fe}^{2+}$  et précipiter en hydroxyde ferreux à la surface de l'acier, lorsque les concentrations en ions ferreux et hydroxyde le permettent :



Les réactions chimiques ci-dessus se produisent parce que avant d'être placée dans le coffrage, une armature en acier est rouillée puisqu'elle a d'abord été exposée à l'atmosphère. Lorsque le béton frais est mis en place autour de cet acier, l'eau de gâchage pénètre à travers les pores de la rouille, où elle forme progressivement de la ferrite de calcium hydraté ( $4 \text{ CaO}, \text{Fe}_2\text{O}_3, 13\text{H}_2\text{O}$ ). Mais surtout, cette eau réagit avec l'acier métallique et forme sur celui-ci une fine couche d'hydroxyde de fer  $[\text{Fe}(\text{OH})_2]$  et de calcium  $(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ .

Tous ces produits au voisinage de l'acier donnent à la solution interstitielle du béton un PH élevé, de l'ordre de 13.

L'eau de gâchage du béton permet donc de former autour de l'acier des produits, qui le protègent par passivation. Plus exactement, sous la rouille, une armature est recouverte d'une fine couche protectrice de produits blancs, à base de ferrite et d'hydroxyde de calcium.

Une telle protection disparaît si des agents agressifs s'infiltrant dans le béton et provoquent de nouvelles réactions chimiques qui diminuent le pH du béton.

## **II-3-2. La corrosion des aciers dans le béton**

### **II-3-2.1. Présentation générale**

Le béton, du fait de sa forte alcalinité, apporte aux armatures une excellente protection face à la corrosion. Dans ces conditions de pH, l'acier est protégé grâce à la formation d'un film extrêmement mince et adhérent appelé film passif pouvant être constitué de divers oxydes.

En présence d'eau et d'oxygène, ce film est détruit par différents agents tels que les chlorures, les sulfates et le gaz carbonique. Le métal est alors dépassivé et

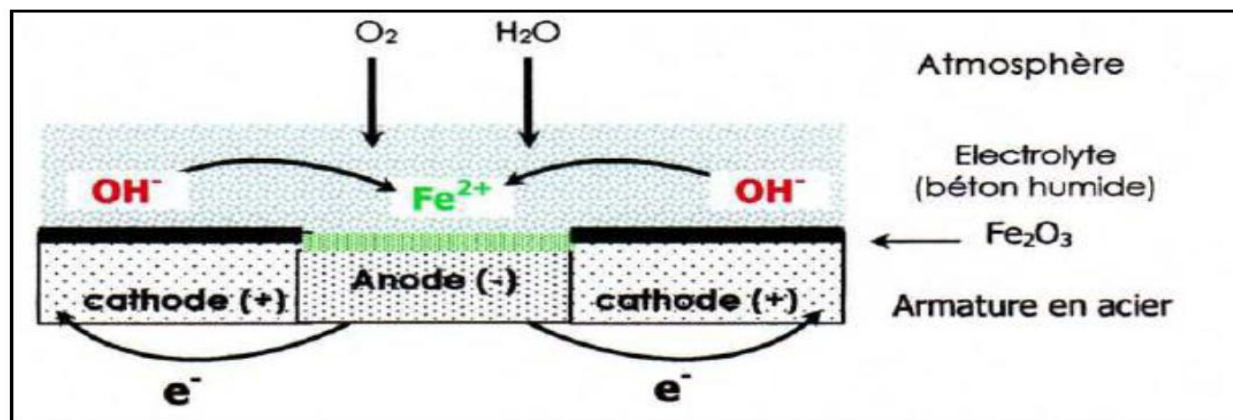
la corrosion devient possible avec formation de nouveaux oxydes, dont le volume au moins deux fois supérieur (jusqu'à six fois supérieur pour certains oxydes) à celui du fer initial entraînera des fissurations du béton qui accéléreront le processus de corrosion en facilitant la diffusion de l'oxygène et des espèces corrosives.

La corrosion des armatures est issue d'un processus électrochimique qui ne peut se produire que si certaines conditions sont réunies. En effet pour qu'un acier se corrode, il doit y avoir simultanément :

- un électrolyte ayant une conductivité ionique non négligeable ;
- une quantité suffisante d'oxygène accédant à la zone cathodique ;
- la présence d'un agent agressif.

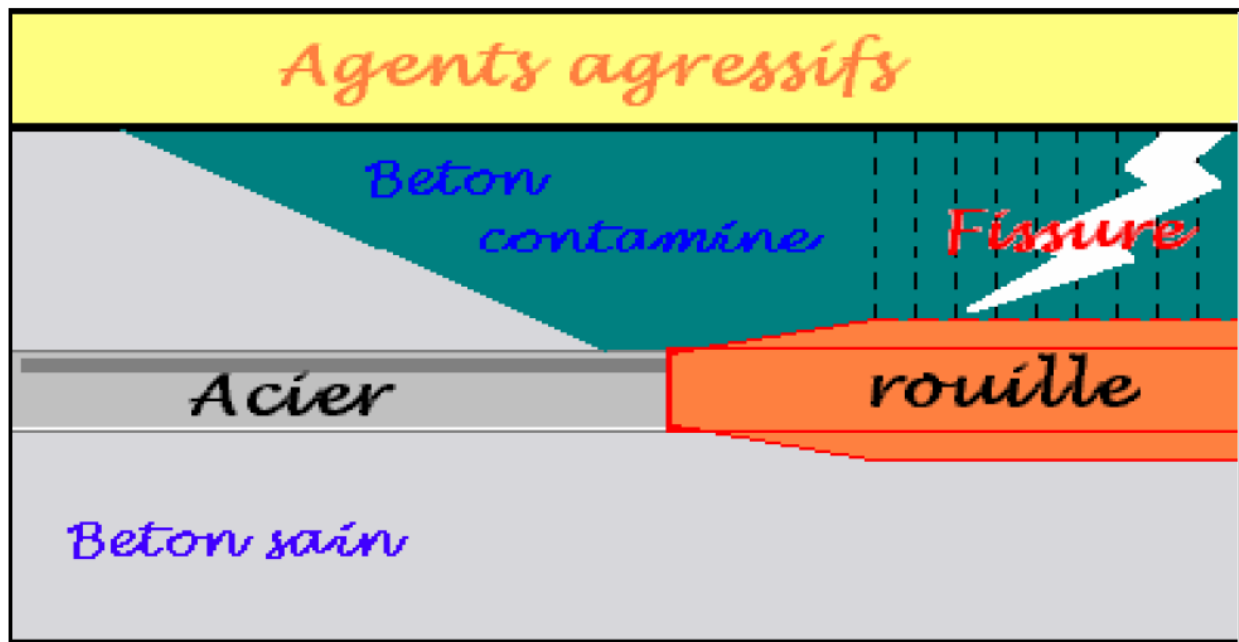
### II-3-2.2. Processus de la corrosion

Les processus fondamentaux de la corrosion des aciers dans le béton sont illustrés sur les figures 1 et 2.



**Figure (II.1)** : Représentation schématique de processus de base de la corrosion des aciers dans le béton .<sup>[11]</sup>

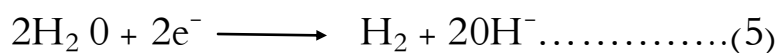
[11] Evaluation non destructive du gradient de teneur en eau dans les structures en béton armé par résistivité électrique-( Mémoire Option : Génie civil\*Université DE TOULOUSE 2016\*)



**Figure (II.2)** : Les étapes de la corrosion des aciers dans les bétons, induite par des agents agressifs. L'agent agressif pénètre dans l'entourage puis déclenche la formation de rouille. Celle-ci se développe et peut fissurer l'enrobage.<sup>[12]</sup>

L'oxygène qui peut diffuser dans le béton via le réseau poreux, se dissout dans la solution interstitielle et finit par atteindre la surface de l'acier. Sur cette surface, dans la zone cathodique, l'oxygène est réduit en ion hydroxyde ( $\text{OH}^-$ ) selon la réaction électronique (3a).

C'est, dans la plupart des cas, la réaction cathodique associée à la corrosion des aciers dans le béton. Cependant, dans le cas d'un béton carbonaté ayant un pH moins élevé (8-9), l'eau peut être réduite en dihydrogène selon la réaction (5) :



Quelque soit la réaction cathodique mise en jeu, la production d'ions hydroxyde fait augmenter le PH de la solution interstitielle au niveau de la zone cathodique.

[12] Evaluation non destructive du gradient de teneur en eau dans les structures en béton armé par résistivité électrique-( Mémoire Option : Génie civil\*Université DE TOULOUSE 2016\*)

La réaction anodique correspondante est la dissolution de l'acier conformément à la réaction (2). Celle-ci entraîne une diminution de la section de l'acier qui peut finir par rompre.

Les ions  $\text{Fe}^{2+}$ , produits intermédiaires de la corrosion, pouvant s'oxyder ensuite en  $\text{Fe}^{3+}$  sous certaines conditions, s'accumulent à la surface de l'acier ou sont dissous dans la solution interstitielle ou bien encore diffusent loin de l'armature en fonction des caractéristiques du milieu.

Dans la solution interstitielle du béton, normalement riche en oxygène et possédant un pH élevé, les ions  $\text{Fe}^{2+}$  peuvent rester sous la forme  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  ou être oxydés en ions  $\text{Fe}^{3+}$ , qui hydrolysés se trouvent alors sous la forme  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , formant ainsi un mince film passif à la surface de l'acier, ce qui va retarder la dissolution du fer. Dans ce cas, l'acier est bien protégé et il n'y aura pas de dommages détectables dus à la corrosion.

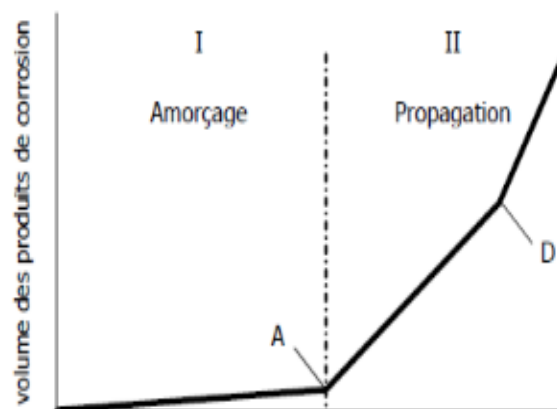
Sous certaines conditions, le cas lorsque le béton a été carbonaté et que le pH de la solution interstitielle est descendu en dessous de 9 ou lorsqu'une qualité suffisante d'ions chlorure ( $\text{Cl}^-$ ) a pénétré dans le béton, saturé en eau, et atteint l'armature de ce fait, la section de l'acier peut continuer de se réduire et la rupture de l'armature se produire. Ce processus, préjudiciable à la durée de vie d'un ouvrage, est favorisé lorsque le béton est saturé en eau car l'évacuation des ions  $\text{Fe}^{2+}$  de la surface de l'acier est facilitée. Ces ions peuvent alors migrer à la surface du béton et y former des rouilles mais ce type de dommage dû à la corrosion n'a pas d'impact significatif sur l'enrobage du béton ; il améliore même l'adhérence du béton sur l'acier.

La corrosion devient préjudiciable lorsque la vitesse de corrosion de l'acier est très élevée et que les produits de corrosion, ne pouvant être évacués de la zone de corrosion, s'accumulent à la surface de l'acier. C'est le cas si la solution interstitielle est riche en oxygène et en espèces agressives, et si l'enrobage de béton

n'est pas assez humide. Une partie des ions  $\text{Fe}^{2+}$  dissous peuvent alors s'oxyder et être transformés en oxydes ferriques hydratés ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) qui se déposent ensuite, avec des oxydes et hydroxydes ferreux, à l'interface acier béton. Le volume des produits de corrosion étant 2 à 6 fois supérieur à celui du métal, une contrainte d'expansion se crée à cette interface plus l'acier est corrodé, plus cette contrainte est importante, et lorsque celle-ci devient plus importante que la résistance à la traction de l'enrobage, des fissures apparaissent. Ces fissures vont accélérer la pénétration des espèces agressives et de ce fait les processus de corrosion. Un processus corrosion ? fissures ? pénétration d'espèces agressives ? plus de corrosion ? plus de fissures ? plus d'espèces agressives ... s'instaure.

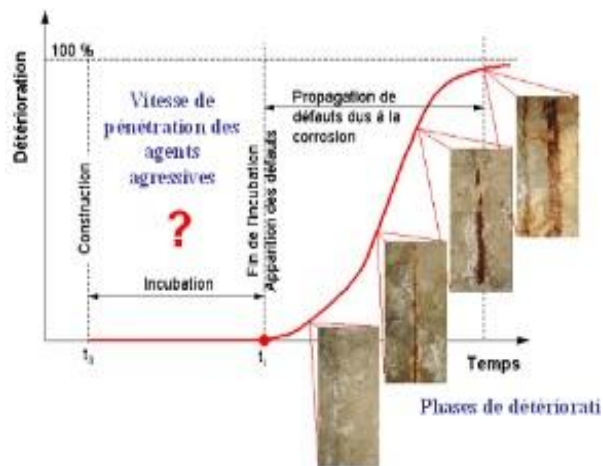
Selon **TUUTI**, l'évolution de la corrosion des armatures du béton s'effectue généralement en deux étapes figures 3 et 4:

D=Propagation-(Incubation) Volume des produits de corrosion. <sup>[13]</sup>



**Figure( II.3) :** Schéma de la cinétique de corrosion des armatures dans le béton

[13] Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures -( Mémoire Option : Structures \*Université de Université de Douala.2007\*)

**Figure( II.4) :**

Evolution du niveau de corrosion des armatures

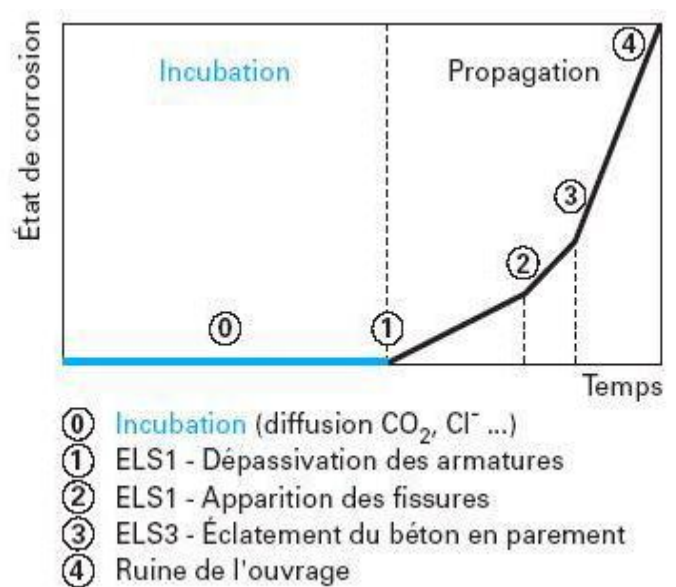
**Figure( II.5) :**

Schéma montrant les étapes de dégradation

En pratique, il doit être fait en sorte que la période d'amorçage (incubation) soit la plus longue possible. Pour cela, il faut prévoir des épaisseurs d'enrobage suffisantes et choisir une formulation de béton permettant de diminuer sa perméabilité à l'eau et aux gaz.<sup>[14]</sup>

### II-3-2.3. La dé passivation des armatures

Si un acier est préalablement recouvert de produits passivant (cas du béton sain), cette protection est altérée le plus souvent par l'introduction de deux agents pouvant se présenter simultanément : le dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$  (carbonatation) et l'ion chlorure  $\text{Cl}^-$  (chlorurassions) en excès au niveau des armatures. Il se produit alors une dé passivation.

Les deux phénomènes de carbonatation et de chlorurassions interagissent entre eux puisque la carbonatation, en changeant la structure du réseau poreux,

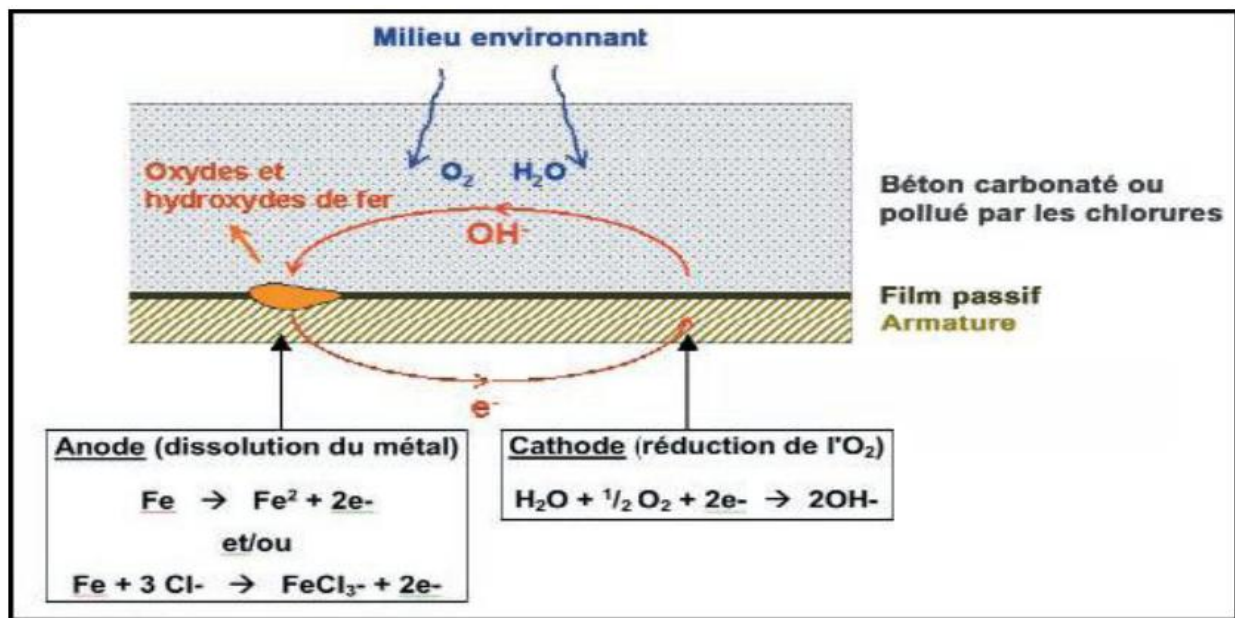
[14]Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures-( Mémoire Option : Structures \*Université de Université de Douala.2007\*)

peut affecter la diffusion des chlorures au sein du béton. En effet, après carbonatation, il a été observé une réduction de la porosité totale et une redistribution de la taille des pores, rendant plus difficile la pénétration des chlorures.

Le mécanisme de dé passivation comprend les étapes suivantes :

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

Lorsque le pH du béton est inférieur à environ 9, les teneurs critiques en chlorures et en carbonates provoquant la dé passivation de l'acier sont très faibles et correspondent à des eaux naturelles, potables. C'est pourquoi, en pratique, ce PH est souvent considéré comme étant la valeur critique de dé passivation des aciers.



**Figure( II.6) :** Principe de la réaction chimique aboutissant à la formation de rouille. <sup>[15]</sup>

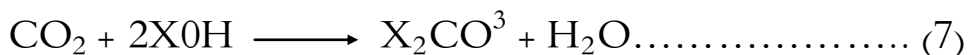
[15] Evaluation non destructive du gradient de teneur en eau dans les structures en béton armé par résistivité électrique-( Mémoire Option : Génie civil\*Université DE TOULOUSE 2016\*)

### ✓ La carbonatation

La carbonatation est engendrée par réaction entre le dioxyde de carbone de l'air et certains constituants du béton tel que le ciment. Le dioxyde de carbone gazeux pénètre par diffusion dans le réseau poreux du béton et réagit avec la portlandite  $\text{Ca(OH)}_2$  pour former des carbonates tel que le calcite  $\text{CaCO}_3$ , ce qui provoque un abaissement du pH à 9 environ, suivant la réaction suivante en milieu aqueux :



En présence de bases alcalines, telles que NaOH ou KOH, la solubilité de la chaux est relativement faible et la réaction peut se ralentir. Cependant ces bases alcalines se carbonatent elles aussi :



Avec X= Na ou K

La carbonatation des bases alcalines augmente la solubilité de la chaux qui peut alors se carbonater en plus grande quantité :



Avec X = Na ou K

La carbonatation est un phénomène progressif qui, avec le temps, atteint des couches de plus en plus importantes.<sup>[16]</sup>

La vitesse de carbonatation est fonction de nombreux paramètres dont les plus importants sont la perméabilité et le taux d'humidité relative du milieu ambiant. La vitesse de carbonatation est maximale pour une humidité comprise entre 40% et

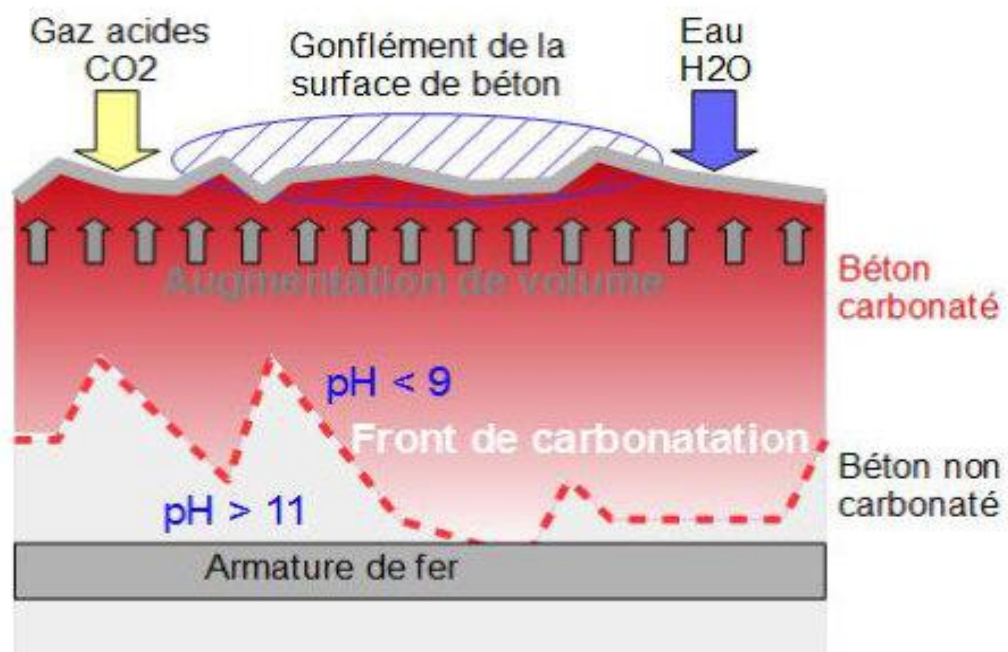
[16] Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures -(Mémoire Option : Structures \*Université de Douala.2007\*)

80%, 60% étant considéré comme la valeur la plus critique. Dans les environnements secs, la quantité d'eau est insuffisante pour dissoudre le  $\text{CO}_2$ , alors que dans les environnements très humides, le béton étant saturé, la diffusion de  $\text{CO}_2$  est considérablement ralentie.

De très fortes teneurs, dans un béton, en cendres volantes (>30%) et en laitiers (>50%) peuvent accélérer significativement sa vitesse de carbonatation.<sup>[17]</sup>

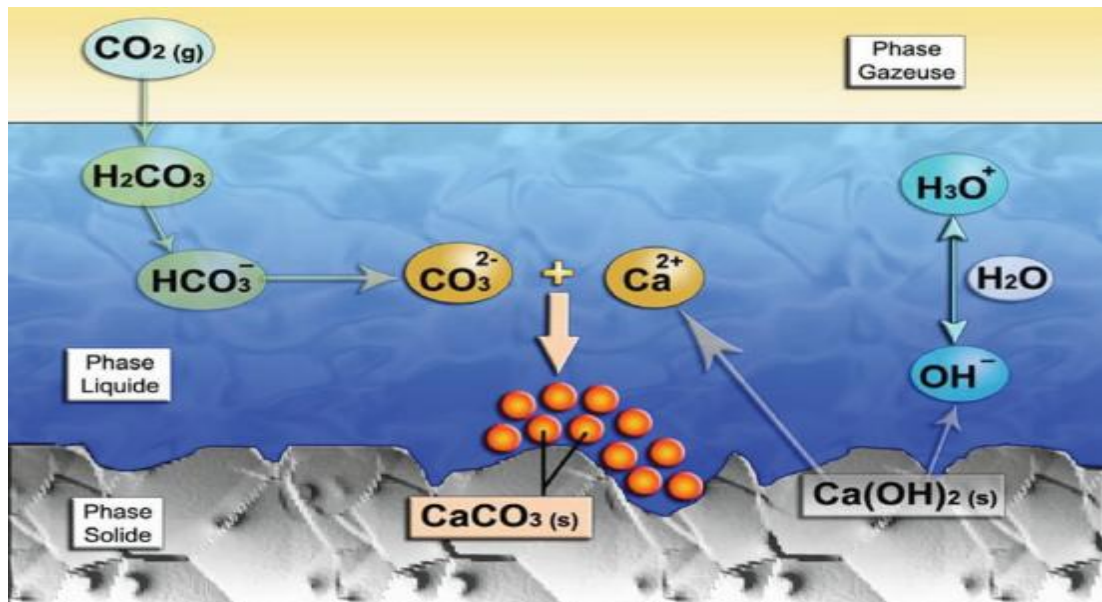
La carbonatation commence donc à la surface du béton et concerne une certaine épaisseur (dite profondeur de carbonatation) de ce matériau.

Le schéma de la figures 5 et 6 illustre le principe de la formation de la carbonatation:



**Figure( II.7) :** Schéma de principe de la formation de la carbonatation.

[17]Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures-( Mémoire Option : Structures \*Université de Université de Douala.2007\*)



**Figure( II.8) :** Schéma de principe de la formation de la carbonatation

### ✓ Les ions chlorures

La corrosion des armatures générée par les ions chlorures est la principale cause de dégradation des structures en béton armé.

Les chlorures agissent dans les mécanismes de corrosion en diminuant la résistivité de l'électrolyte et en permettant un amorçage plus rapide de la corrosion en dé passivant la couche superficielle. La corrosion qui en résulte sous forme de piqûres à la surface de l'acier est une corrosion localisée. Les chlorures agissent aux zones anodiques, de surface bien plus petite que celles des zones cathodiques, et la vitesse de corrosion sur les zones anodiques s'en trouve fortement augmentée. Une fois la corrosion amorcée, il est bien plus difficile d'y remédier que dans le cas de la carbonatation car le processus est auto catalytique.

Les chlorures présents dans le béton peuvent provenir de deux sources différentes. Soit ils sont présents au moment du gâchage : utilisation d'eau contenant des chlorures ou agrégats contaminés. Soit ils proviennent de l'environnement (atmosphère marine, sels de dé verglaçage, produits chimiques) et ont diffusés dans le béton. Les chlorures existent sous deux formes dans le béton.

- Les chlorures libres qui sont dissous dans la solution interstitielle .
- Les chlorures piégés ou liés qui sont combinés à des hydrates du ciment et à des agrégats, ou absorbés physiquement sur les parois des pores.

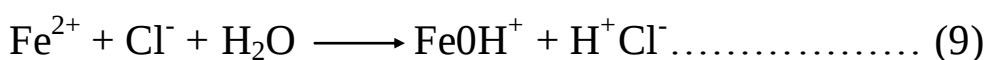
Les ions chlorures qui pénètrent dans le béton peuvent réagir chimiquement avec l'aluminate tricalcique ( $C_3A$  en nomenclature des cimentiers) et former des monochloroaluminates hydratés ( $C_3A \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ ), relativement stables dans le béton.

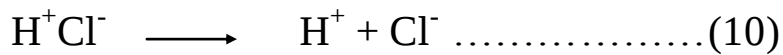
La concentration en hydroxydes dans la solution interstitielle agit de façon significative sur la proportion des chlorures liés : plus la concentration en hydroxydes est élevée, moins il y aura de chlorures dans la solution. Une élévation de température, quant à elle, diminue la capacité de chlorures à se lier. Typiquement, 40 à 50% des chlorures totaux sont liés.

Seuls les chlorures libres participent à la corrosion des armatures.

Les chlorures ayant atteint l'armature attaquent l'acier initialement passivé, en certains points localisés. Le film passif est alors détruit localement et laisse apparaître des zones anodiques où l'acier est dissout. Le reste de la surface qui est encore passivée correspond aux zones cathodiques. La surface des zones cathodiques étant bien plus importante que celle des zones anodiques, la dissolution de l'acier croît en profondeur plutôt qu'en surface de l'acier formant ainsi des piqûres ou des cavernes. Le mécanisme de ce type de corrosion est complexe car la composition de la solution à l'intérieur de la piqûre est modifiée par rapport à celle de la solution interstitielle qui l'entoure.

Au sein de la piqûre, les ions chlorures s'associent avec l'ion hydrogène de l'eau pour former de l'acide chlorhydrique.

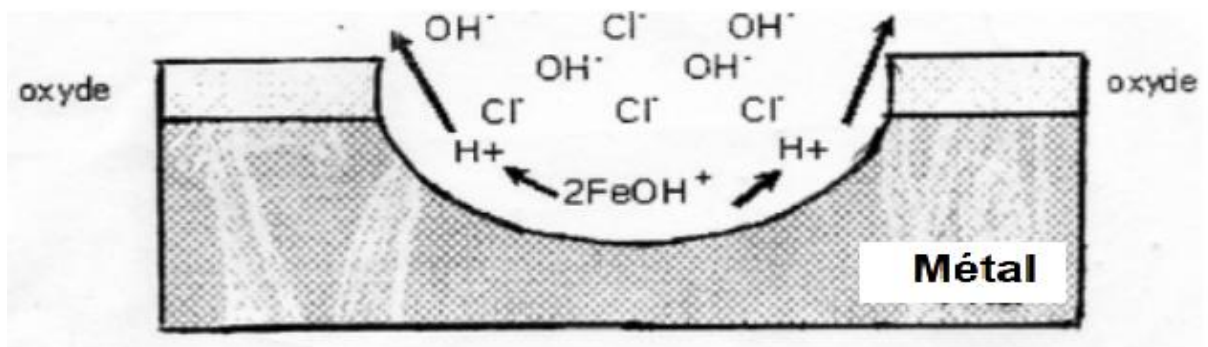




Ces réactions acidifient la solution dans la piquûre, abaissant fortement le pH entre 3,8 et 5. Les ions chlorures régénérés continuent d'être actifs pendant tout le processus de corrosion qui est ainsi auto catalysé.

Les ions hydroxyde de la phase interstitielle du béton se combinent alors avec les ions ferreux  $\text{Fe}^{2+}$  ayant diffusé hors de la piquûre tandis que la réaction cathodique est la même que dans le cas de corrosion en absence de chlorure.

Tant que la solution à l'intérieur de la piquûre est acide, la dissolution de l'acier reste active et les piquûres croissent en profondeur. Ce mécanisme est schématisé **Figure( III.9)** par le modèle de **PAGE et al.** Les piquûres continuent de croître si la concentration locale en ions chlorure est suffisante (la concentration des chlorures doit augmenter tandis que celle des ions hydroxyde doit diminuer). Si ce n'est pas le cas, la repassivation de l'acier est possible.



**Figure( II.9) :** Modèle de PAGE et al. Attaque de l'acier par les ions chlorure

Ainsi, une trop faible concentration en ions chlorure dans la solution interstitielle ne détruira pas le film passif. Il existe donc une teneur critique en ions chlorure ou un rapport en concentration chlorures/hydroxydes noté  $[\text{Cl}^-] / [\text{OH}^-]$ . Dès que le rapport  $[\text{Cl}^-] / [\text{OH}^-]$  dépasse le seuil critique égal à 1, la solution est

instable : elle devient plus acide. Cette instabilité correspond à la formation de produits de corrosion qui, en présence d'oxygène ne protègent pas l'acier. Mais lorsque ce rapport est inférieur à 1, les chlorures n'ont pas d'effet sur cette solution qui reste donc stable.

Sur le plan pratique, les paramètres qui peuvent influencer sur cette teneur critique en chlorure sont : le dosage en ciment (et le rapport Eau/Ciment), la valeur du pH, la nature du ciment (fixation de chlorure, etc.) et celle des additifs éventuels (cendres, etc.), la température moyenne, la teneur en oxygène et l'humidité du béton. L'état d'enrouillement initial des armatures a également un effet sur la valeur de la teneur critique en chlorure.

Le seuil critique est considéré atteint s'il y a 0,2 à 0,4% d'ions chlorure par rapport à la masse du ciment.

Il est à noter que la teneur en chlorure qui amorce une corrosion n'est pas liée à la vitesse de corrosion des armatures, une fois dé passivées.

#### **II-3-2.4. Facteurs influents sur 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.

#### **II-3-2.4.1. Influence de l'enrobage**

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.

#### **II-3-2.4.2. 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.

#### **II-3-2.4.3. 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.

Pour des taux d'humidité inférieurs à 80%, l'oxygène atteint facilement les aciers mais la faible conductivité du béton augmente mais la faible conductivité du béton limite la vitesse de corrosion. Plus le taux d'humidité augmente, plus la conductivité du béton augmente mais en contrepartie la diffusion de l'oxygène vers les armatures se fait de plus en plus difficilement. L'humidité relative la plus favorable à l'apparition de la corrosion est de 70 à 80%.

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.

#### **II-3-2.4.4. Influence de la résistivité du béton**

La résistivité électrique affecte de manière significative la corrosion des armatures puisqu'il existe une relation entre la corrosivité et la résistivité du béton. La résistivité du béton est fonction de la composition de la solution interstitielle, de la microstructure du béton (taille et distribution des pores), de l'humidité et de la teneur en sels ainsi que de la température.

La valeur de la résistivité du béton se situe le plus souvent entre  **$10^3$  et  $10^7$  ohm/centimètres ( $\Omega/\text{cm}$ )**.

La résistivité électrique est une caractéristique spécifique d'un matériau à s'opposer à la circulation du courant électrique. Autrement dit, c'est la résistance d'un cube unitaire d'un m de côté face au passage du courant. Contrairement à la résistance, la résistivité est une grandeur constante du matériau. Elle s'exprime souvent en ohm. Mètre [ $\Omega.\text{m}$ ] dans le système international mais on trouve aussi dans la littérature des valeurs en  **$\Omega.\text{cm}$  ou  $\text{k}\Omega.\text{cm}$**

Son inverse, la conductivité électrique ( $\sigma$ ), est la capacité du matériau à laisser passer le courant électrique. Elle est donnée en siemens par mètre ( $\text{S.m}^{-1}$ )

La résistivité s'exprime par l'équation suivante: <sup>[18]</sup>

$$\sigma = \left( R \cdot \frac{S}{L} \right)$$

Où:

: résistivité électrique [ $\Omega.\text{m}$ ]

R: résistance électrique [ $\Omega$ ]

L : longueur de l'échantillon [ $\text{m}$ ]

S : section plane de l'échantillon [ $\text{m}^2$ ]

La valeur de la résistance R s'obtient en faisant le rapport de la différence de potentiel entre les deux surfaces opposées à l'intensité du courant qui traverse le matériau (loi d'Ohm).

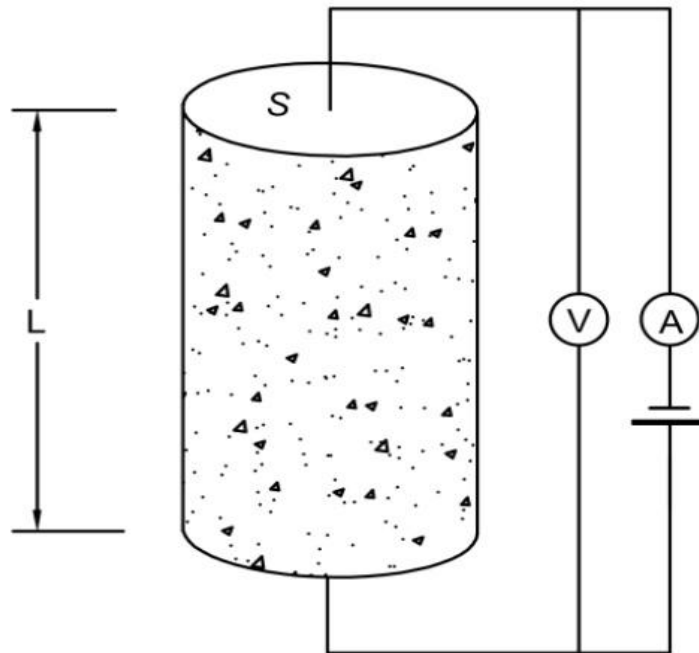
---

[18] Evaluation non destructive du gradient de teneur en eau dans les structures en béton armé par résistivité électrique -( Mémoire Option : Génie civil\*Université DE TOULOUSE 2016\*)

$$R = \Delta V / I$$

Avec  $\Delta V$  : différence de potentiel électrique [V]

I : l'intensité du courant [A]



**Figure (II.10)** : Illustration du principe de la mesure de résistivité. <sup>[19]</sup>

La gamme de résistivité électrique du béton est très large, en fonction de sa composition et des conditions environnantes (tableau n.2).

[19] Evaluation non destructive du gradient de teneur en eau dans les structures en béton armé par résistivité électrique -( Mémoire Option : Génie civil\*Université DE TOULOUSE 2016\*)

| Environnement                                                        | Résistivité électrique(*) [ $\Omega \cdot m$ ] |                                                                                                       |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                      | Ciment Portland Ordinaire (CEM I)              | Ciment contenant le laitier de haut fourneau (>65%) ou cendre volante (>25%) ou fumée de silice (>5%) |
| Très humide, submergé, sale d'arrosage                               | 50 – 200                                       | 300 – 1000                                                                                            |
| A l'extérieur, conditions naturelles                                 | 100 – 400                                      | 500 – 2000                                                                                            |
| A l'extérieur, protégé contre la carbonatation [20°C/80%RH]          | 200 – 500                                      | 1000 – 4000                                                                                           |
| Carbonaté                                                            | $\geq 1000$                                    | 2000 – 6000 et plus                                                                                   |
| A l'intérieur [20°C/50%RH]                                           | $\geq 3000$                                    | 4000 – 10000 et plus                                                                                  |
| (*) : Mesure sur les structures existantes (âgées de plus de 10 ans) |                                                |                                                                                                       |

**Tableau (II.2) :** Gamme de résistivité électrique de différents bétons [Polder et al., 2000]

La résistance électrique affecte grandement la corrosion de l'armature car il existe une relation entre la corrosion et la résistance du béton. La résistance du béton est fonction de la composition de la solution poreuse, de la microstructure du béton (taille et distribution des pores), de la teneur en humidité et en sel ainsi que de la température.<sup>[20]</sup>

Le tableau n.3 présente la corrélation établie entre la résistivité mesurée du béton et la probabilité de corrosion des armatures.

| Résistivité du béton (RVL. cm) | Probabilité de corrosion |
|--------------------------------|--------------------------|
| < 500                          | Corrosion quasi-certaine |
| 500 – 1200                     | Corrosion probable       |
| > 1200                         | Corrosion improbable     |

**Tableau (II.3) :** Probabilité de corrosion en fonction de la valeur de la résistivité

[20]Evaluation non destructive du gradient de teneur en eau dans les structures en béton armé par résistivité électrique-( Mémoire Option : Génie civil\*Université DE TOULOUSE 2016\*)

#### **II-3-2.4.5. Effet de l'oxygène**

Dissous dans la solution interstitielle, l'oxygène est primordial dans la réaction cathodique du processus de corrosion des armatures dans le béton.

Plus la teneur en oxygène est importante, plus la vitesse de dissolution de l'acier augmente.

#### **II-3-2.4.6. Autres agents agressifs**

Des sels, contenus dans l'eau pénétrant le béton, peuvent contribuer à la formation de produits de corrosion sur l'acier. Ainsi, les ions sulfate agissent qualitativement comme les ions chlorures et certains sels solubles tels les perchlorates, les acétates, les halogénures autres que les chlorures peuvent aussi être corrosifs pour les armatures.

## II-4. Essais non destructifs du béton

### II-4-1. Introduction

Les problèmes de qualité rencontrés dans les structures en béton apparaissent à différentes phases de la réalisation des ouvrages, c'est pour cette raison que depuis longtemps il y a une demande accrue pour des méthodes plus précises et, en même temps, plus souples d'évaluation de la qualité du béton.

Le contrôle par essais destructifs nécessite la confection d'éprouvettes prélevées représentant un échantillon. Ce contrôle ne peut être effectué à 100 % ou tout au moins sur un échantillonnage significatif. De plus, l'échantillon prélevé n'est pas toujours représentatif du béton de la structure réelle. Ainsi, pour répondre à ces problèmes, on a développé une gamme d'essais in situ appelés « Essais Non Destructifs \*END\* » (**Non-Destructive Testing (NDT)**) venant compléter les essais destructifs.

Les essais non destructifs consistent à prendre des mesures qui n'endommagent pas les constructions, Ils représentent des méthodes de reconnaissance couramment appliquées aux structures de bâtiments.

Les essais non destructifs peuvent jouer un rôle exceptionnel dans la garantie de la qualité du béton et dans le développement ultérieur de la technologie de construction. La signification de ces essais se développera considérablement dans l'avenir, parce que sa technologie de mesure automatisée et la réduction de la taille de l'appareillage de mesure ouvriront des applications entièrement nouvelles.

Une importante caractéristique des essais non destructifs est qu'ils peuvent être refaits au même endroit ou presque, ce qui permet de suivre les changements des propriétés du béton dans le temps.

## **II-4-2. But d'utilisation**

Ces essais sont rapides et faciles à mettre en oeuvre, et apportent de surcroît une réponse globale à l'échelle d'une structure ou d'un ouvrage, dans le cadre de contrôles d'ouvrages neufs ou en construction comme de diagnostics d'état d'ouvrages anciens.

### **II-4-2-1. Principaux domaines d'application**

Les essais non destructifs permettent de contrôler la qualité de la construction et mesurer de façon indirecte les caractéristiques des matériaux à savoir :

- La résistance
- l'homogénéité
- La porosité
- La durabilité

#### **II-4-2-1.1. historique:**

L'essai non destructif du béton est de grande importance scientifique et pratique. Le sujet a suscité l'attention croissante pendant ces derniers années, particulièrement le besoin de caractérisation de la qualité des constructions endommagées faites en béton, en utilisant des méthodes non destructives.

Une gamme d'essais non destructifs in-situ, a été développée, par tant de chercheurs dans ce domaine : Le premier essai non destructif à été réalisé par WILLIAMS EN (1936), en suite et pendant le développement de domaine de construction, ERNEST SCHMILT (1948), JONES (1962), WHITEHURST (1966), MALHOTRA (1976) ont présenté une enquête complète de littérature sur les méthodes non destructives normalement utilisées pour l'essai et l'évaluation du béton, BUNGEY (1982). Au milieu des années soixante SKRAMTAEV ET LESHCHINSKY (1966) nt proposé pour la première fois l'utilisation de deux

méthodes non destructifs ensembles, et le travail le plus fondamental à ce sujet a été présenté par FACAOARU (1969). En (1991) LESHCHINSKY a récapitulé les avantages des essais non destructifs comme réduction de la consommation de travail de l'essai, une diminution de la consommation de travail des travaux préparatoires, un peu de dommages structuraux, une possibilité d'examiner la résistance en structures ne peuvent pas être forés avec application de moins d'équipement d'essai cher, par rapport à l'essai destructif. Ces avantages sont sans valeur si les résultats ne sont pas fiables, représentatif, et aussi étroitement comme possible à la force réelle de la partie examinée de la structure.

#### **II-4-2-1.2. Avantages des méthodes non destructifs**

Les méthodes non destructifs présentent les avantages suivants :

- La performance ou l'apparence de la structure n'est pas modifiée.
- La possibilité de suivre le changement des propriétés du béton dans le temps.
- Une plus grande sécurité, et une meilleure planification de la construction.
- Une progression plus rapide et plus économique.

#### **II-4-2-1.3. Méthodes D'essais**

Il existe deux types de méthodes pour l'estimation de la résistance de compression du béton. Les premiers, englobent les méthodes qui ne mesurent pas directement la résistance mais d'autres propriétés du béton, à partir desquelles, une estimation de la résistance peut être obtenue. Ces méthodes incluent les tests suivants:

- ✓ Essai au scléromètre.
- ✓ Essai d'auscultation dynamique.

- ✓ Méthodes combinées.
- ✓ Méthode par carottage,...etc.

### II-4-3. Essai au scléromètre

L'essai au scléromètre consiste à projeter une masse sur la surface du béton avec une énergie initiale constante. Suite au choc, une partie de l'énergie est absorbée par le béton, l'autre partie provoque le rebondissement de la masse. L'énergie d'impact est produite par un système de ressorts dont l'amplitude du mouvement de recul est fonction de :

- L'énergie de recul.
- Caractéristiques des systèmes de ressorts.

La mesure de la dureté au choc permet d'évaluer la résistance d'un béton de manière non destructive. Cette méthode est intéressante en raison de sa simplicité , elle permet de faire rapidement des contrôles de régularité des bétons d'un ouvrage.

La détermination de la dureté est basée sur la mesure du recul que subit un dispositif mobile (commandé par un ressort) à la suite d'une collision entre le dispositif et la surface du béton. Cet essai est l'un des plus vieux essais non destructifs et il est encore très utilisé de nos jours il a été développé par ERNST SCHMIDT EN (1948) et est connu sous le nom l'essai au marteau Schmidt ou essai au scléromètre. Le marteau de Schmidt (photo IV.1)) est resté le seul instrument connu qui utilise le principe de rebondissement pour les essais sur le béton selon R.F FELDMAN (1977). En (1984) T.AKASHI ET S.AMASAKI ont déclaré que malgré son apparente simplicité, l'essai au scléromètre sous-tend des problèmes complexes d'impact et de propagation de l'onde qui lui sont associés.



**Photo(II.5)** : scléromètre

#### II-4-3-1. Principe

Le principe de base de l'essai au scléromètre est que le rebond d'une masse élastique dépend de la dureté de la surface sur la quelle frappe la masse.

Dans l'essai au scléromètre une masse approximative de 1.8 kg montée sur un ressort a une quantité potentielle fixe d'énergie qui lui est transmise par un ressort tendu a partir d'une position fixe, ce que l'on obtient en pressant la tête du marteau contre la surface du béton mis à l'essai. Lors de son relâchement, la masse rebondit depuis la tête, toujours en contact avec la surface du béton et la distance qu'elle parcourt, exprimée en pourcentage de l'extension initiale du ressort est appelée l'indice de rebondissement. Cet indice est indiqué par un curseur qui se déplace le long d'une règle graduée.

Quelques modèles de scléromètres impriment le relevé des résultats sur un rouleau de papier paraffiné. L'indice de rebondissement est une mesure arbitraire, car elle dépend de l'énergie emmagasinée par le ressort et de la dimension de la masse.

| Type de recul   | Moyen de mesure        |
|-----------------|------------------------|
| Recul linéaire  | Un indicateur à lame   |
| Recul angulaire | Un système de freinage |

**Tableau (II.4) :** Moyens de mesure selon type de recul au scléromètre

### II-4-3-2. Appareillage

Il existe plusieurs modèles de scléromètres selon le type de recul ainsi que l'énergie d'impact. Le modèle le plus utilisé est le scléromètre SCHMIDT (Suisse). L'appareil est composé d'une masselotte chargée par un ressort qui se projette sur une tige métallique appelée tige de percussion. Il est livré avec une pierre à polir et un bloc d'étalonnage.

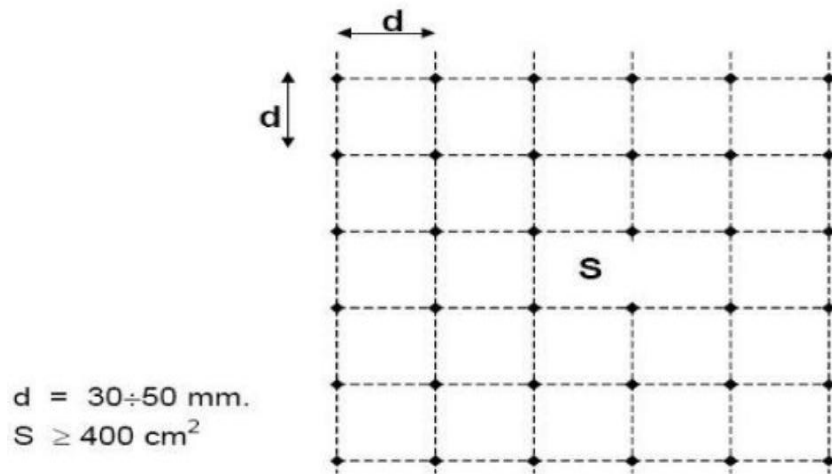
### II-4-3-3. Mode Opératoire

#### II-4-3-3.1. Préparation de la surface

Les mesures doivent être effectuées sur des surfaces nettes ne présentant pas de nids de gravier, des écaillages, de texture grossière, de porosité élevée ou de armatures affleurantes. La préparation de la surface consiste à éliminer tout enduit ou Peinture adhérent ou poncer si cette surface est constituée d'une couche superficielle friable. Toute trace d'eau sur la surface doit être essuyée.

#### II-4-3-3.2. Points de mesures

La surface de mesure doit être divisée en zones de 400 cm<sup>2</sup> au moins, et structurée en une grille de points de mesure ayant pour espacement  $d = 30 \div 50$  mm. Les points de mesures extrêmes doivent être au moins à 30 mm des bords de la surface testée.

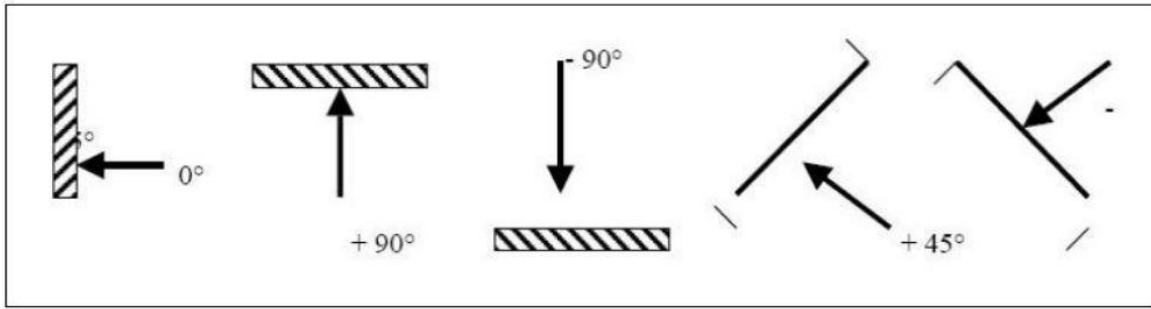


**Figure (II.11) :** Grille de mesure sur ouvrage

Effectuer au moins 10 mesures successives dans la même zone. La surface de cette zone est équivalente à celle d'un carré d'environ 25 cm de côté. Au cours de ces mesures, il convient de ne pas effectuer l'essai à moins de 3 à 4 cm des bords de l'élément testé.

#### **II-4-3-4. Méthodes de mesure de l'Indice de rebondissement**

L 'indice de rebondissement est la mesure enregistrée sur une échelle graduée fixe par rapport au bâti de l'appareil de scléromètre, après la projection d'une masselotte chargée par ressort sur une tige métallique en contact avec la surface du béton. Cette mesure est fonction de l'angle d'inclination de l'appareil par rapport à l'horizontal.



**Figure (II.12) :** Inclinaisons possibles par rapport à l'élément à ausculter

#### II-4-3-5. Étalonnage de l'appareil

Le scléromètre doit être contrôlé par des essais d'étalonnage, car les constantes des ressorts changent après plusieurs utilisations. Deux méthodes sont utilisées

##### II-4-3-5.1. Sur bloc en néoprène armé

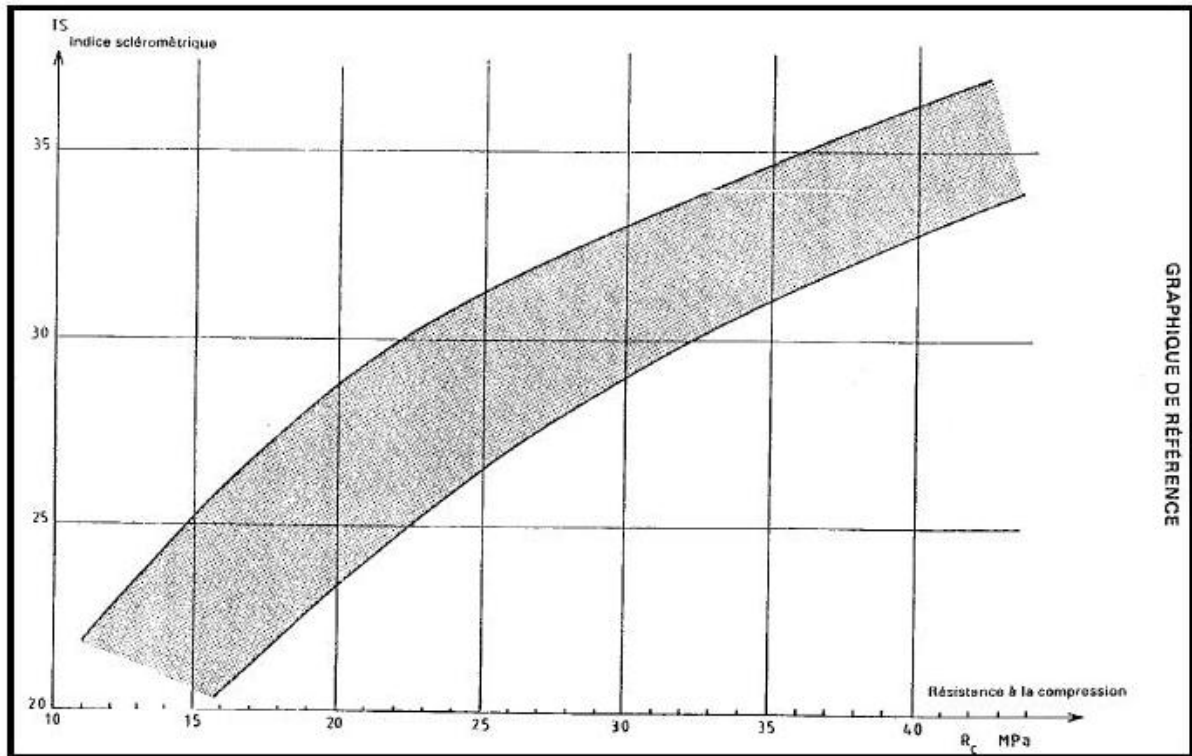
Effectuer sur le bloc en néoprène, posé sur une assise rigide et plane, deux séries de 27 mesures espacées de 5 s et calculer la moyenne de l'indice sclérométrique  $l$  de la 2<sup>ème</sup> série. La position de l'appareil doit être verticale. Deux cas peuvent se présenter :

- $28 \leq l \leq 32$  le fonctionnement de l'appareil est satisfaisant.
- $l < 28$  ou  $l > 32$  l'appareil est défectueux ; il sera procédé au nettoyage de l'appareil pour refaire une nouvelle fois la mesure de  $l$ .

##### II-4-3-5.2. Sur éprouvettes de béton

Cette méthode consiste à déterminer la moyenne de l'indice sclérométrique  $l$  par des mesures effectuées sur trois séries de trois éprouvettes de béton, correspondant aux trois classes de résistances à la compression 15, 25 et 35 Mpa. Les mesures de l'indice  $l$  sont suivies d'un essai d'écrasement des éprouvettes. Les trois couples de valeurs sont reportés sur le graphique de la figure III.3. Dans

le cas où les trois points représentatifs se retrouveraient à l'intérieur du fuseau, donc le fonctionnement de l'appareil est satisfaisant. Dans le cas contraire, le fonctionnement de l'appareil est défectueux. Une révision est nécessaire avec un certificat d'étalonnage.



**Figure (II.13) :** Graphe de contrôle du fonctionnement de l'appareil

#### II-4-3-6. Inconvénients de la méthode sclérométrique

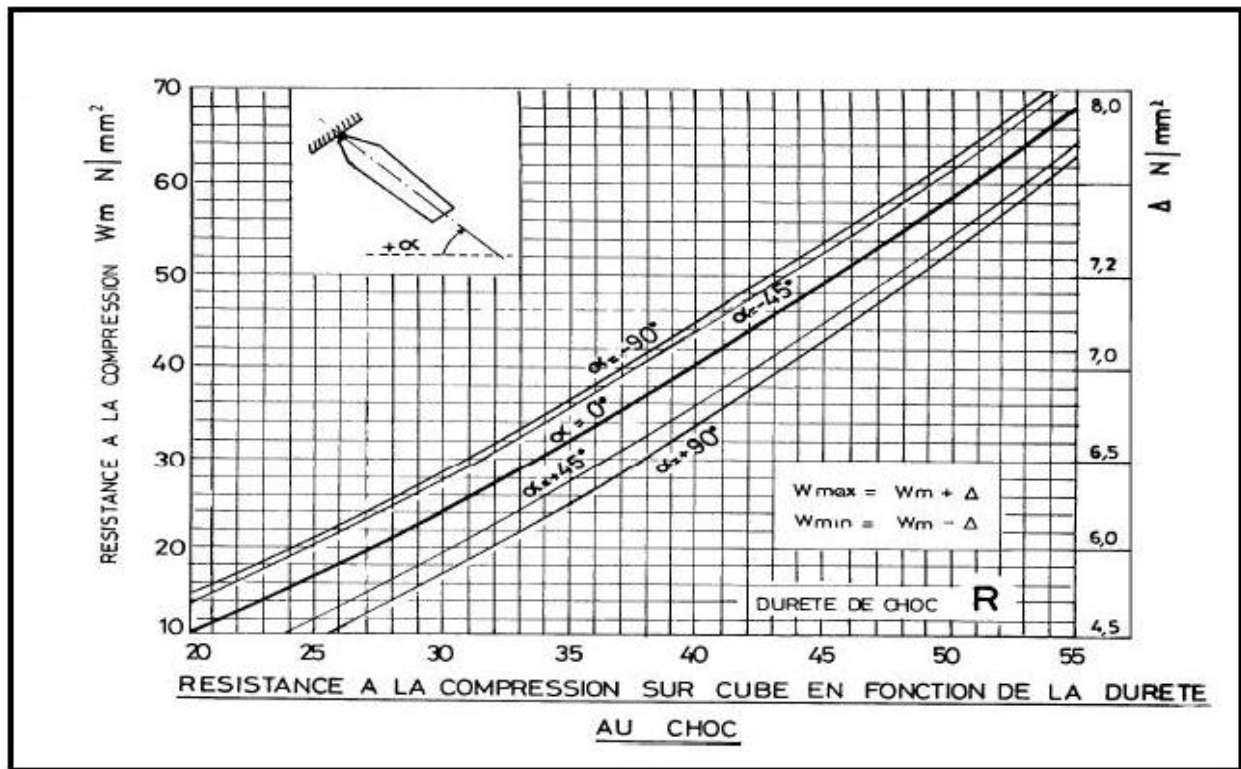
La méthode sclérométrique constitue une voie directe utilisée pour la détermination du degré d'homogénéité du béton et la dureté de la surface de l'élément en béton. Bien que l'essai au scléromètre soit utile, il ne constitue nullement une mesure fiable de la résistance du béton compte tenu des paramètres influant la précision de détermination de cette résistance. Plusieurs méthodes sont utilisées pour la transformation des indices sclérométriques en résistance mécanique à la compression du béton.

**II-4-3-7. Interprétation Des Résultats De Contrôle Du Béton Au Scléromètre****II-4-3-7. 1. Méthode de la courbe de calibrage**

De la même manière que pour l'ultrason, la courbe de calibrage est déterminée en effectuant l'essai au scléromètre sur au moins 30 éprouvettes. La courbe de calibrage doit être revue en cas de changement de la composition du béton ou des conditions de conservation. La précision sur la résistance du béton obtenue par la méthode de la courbe de calibrage est évaluée à  $\pm (20\% \div 25\%)$ .

**II-4-3-7. 2. Méthode de la courbe unique**

Dans la plupart des cas, la composition du béton ainsi que les conditions de conservation affectant la corrélation « Indice sclérométrique – Résistance du béton » sont inconnues. On utilise alors une courbe de transformation unique figurant sur l'appareil fourni par le fabricant. La précision sur la résistance du béton obtenue par la méthode de la courbe peut être évaluée à  $\pm 50 \%$ .



**Figure (II. 14) :** Courbe de transformation unique

La résistance du béton peut aussi être obtenue à partir de la formule suivante:

$$R = I^2 / 32$$

Avec: R : résistance

I : indice sclérométrique

### II-4-3-7. 3. Références normatives

NF EN 12504-2

Essais pour béton dans les structures - Partie 2 : essais non destructifs - Détermination de l'indice de rebondissement.

### II-4-3-8. Les avantages

- ✓ C'est une méthode peu coûteuse, simple et rapide. FELDMAN (1977).

- ✓ L'essai au scléromètre est comparatif, il est utile pour évaluer l'homogénéité du béton dans une structure ou lors de la fabrication d'éléments semblables des éléments préfabriqués NEVILLE (2000).
- ✓ L'essai peut aussi être utilisé pour vérifier si la valeur de l'indice de rebondissement a atteint la valeur désirée correspondant à la résistance du béton, ce qui peut aider à décider du moment où l'on peut mettre la structure en service.
- ✓ Une utilisation de cet essai est de pouvoir vérifier si le développement de la résistance d'un béton a été affecté par le gel au jeune âge. (Selon la norme ASTM C 805-85 un béton encore gelé peut donner un indice de rebondissement très élevé).
- ✓ Une application particulière de l'essai au scléromètre consiste à évaluer la résistance à l'abrasion des planchers de béton, qui dépend largement de la dureté de surface.

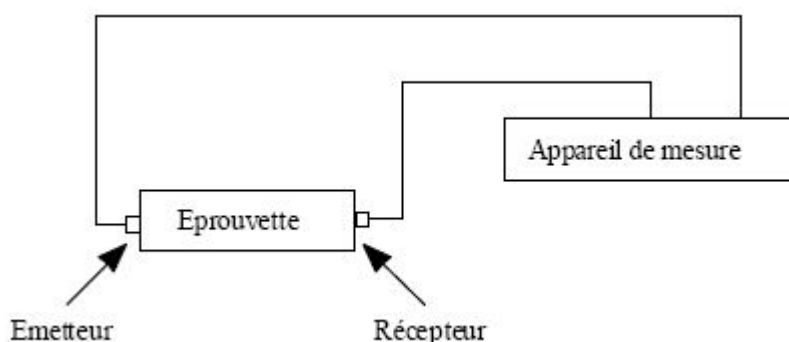
#### **II-4-4. Essai d'auscultation dynamique**

Connu sous le nom d'essai aux ultrasons, cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée.

##### **II-4-4-1. Principe**

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'ondes sonores) à parcourir une distance connue. D'après LESLIE et CHEESMAN, l'état du béton totalement inconnu peut se déterminer approximativement selon la vitesse mesurée.

Les impulsions sont produites par des cristaux piézo-électriques à excitation par choc des cristaux semblables sont utilisées dans le récepteur JONS.R ET FACAOARU (1969). La fréquence de générateur d'ondes est comprise entre 10 et 150 HZ, le temps de propagation des ondes dans le béton est mesuré par des circuits de mesure électroniques.



**Figure (II.15) :** Appareil de mesure

La relation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasonique et la résistance à la compression est affectée par un nombre de variables tel que l'âge du béton, les conditions d'humidité, le rapport entre les granulats et le ciment, le type des granulats et la localisation des aciers et les fissures. La technique ne peut pas être employée pour la détermination de la résistance de béton fabriqué par différents matériaux dont on ne connaît pas les proportions.

Ces facteurs représentent un inconvénient majeur des essais non destructifs dans lequel la propriété du béton que l'on mesure est affectée par divers facteurs dont l'influence est différente de ce qu'elle est dans la résistance du béton. Cette technique pour l'estimation de la résistance du béton in situ n'est pas encore considérée, dans la pratique, comme un outil de remplacement au cylindre standard et aux cubes, mais peut être utilisée comme une technique additionnelle, quand elle sera exécutée avec des essais de carottage.

A l'utilisation de la valeur de la vitesse de propagation d'une onde sonore pour déterminer la résistance du béton, il faut mentionner qu'il n'y a pas de relation physique entre les deux selon STURRUP, VECCHIO ET CARATIN (1984).

Les essais consistant à mesurer la vitesse de propagation des impulsions peuvent être effectués sur des éprouvettes de laboratoire comme sur des ouvrages en béton terminés. Certains facteurs influent toutefois sur la prise de mesures :

1- Les ondes sonores se déplacent plus vite à travers un vide rempli d'eau qu'à travers un vide rempli d'air. Par conséquent les conditions d'humidité du béton influencent la vitesse des ondes sonores selon STURRUP, VECCHIO ET CARATIN (1984).

2- La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, il est recommandé d'employer un matériau intermédiaire entre le béton et les transducteurs. Les matériaux d'interposition sont la vaseline de commerce, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de Glycérol. Lorsque la surface de béton est très rugueuse, il est nécessaire de poncer et d'égaler la partie de la surface où le transducteur sera fixé.

3- Une augmentation de la vitesse des impulsions se produit à des températures sous le point de congélation à cause du gel de l'eau; entre 5 et 30°C, la vitesse des impulsions n'est pas subordonnée à la température. FELDMAN (1977).

4- La présence d'acier d'armature dans le béton en particulier l'armature qui suit le trajet de l'onde entraîne une augmentation de la vitesse BUNGEY (1989). Il est par conséquent souhaitable et souvent indispensable de choisir des parcours d'impulsions qui ne sont pas influencés par la présence d'acier d'armature ou d'effectuer des corrections si de l'acier se trouve sur le parcours de l'impulsion.



**Photo (II.6) :** Appareil d'auscultation sonore avec oscilloscope

## II-4-4-2. Mode Opérateur

### II-4-4-2.1. Travaux préparatoires

- Poncer et égaliser la partie de la surface de l'élément à ausculter où le transducteur sera fixé.
- Employer un matériau intermédiaire entre les deux et en prenant soin de vérifier que l'appareil est bien appliqué contre la surface à tester à l'aide d'un matériaux d'interposition comme la vaseline, un Avon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de glycérol.

**II-4-4-2.2. Points de mesures**

Le nombre de points de mesures dépend des dimensions de l'ouvrage à tester. Pour un grand panneau (dalle, voile, radier, etc.) les points de mesures sont situés aux intersections d'un quadrillage d'une maille de 0.5m. Le cas des petits éléments (poteaux, poutres, etc.), les mesures se font en six points.

**II-4-4-3. Distances minimales entre points de mesures**

On recommande une distance minimale de parcours de 400 mm pour les mesures en surface.

**II-4-4-4. Étalonnage de l'appareil**

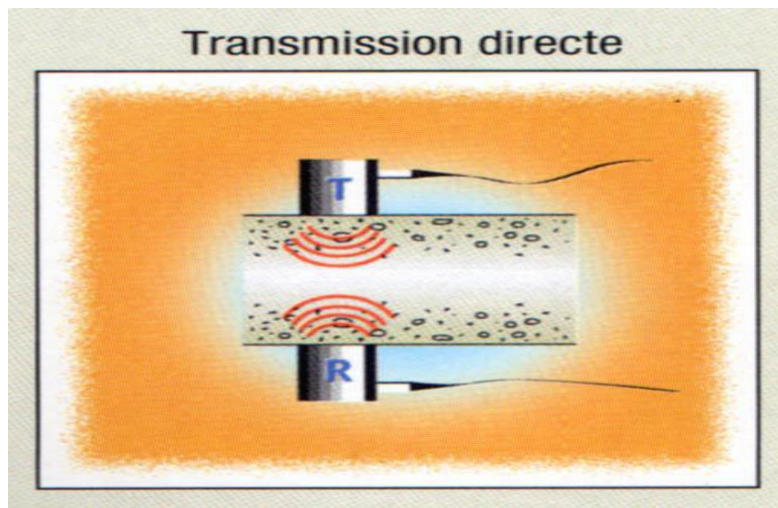
L'ultrason doit toujours être contrôlé par des essais d'étalonnage avant chaque utilisation. L'étalonnage consiste à vérifier le temps de propagation à travers la tige étalon dont le temps est connu à l'avance. Il faut ajuster l'ultrason dans le cas où le temps mesuré ne correspond pas à celui marqué sur la tige étalon.

**II-4-4-5. Manières de mesure**

La détermination de la vitesse de propagation des ultrasons se fait de trois manières, suivant le type de l'élément à tester:

**II-4-4-5.1. Mesure en transparence (directe)**

Les mesures en transparence sont utilisées dans le cas des éprouvettes, des poteaux ou de certaines poutres. Les transducteurs sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester. Photo IV 03 .



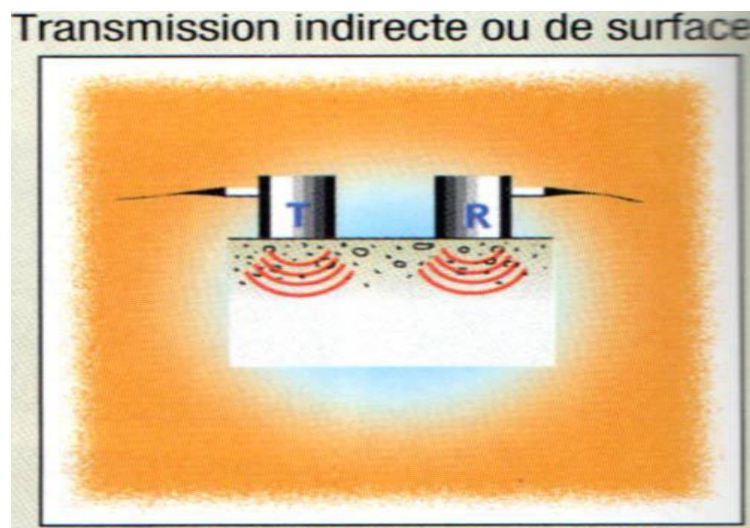
**Photo (II.7) :** Mesures en transparence (directe)

#### II-4-4-5.2. Mesures en surface (indirecte)

Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les dalles et éléments en longueur Photo IV 04

L'émetteur est maintenu en un point fixe, le récepteur est déplacé successivement à des distances marquées à l'avance.

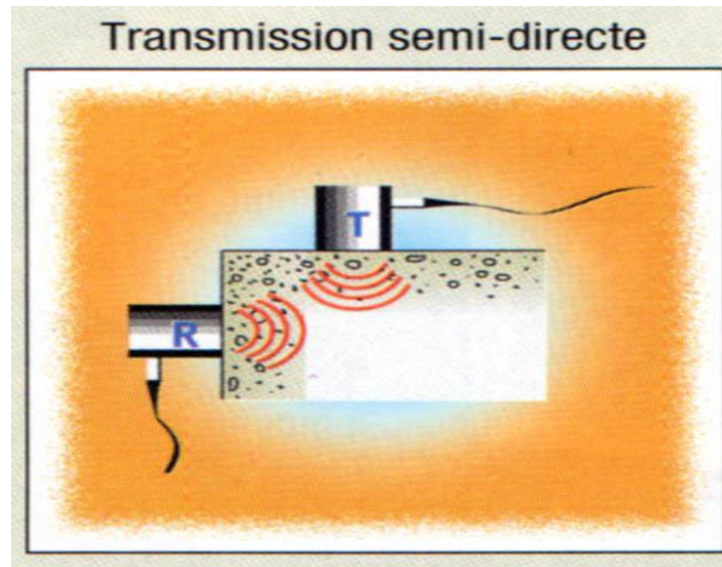
Après avoir relevé le temps correspondant à un point considéré, on passe au point suivant



**Photo (II.8) :** Mesures en surface

### II-4-4-5.3. Mesures semi directe

Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les éléments de structure où on ne peut pas utiliser les deux autres manières. Photo IV 05



**Photo (II.9) :** Mesures semi directe

### II-4-4-6. Interprétation Des Résultats De Mesure Aux Ultrasons

Dans un milieu homogène et isotrope, la vitesse des ondes longitudinales des ultrasons est reliée au module d'élasticité et à la masse volumique. Cette relation donne une base logique pour utiliser des mesures de vitesse des ondes pour estimer la résistance à la compression du béton. Mais il faut mentionner qu'il n'y a pas de relation physique unique entre les deux paramètres compte tenu de l'influence des différents constituants entrant dans la composition du béton. Par conséquent une corrélation plus fiable entre la vitesse de propagation des ultrasons et la résistance du béton à la compression ne peut être établie que dans des limites strictes données ci-après.

#### **II-4-4-6.1. Corrélation entre la vitesse de propagation du son et la résistance du béton**

La corrélation graphique entre de la vitesse de propagation  $V$  et la résistance à la compression  $R$  doit être établie au préalable pour un projet donné, sur la base du béton formulé pour ce chantier. Il est nécessaire dans ce cas d'effectuer les mesures sur au moins 30 éprouvettes en procédant comme suit :

- pour un lot de 03 éprouvettes, prendre une valeur moyenne de la vitesse de propagation et de la résistance à la compression obtenue et soumises à des conditions d'essai identique.
- faire varier la quantité d'eau de gâchage ou de la compacité du béton pour le reste des lots ( $E/C$  variant de 0.40 à 0.8 est généralement pris).

Il est bien entendu que toutes les autres caractéristiques du béton, doivent être identiques à celles du béton formulé et à mettre en oeuvre in situ.

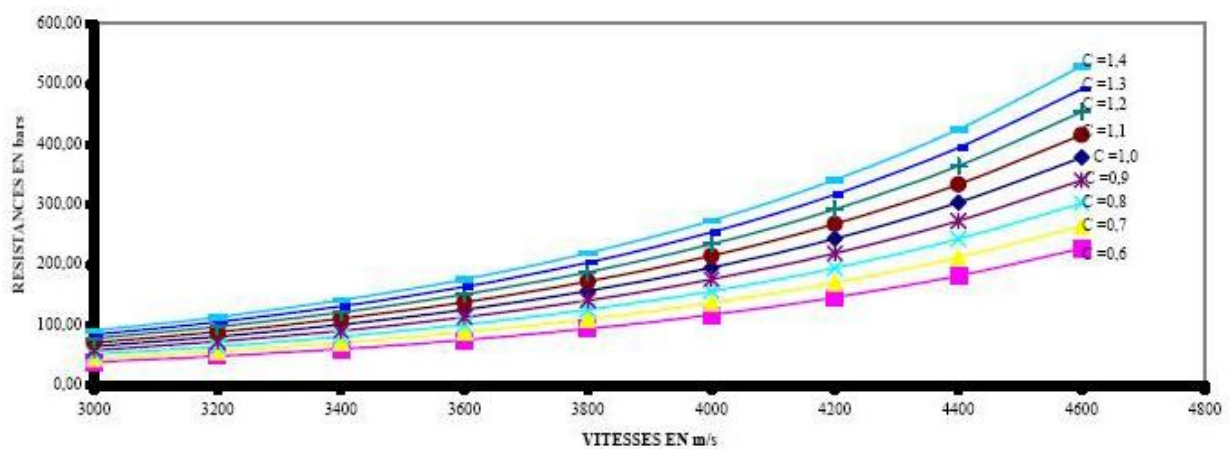
#### **II-4-4-6.2. Paramètres influents la vitesse des ultrasons**

La vitesse des ondes ultrasoniques à travers le béton résulte du temps mis par les ondes pour traverser la pâte de ciment durci et les granulats. Elle dépend énormément du module d'élasticité des granulats et de leur quantité dans le béton. Par ailleurs, la résistance du béton ne dépend pas nécessairement du dosage en gros granulats ou de leur module d'élasticité. Cependant pour un granulat donné et une composition donnée, la vitesse de propagation des ondes dépend des modifications de la pâte de ciment durci, telles qu'un changement du rapport Eau/Ciment qui influe le module d'élasticité de la pâte. De plus d'autres facteurs influencent la propagation des ondes sonores à savoir :

- Le type de ciment .
- Le dosage en ciment.
- La nature des granulats.

- La granulométrie .
- L'humidité du béton .
- La maturité du béton .
- Les adjuvants.

Les résistances des autres bétons qui diffèrent du béton standard pour lequel une courbe de calibrage a été établie, doivent être corrigés en affectant la résistance du béton de référence par des coefficients partiels d'influence correspondants. Exemple de tracés de courbes de calibrage.



**Figure (II.16) :** Courbes de calibrages

Excepté le cas où l'on dispose de courbes de calibrage telles que rappelées ci avant, des cas peuvent se présenter tels que :

- Composition du béton connue, absence d'éprouvettes ou de carottes.
- Composition du béton connue et existence d'un petit nombre d'éprouvettes ou de carottes.
- Méconnaissance de la composition du béton et existence d'éprouvettes ou de carottes.
- Méconnaissance de la composition du béton et inexistence d'éprouvettes et de carottes.

La détermination de la résistance béton in situ sera étudiée au cas par cas.

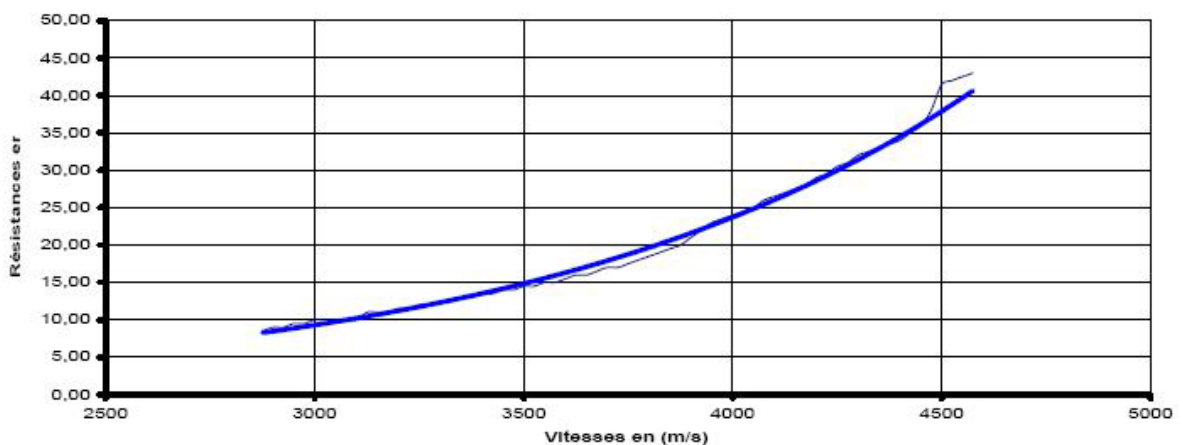
#### II-4-4-6.3. Autres interprétations possibles

Les résultats obtenus en appliquant la courbe de la RILEM (voir figure IV 07) sont donnés dans le cas où le béton testé est considéré connue. Les résistances ne correspondent pas toujours à la résistance réelle du béton in situ. C'est pour cette raison que par exemple dans les procès verbaux du CNERIB, seuls les appréciations suivantes sont données :

❖ Classements qualitatifs :

- $2500 \text{ m/s} \leq V < 3200 \text{ m/s}$  béton de faible résistance.
- $3200 \text{ m/s} \leq V < 3700 \text{ m/s}$  béton de moyenne résistance.
- $3700 \text{ m/s} \leq V < 4200 \text{ m/s}$  béton à haute résistance.
- $V \geq 4200 \text{ m/s}$  béton à très haute résistance.

❖ Estimation de la résistance du béton selon RILEM:



**Figure (II.17) :** Courbe RILEM

#### **II-4-4-7. Références normatives**

Les normes P 18-414 de 1993, P 18-418 de 1989, ASTM C 597- 83 réapprouvée en 1991 et BS 1881 : partie 203 : 1986 spécifient les modes opératoires sans pour autant donner d'interprétation des résultats obtenus.

#### **II-4-4-8. Les avantages**

- ✓ C'est une méthode idéale pour déterminer l'homogénéité du béton .
- ✓ L'essai peut être utilisée autant sur les ouvrages complétés que sur ceux en construction.
- ✓ La mesure des ondes sonores présente l'énorme avantage de donner des informations sur l'intérieur d'un élément de béton. Et selon CHUNG ET LAW (1983) l'essai de propagation des ultrasons peut être utilisé pour détecter la fissuration (mais les fissures parallèles au déplacement de l'onde), les vides détériorations dues au gel ou de feu et l'uniformité du béton dans des éléments semblables. L'essai de propagation des ultrasons peut être utilisé pour suivre les changements microstructuraux dans un élément par exemple à la suite de cycles répétés de gel dégel.
- ✓ ELVERY ET IBRAHIM (1976) et pendant leurs études sur la relation de la vitesse et la résistance dans plusieurs âges ont montrés que l'essai peut aussi être utilisé pour évaluer la résistance du béton à très jeune âge, à partir de trois heures et plus, ce qui peut être intéressant dans le domaine de la préfabrication du béton ou comme outil de décision pour déterminer le moment adéquat des opérations de décoffrage.

## **II-5. Conclusion**

La corrosion est la principale cause de dégradation des ouvrages en béton armé et pour cela, elle doit être prise très sérieux. De nombreux ouvrages nécessitent très souvent de nouvelles interventions contre cette pathologie alors qu'ils venaient d'en être traités. Cette situation peut être imputée soit à la non maîtrise du phénomène de corrosion par les techniciens et les ingénieurs, soit à une mauvaise démarche adoptée lors des réparations ou au choix d'une méthode de réhabilitation inadéquate inefficace.

Les différents facteurs influents sur la corrosion des armatures sont l'humidité, l'enrobage, influence de la teneur en chlorure, influence d'autres agents agressifs (tels que les sels, etc.), effet de l'oxygène. Les différents mécanismes mis en jeu dans le processus de corrosion influent sur le comportement mécanique des structures. En effet, lorsque la corrosion est amorcée son action est directe sur le comportement des éléments de structures ou sur la structure totale

L'objectif visé ici était de mettre à la portée des techniciens et ingénieurs un document pouvant leur permettre d'aborder avec compétence et savoir-faire, le problème de corrosion des ouvrages en béton armé, d'adopter une démarche appropriée pour une réhabilitation durable et efficace des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures.

Pour y parvenir, nous avons jugé indispensable:

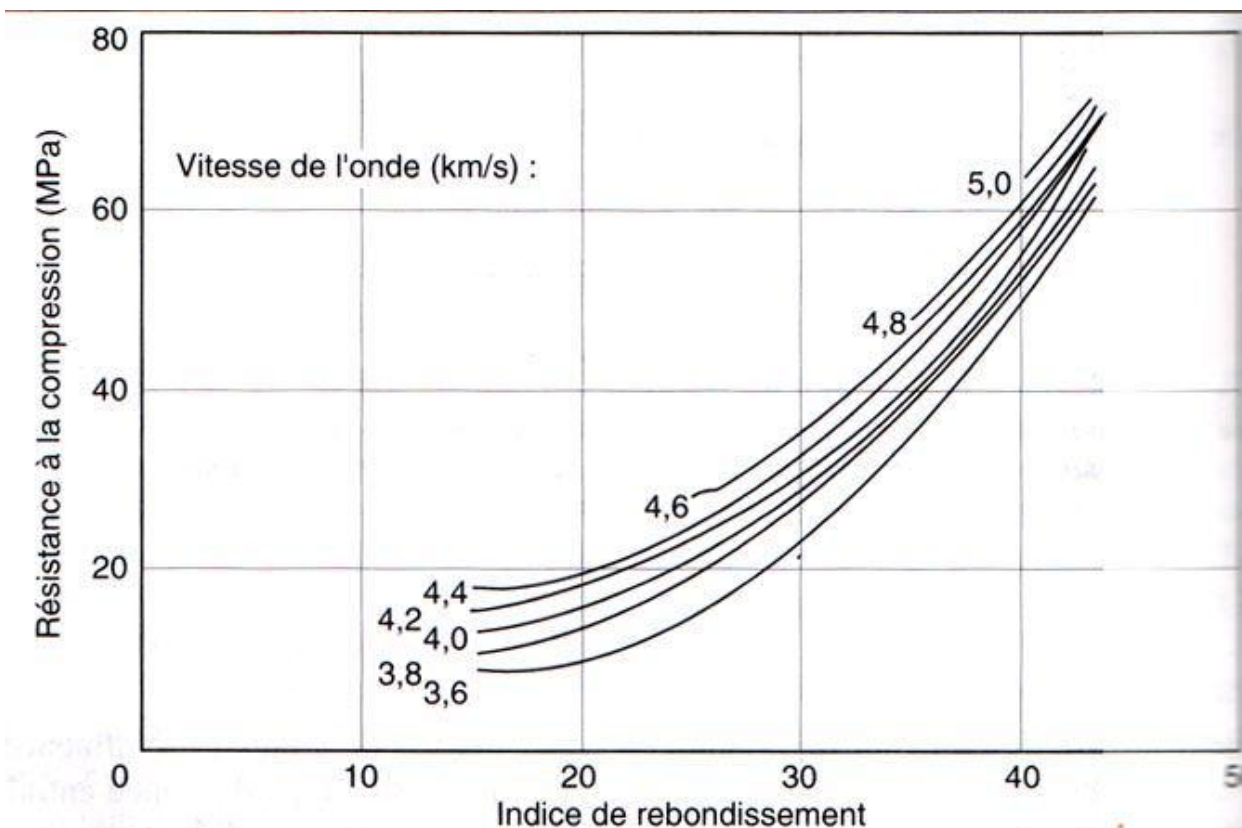
- de présenter le matériau béton armé et les différentes pathologies dont il peut être atteint car on ne peut pas prétendre soigner un mal dans un corps si on ne connaît pas bien le corps en question .
- d'expliquer le mécanisme de la corrosion et les dommages qu'elle peut causer aux structures .

- de donner les étapes à suivre pour pouvoir établir un diagnostic fiable sur un ouvrage en béton armé .
- de présenter les contraintes et les exigences dont il faut tenir compte lors d'une réparation .
- de présenter les méthodes de réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures, leur mise en oeuvre et leur limite .
- de donner quelques mesures préventives contre la corrosion, prévenir valant mieux que guérir.

Pour détecter la grève et la détérioration du béton armé, il est possible de combiner deux ou plusieurs méthodes non destructives à la fois et dont les résultats, introduits dans un traitement unique garantissent au résultat final obtenu une précision supérieure. A titre d'exemple MAMILLAN ET BOUINEAU (1980) on déduit de leur recherche sur ce sujet une méthode combinée qui permet une appréciation de la résistance de béton in situ en relation avec l'indice sclérométrique et la vitesse de son. Indépendamment du type d'essai non destructif utilisé, les données proportionnées et fiables de corrélation avec des données standard de la résistance à la compression en 28 jours sont habituellement nécessaires pour évaluer l'exactitude de la méthode non destructive. En outre, la corrélation avec des résistances à la compression en place employant des carottes de un ou deux endroits peut fournir des conseils en interprétant des résultats d'essai non destructifs; ceux-ci peuvent alors être employés pour examiner de plus grandes parties de la structure. Le soin devrait être pris pour considérer l'influence des tailles et des endroits variables des éléments structuraux

Cette solution est particulièrement avantageuse lorsque des variations des propriétés du béton conduisent à des résultats contradictoires. Par exemple, lorsqu'une augmentation du taux d'humidité augmente la vitesse de son, mais

diminue l'indice de rebondissement enregistré avec l'essai au scléromètre BELLANDER (1977) figure IV 08. La RILEM (1993) propose des recommandations sur l'utilisation combinée d'essais non destructifs.



**Figure (II.18) :** Courbe d'estimation de la résistance à la compression in situ par utilisation conjointe de la mesure de la propagation d'ondes ultrasoniques et des résultats d'essai au scléromètre selon U. BELLANDER (1977)

---

# **Chapitre III**

*Dynamique de traitement et étude de cas*

---

### III-1. Introduction

On peut considérer que plus de 80% des dégradations du béton armé sont provoquées par la corrosion des armatures, elle-même générée par la carbonatation du béton et/ou la contamination par des ions chlorures (Tuutti, 1982).

Une grande partie des travaux du génie civil qui s'effectuent actuellement dans le monde, surtout en Amérique du nord, en Europe et au Japon, sont des travaux de maintenance et de réparation, car la majorité des ouvrages en béton armé ou précontraint dans le monde entier ont plus d'une trentaine d'années (Ramachandran et al., 1999). On estime que 10 à 20% des ouvrages dans le monde seraient détruits chaque année par la corrosion s'il n'y avait pas de travaux de maintenance et de réparations (Sagues A, 1994). C'est pourquoi le développement des techniques de maintenance et de réparation devient une nécessité absolue pour éviter les dégâts de corrosion et réduire les pertes économiques.

### III-2. Méthodes de réparation

La minimisation de la perméabilité de béton (E/C faible, addition de fumée de silice, de cendres volantes) peut retarder le commencement de la corrosion de l'acier mais elle n'est pas suffisante pour éviter la corrosion d'armature en environnement agressif. <sup>[21]</sup>

Les méthodes de réparation classique du béton risquent très souvent de ne traiter que les symptômes et non la cause du dommage subi. L'élimination seulement du béton endommagé et son ragréage à neuf ne résolvent jamais le problème de contamination par les chlorures ou de la diminution du Ph à cause de la carbonatation du béton. En fait, les réparations par ragréages localisés entraînent souvent la formation d'une nouvelle cellule de corrosion dans les zones voisines

---

[21] Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II, © 2009 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-46850-3. Alexander, M. G., Beushausen, H.-D., Dehn, F., Moyo, P. (2008).

non réparées. Par conséquence, ces interventions sont susceptibles de favoriser la corrosion. L'application d'un enduit imperméable peut conduire à atténuer ce risque du fait qu'elle réduit l'eau contenue dans les pores du béton.

A l'heure actuelle, plusieurs méthodes électrochimiques de protection contre la corrosion d'ouvrages en béton armé sont proposées. Toutefois, chacune de ces techniques présente des avantages et des inconvénients. Cependant, grâce à une bonne connaissance du mécanisme de la corrosion et des expériences pratiques, les spécialistes en corrosion et en génie civil ont pu trouver des techniques de maintenance non destructives et applicables sur les structures en béton armé. Ces techniques sont basées soit sur des processus chimiques (l'annulation d'une des réactions cathodiques ou anodiques), soit sur des processus électrochimiques (l'application de courant électrique inversé de courants de corrosion).

On peut donc classifier ces techniques de maintenance et de préparation comme suit :

### **III-2-1. Réparation traditionnelle**

La méthode classique consiste à enlever le béton éclaté ainsi que tout le béton contaminé et non protecteur. Les armatures dans cette zone doivent être totalement dégagées, nettoyées de toute trace de corrosion. Si la corrosion est avancée, des armatures supplémentaires de même nature seront mises en place, par scellement ou soudure, puis la surface est reconstituée au moyen de mortiers spéciaux à retrait compensé. Si on se contente de réparer les zones dégradées sans enlever tout le béton contaminé, le risque est grand de voir le processus de corrosion s'accélérer autour des réparations, dont la tenue sera fortement réduite. Cette méthode est bien sûr chère et lourde pour l'ouvrage.

### III-2-2. Revêtements en surface du béton(Imprégnations)

Le terme général «imprégnation» recouvre les traitements de surface du béton par des imprégnations hydrophobes (ne formant pas de pellicule) et par des glacis ou lasures (formant une pellicule).

Dans ce cas, les revêtements agissent comme une barrière physique entre l'environnement extérieur et l'acier pour empêcher la pénétration des agents agressifs ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ) et aussi l'humidité dans le béton.

Les revêtements hydrofuges, qui sont des produits à base de silane, siloxane, ou de silicone sans solvant, ces derniers sont les plus utilisés. Ils sont généralement appliqués sur la surface du béton comme une peinture pour réaliser deux fonctions : éviter la pénétration de l'eau, mais aussi laisser « respirer » le béton.

Des recherches ont montré (Fiebrich M et al., 1993) que les moyens d'imprégnation hydrophobe avaient une efficacité insuffisante sur du béton dont la teneur en agents actifs était inférieure à 50%. La profondeur de pénétration de l'imprégnation hydrophobe dans le béton est d'environ 0,5 à 5 mm.

Dans des cas particuliers, il est possible d'atteindre une profondeur de 15 mm. La durabilité de l'imprégnation hydrophobe est limitée, car son effet est détruit par les alcalis du ciment ainsi que les rayonnements UV; il existe toutefois de grandes différences en fonction de la nature des agents actifs. Des silanes à forte teneur en alkyls et d'autres compositions spécifiques restent efficaces durant plus de 10 ans.

Contrairement à l'imprégnation hydrophobe, les glacis forment une pellicule pratiquement fermée sur la surface du béton. Leur efficacité contre la pénétration des fluides est ainsi plus élevée que celle d'une imprégnation hydrophobe. Par contre la diffusion de la vapeur ou des gaz s'en trouve fortement diminuée. L'efficacité de l'étanchéité aux liquides ainsi que la diminution de la diffusion sont

fonction de l'épaisseur de la pellicule et de sa continuité. Les chlorures en solution peuvent traverser les glakis par diffusion.

Différentes matières synthétiques servent de base pour les glakis, comme par exemple les résines acryliques, époxy ou polyuréthanes. Il existe des glakis avec ou sans solvant. Pour une épaisseur de couche identique, les produits sans solvant assurent une meilleure étanchéité. En raison de l'environnement et de l'hygiène du travail, les produits contenant des solvants cèdent aujourd'hui leur place à des produits sans solvant.

### **III-2-3. Inhibiteurs de corrosion**

La définition d'un inhibiteur de corrosion n'est pas unique, néanmoins celle retenue par la National Association of Corrosion Engineers (NACE) est la suivante : un inhibiteur est une substance qui retarde la corrosion lorsqu'elle est ajoutée à un environnement en faible concentration (NAC, 1965).

Les inhibiteurs peuvent être classés en trois catégories selon la réaction sur laquelle ils interviennent : anodique, cathodique et mixte. Les inhibiteurs anodiques sont plus efficaces que les inhibiteurs cathodiques mais plus risqués à utiliser (Ramachandran, 1984).

Un inhibiteur de corrosion peut agir de différentes manières (Hansson et al., 1998):

- en interagissant sur la pénétration des ions agressifs, soit en diminuant leur vitesse de pénétration, soit en les piégeant physiquement ou chimiquement .
- en diminuant la vitesse de pénétration de l'oxygène nécessaire pour la réaction cathodique .
- en augmentant la résistivité électrique du béton.
- en interagissant sur la composition chimique de l'électrolyte .

- en formant une couche protectrice en surface de l'acier.

L'efficacité d'un grand nombre de produits chimiques utilisés en tant qu'inhibiteurs de corrosion pour les armatures du béton est étudiée depuis les années 60 (Nurnberger U, 2000).

Mais il faudra attendre le milieu des années 70 pour qu'un nombre considérable de recherches soit initié, les premières molécules étudiées furent les chromates, les phosphates, les hypophosphates, les bases (alcalins), les nitrites et les fluorures, finalement les nitrites de Sodium puis de calcium suscitèrent le plus de recherches. Ceux-ci s'avérèrent tous deux inhibiteurs de corrosion (Stoltzner, Knudsen et Buhr., 1997), mais l'utilisation de nitrites de Sodium, entraînant une plus faible résistance du béton à la compression et de possibles alcali-réactions à cause de cation Sodium, fut abandonné au profit du nitrite de calcium qui ne modifiait pas les propriétés mécaniques du béton et qui de plus était compatible avec les fumées de silice (Berke et Sundberg, 1989). Ces inhibiteurs sont des produits qui ajoutés au béton frais lors de son malaxage (gâchage), ont une action préventive.

A partir des années 90 la littérature propose un nombre croissant d'études sur diverses molécules potentiellement inhibitrices de la corrosion. Le tableau (1) présente de manière non exhaustive les résultats obtenus pour certains de ces composés, ajoutés aux gâchages, vis-à-vis de la corrosion générée par les chlorures, cas le plus souvent étudié

| <b>inhibiteurs</b>            | <b>Corrosion en présence de chlorures</b> | <b>référence</b>                                                                                                     |
|-------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nitrite de sodium             | Retardée                                  | Treadaway & Russel. -1968<br>Craig & Wood .-1970<br>Bhaskara Rao & al. -1988                                         |
| Nitrite de calcium            | Retardée                                  | Rosenberg & al. -1977<br>Andrade & al -1986<br>Hope & .Lp. -1989<br>Berke & Rosenberg. -1989<br>Tomosawa & al. -1990 |
| Chromates de potassium        | inchangée                                 | Craig & Wood -1970                                                                                                   |
| Benzoate de sodium            | inchangée                                 | Craig & Wood. -1970                                                                                                  |
| Chlorure stanneux             | Resultats contradictoires                 | Arber & Vivian. -1961<br>Hope & .Lp -1987                                                                            |
| β-glycérophosphate desodium   | Retardée                                  | Monficelli & al. - 1992                                                                                              |
| Mélanges d'amines et d'esters | Retardée                                  | Nmai & al. - 1992                                                                                                    |

**Tableau (III.1) :** inhibiteurs de corrosion pour le béton

C'est aussi à cette époque qu'apparaissent les premiers inhibiteurs de corrosion appliqués à la surface du béton. Ces inhibiteurs, parfois appelés inhibiteurs migrants, sont le monofluorophosphate de sodium(MFP) et des mélanges commerciaux d'alcanolamines et d'amines solubles dans l'eau, produits dérivés d'inhibiteurs en phase vapeur.

En 1998, les données sur l'efficacité de ces produits étaient, pour l'essentiel, restreintes à des études réalisées en collaboration avec les fabricants, limitant de ce fait leur objectivité. Depuis 2000, un nombre croissant de publications indépendantes sur ces produits sont disponibles, notamment les proceedings du projet européen COST 521(1997-2002) (Tritthart, 2000 ; Elsener, 2000 ; Elsener et Cigna, 2002).

Actuellement, la recherche concernant les inhibiteurs de corrosion appliqués à la surface du béton tente de répondre aux questions suivantes :

- Les inhibiteurs de corrosion arrêtent-ils ou au moins retardent-ils la corrosion (déjà significative) dans un béton carbonaté et/ou contaminé par les chlorures .
- Quelles concentrations en inhibiteur sont nécessaires au niveau de l'acier pour qu'ils soient efficaces .
- Est-ce que ces concentrations peuvent être atteintes en pratique par des méthodes telles que l'application de surface et comment cela peut-il être démontrable .
- Combien de temps reste efficace l'inhibiteur de corrosion au niveau de l'armature et comment relier ce temps à l'extension de la durée de vie de la structure .
- Peut-il y avoir des effets néfastes (dégradation du béton et aspect esthétique) dus à l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion dans le béton.

Si l'efficacité de ces produits est parfois démontrée en laboratoire, elle reste à prouver sur les ouvrages en béton armé.

Dans l'action des inhibiteurs de corrosion migrants, deux phases peuvent être distinguées :

- \* le transport du produit depuis la surface du béton sur lequel il a été appliqué jusqu'à l'armature, et qui peut inclure des interactions avec les constituants du béton .
- \* son interaction avec le métal lorsque les espèces inhibitrices, après avoir diffusé ou migré dans le béton, arrivent à la surface de l'acier.

Dans ces conditions, l'étude de l'efficacité de l'inhibiteur doit s'articuler autour de la détermination, d'une part des conditions de transport de l'inhibiteur dans le solide poreux, et d'autre part de l'efficacité inhibitrice du produit à la surface de l'acier enrobé dans du béton, ou dans une phase préliminaire simplement immergé dans une solution aqueuse corrosive.

Les méthodes utilisées pour le premier type d'interaction sont des méthodes de dosage du produit au sein du béton et d'établissement du profil de concentration tandis que des méthodes électrochimiques ou d'analyses superficielles de l'acier ont été essentiellement utilisées pour l'étude de l'efficacité inhibitrice.

### **III-2-4. Béton projeté**

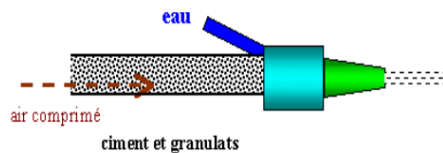
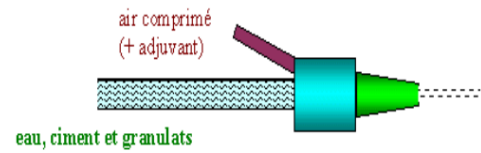
La technique du béton projeté est assez ancienne. Les premières applications remontent en effet à 1907, aux Etats-Unis. En France, cette technique fut utilisée pour la première fois lors des travaux du tunnel ferroviaire de Puymorens (1921).

La réparation et le renforcement d'ouvrages en béton et en maçonnerie au moyen de béton projeté font l'objet de la norme homologuée NF P 95-102. La technique du béton projeté pouvant être à l'origine de risques spécifiques vis-à-vis de l'hygiène et de la sécurité, cette norme définit les dispositions à prendre pour se prémunir contre ces risques et renvoie aux «Recommandations pour la prévention, l'hygiène et la sécurité lors des projections de mortiers et bétons» éditées par l'ASQUAPRO (Association pour la Qualité de la Projection des mortiers et bétons).

Un béton projeté est constitué d'un mélange de granulats, de ciment et d'eau avec parfois des ajouts, projeté grâce à de l'air comprimé, sur une paroi.

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

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

**Figure (III.1) :** Béton projeté par voie sèche**Figure (III.2) :** Béton projeté par voie mouillée

Selon (AFGC, 2003) un béton projeté peut aussi contenir des adjuvants, des fibres ou des fumées de silice.

1- L'utilisation des adjuvants confère au béton des propriétés spécifiques lors de la mise en œuvre :

- obtention et maintien de la fluidité, grâce à des stabilisateurs de prise introduits à la sortie de la centrale pour une optimisation des conditions de transport .
- obtention de la consistance initiale, grâce à des activateurs introduits quelques mètres avant la lance .
- mise en œuvre efficace grâce à des accélérateurs de prise (raidisseurs) introduits en bout de lance, mais entraînant parfois une baisse des résistances mécaniques à long terme.

2- L'adjonction de fibres confère au béton projeté des propriétés complémentaires qui dépendent de la quantité et du type de fibres :

- cohésion améliorée du béton frais .
- limitation des effets du retrait .
- amélioration possible des caractéristiques mécaniques (résistance accrue au cisaillement et à la flexion).

Le comportement de post-fissuration confère au matériau une ductilité (recommandations AFTES sur le Béton Projeté Renforcé de Fibres).

3- L'utilisation de fumée de silice améliore l'aptitude à la projection (béton plus collant) ainsi que la durabilité (béton plus dense).

### **III-2-5. Traitements électrochimiques**

Comme la corrosion des aciers dans le béton est un processus électrochimique, la meilleure façon d'empêcher et d'arrêter la corrosion est l'application de techniques électrochimiques.

Trois méthodes électrochimiques sont utilisées pour contrôler la corrosion de l'armature dans le béton : la protection cathodique (qui contrôle le courant électrochimique de corrosion), la réalcalinisation et la déchloruration (qui modifient l'environnement autour de l'armature), toutes basées sur l'application de courant électrique entre une anode placée sur la surface du béton et l'acier à protéger (cathode).

#### **III-2-5.1. Traitement de protection cathodique**

##### **III-2-5.1.1. Principe de la protection cathodique**

La protection cathodique des armatures métalliques dans un béton est un traitement qui permet de ralentir, voire d'arrêter leur corrosion. Elle consiste à abaisser le potentiel électrochimique de l'armature jusqu'à une valeur seuil appelée potentiel de protection qui est telle que la vitesse de corrosion de l'acier devient négligeable.<sup>[22]</sup>

Le principe de la protection cathodique consiste à polariser l'armature dans le béton, à l'aide d'une anode placée 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.

---

[22] Xu, J., Yao, W. (2009). Current distribution in reinforced concrete cathodic protection system with conductive mortar overlay anode, Construction and Building Materials 23 (2009) 2220–2226

### III-2-5.1.2. Développement de la technique

Protection cathodique des structures en béton armé exposées à l'atmosphère a été appliquée pour la première fois à des tabliers de ponts contaminés par les sels de déglçage par RF Stratfull en Californie en 1973 , dans les années suivantes, la conception et les critères de protection ont été élaborés, ainsi que l'alimentation électrique et systèmes de contrôle complètement différents de ceux utilisés pour la protection cathodique des structures en acier enterrés ou structures opérant dans l'eau de mer. Surtout, il a été prouvé que la protection cathodique est une technique de réparation fiable même en présence de teneurs en chlorures élevées, où les systèmes traditionnels de réadaptation sont inefficaces ou très coûteux.<sup>[23]</sup>

Dans les années 1980, les anodes à base de mailles en titane activé avec des oxydes spéciaux (en particulier de ruthénium et d'iridium) ou peintures conductrices ont été développées. La technique, utilisée maintenant au-delà de l'Amérique du Nord, est appliqué non seulement pour les tabliers de pont, mais aussi de combler les structures (poutres, traverses, quais), et structures maritimes, les garages de stationnement industriels, bureaux et bâtiments résidentiels, etc.

Dans la fin des années 1990, la protection cathodique sacrificielle (PCS) des armatures de béton a été introduite. En PCS, la dissolution d'un métal moins noble comme le zinc ou l'aluminium relié à l'armature fournit le courant au lieu d'une source d'alimentation externe.

Jusqu'à présent, plusieurs millions de mètres carrés de béton ont déjà été traités dans le monde actuel avec systèmes de courant imposé qui utilisent une variétés d'anodes.

L'évolution des techniques ont été examinés au cours des années récentes (Pedferri, 1965 ; Page, 1997 ; Bertolini et al., 1998).

---

[23] Xu, J., Yao, W. (2009) .Current distribution in reinforced concrete cathodic protection system with conductive mortar overlay anode, Construction and Building Materials 23 (2009) 2220–2226

De nombreux articles ont fait état d'études de cas et des expériences pratiques (Polder, 1998 ; Haldemann et Schreyer, 1998 ; Virmani, et Clemena, 1998 ; Chaudhary et Chadwick, 1997 ; Schuten, Leggedoor et Polder., 2000).

Des normes Européen et nord-américaines sont disponibles (.EN12696 (2000) ; NACE, Standard RP0290-90(1990)).

La protection cathodique n'est généralement pas recommandée pour les ouvrages en béton précontraint, afin d'éviter le risque de fragilisation par l'hydrogène en acier haute résistance. Quelques cas existent où l'acier d'armature est protégé dans des structures qui contiennent aussi d'acier en précontrainte (Polder, 1998 ; Haldemann et Schreyer, 1998). Cela nécessite un suivi particulier pour éviter l'endommagement de l'acier par précontrainte.

La protection cathodique a également prouvé leur efficacité de repassivation de l'acier dans le béton

carbonaté. Ce type de protection cathodique a été appelé « ré-alcalinisation continue », car la demande continue de faibles courants conduit à des effets de protection similaires à ceux obtenus par la technique de re-alcalinisation électrochimique (Pedferri, 1993) en général la protection cathodique n'est pas appliquée aux structures carbonatées, parce que d'autres méthodes de protection (réparation conventionnelle) ont tendance à être plus économique dans la plus part des cas. Malgré cela, la technique a récemment été utilisée en Italie et aux Pays-Bas pour protéger les parties de bâtiments et structures des années 1960 et années 1970 qui ont été caractérisés par béton carbonaté avec de petites quantités de chlorures (ajouté comme accélérateur des adjuvants ou des contaminants de l'eau de gâchage au moment de la construction, ou de pénétrer de l'air marin).

### III-2-5.1.3. Application de protection cathodique

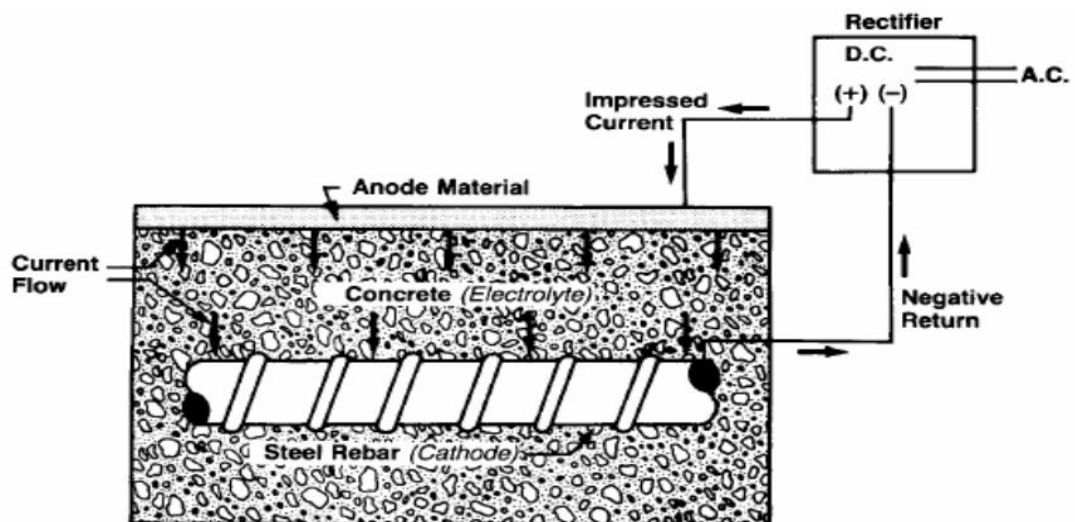
Il existe deux techniques de protection cathodique :

- par courant imposé : (un générateur électrique est placé entre l'anode et l'armature) .
- par anode sacrificielle (courant galvanique) : l'anode, en alliage correctement sélectionné, est directement reliée à l'armature.

#### A. Protection cathodique par courant imposé

Au cours des dix dernières années, la protection cathodique à courant imposé a été de plus en plus employée pour protéger de la corrosion à long terme les structures en béton armé dans les environnements marins.

Les systèmes de courant imposé utilisent des anodes inertes (de dissolution nulle ou basse) et une source extérieure d'alimentation DC imposant un courant de l'anode externe vers la surface de l'armature (cathode) (Figure 3).



**Figure (III.3) :** Protection cathodique par courant imposé. [24]

[24] Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures- (Mémoire Option : Structures \*Université de Université de Douala.2007\*)

Le contrôle de protection cathodique exige le contrôle de densité de courant de protection. La dissolution de l'acier sous corrosion correspond à une certaine densité de courant de corrosion. Le

courant de protection cathodique doit être appliqué de manière à annuler le courant de corrosion (A. Raharinaivo et Carpio, 1992 ; A. Raharinaivo et Grimaldi, 1991). Comme le courant de corrosion n'est pas constant sur la surface d'armature, le courant de protection doit annuler la valeur de courant de corrosion la plus élevée. En pratique, les valeurs de courant de protections prises entre 1 à 20 mA/cm<sup>2</sup> d'acier à protéger sont suffisantes pour annuler le courant de corrosion.

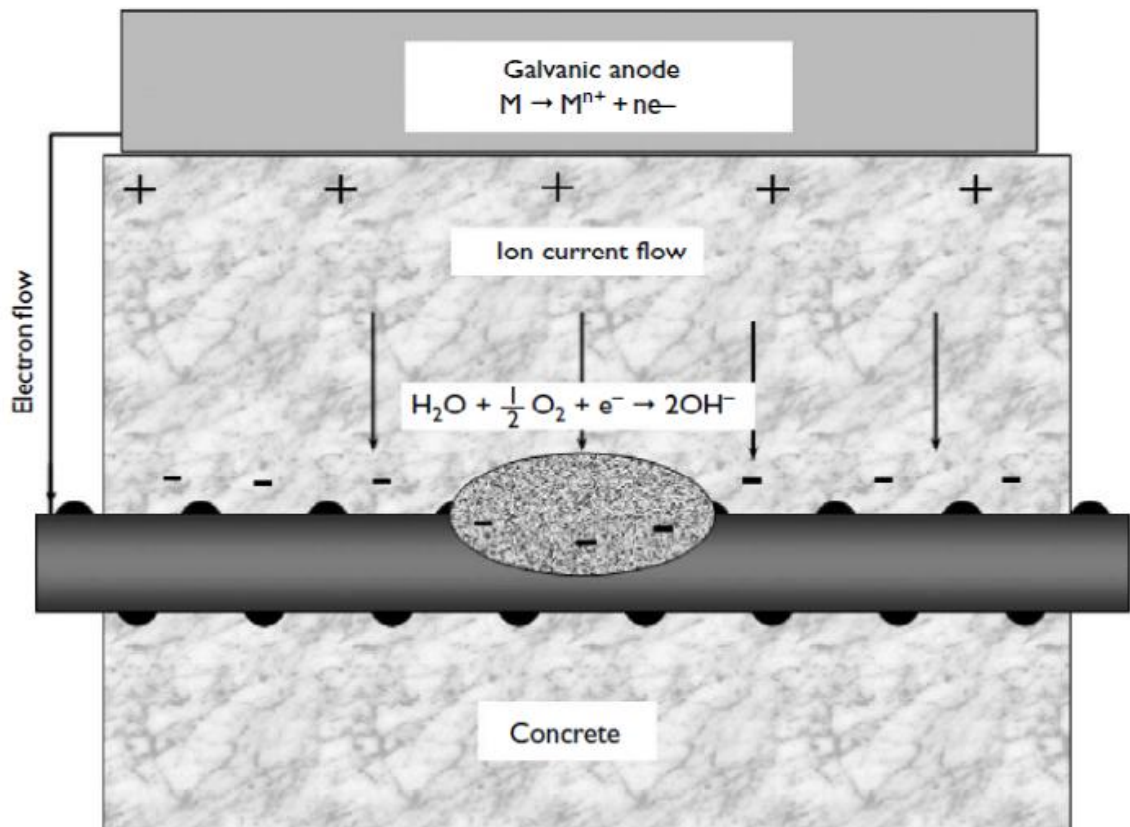
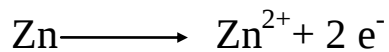
Pour que le système de protection cathodique soit efficace, le potentiel d'électrode des armatures doit être compris entre -800 et -1150 mV vs Ag/AgCl sur toute la surface protégée. Ce domaine de potentiel est suffisant pour mettre le fer dans la zone immunité. Les valeurs de potentiel plus négatives conduisent à la dissolution de l'eau et à un dégagement d'hydrogène, ce qui augmente le risque de fragilisation par hydrogène et qui pourrait provoquer d'autres effets défavorables. Cependant, comme le potentiel des armatures peut être influencé par la température, l'humidité, l'existence de l'oxygène, etc., en réalité, on ne fixe pas une valeur exacte de potentiel de protection pendant toute la période d'application de cette technique, mais un intervalle.

Afin d'assurer l'efficacité de système de protection cathodique, on doit prendre en compte la dépolarisation des aciers en coupant le courant de protection. Pour qu'un système de protection cathodique soit efficace, la variation de potentiel  $\Delta E = E(t_1) - E(0)$ , [où :  $E(0)$  est la valeur de potentiel au moment de la coupure de courant et  $E(t_1)$  est la valeur de potentiel après une période  $t_1$  de coupure doit dépasser une valeur donnée. La protection cathodique est jugée comme efficace si la variation de potentiel  $\Delta E$  est supérieure à 100 mV après une période de coupure de

courant égale à  $t_1 = 4$  heures (Rodriguez et al., 1991 ; Startfull, 1973). D'autres valeurs ont été choisies à  $t_1 = 24$  heures.

### B. Protection cathodique par anode sacrificielle (courant galvanique)

Une autre méthode qui connecte l'acier à une anode sacrificielle ou galvanique tels que le zinc, l'aluminium et le magnésium (Ashworth, 1986 ; Avila et Genescà, 1991). Cette anode corrode préférentiellement, les électrons libérateurs avec le même effet que le système à courant imposé, par exemple:



**Figure (III.4) :** Schéma d'une protection cathodique galvanique (Broomfield, 2007)

Le même phénomène est utilisé dans la galvanisation, où une couche de zinc est appliquée sur l'acier contre la corrosion. Toutefois, la principale restriction de ce système est que le zinc a permis de conduire de petite tension lorsqu'il est

associé à l'acier. Il ne s'agit que de quelques centaines de millivolts, et devient plus petit avec l'activité de corrosion de l'acier. Même si un système de

galvanisation met les deux métaux en contact direct, avec une anode de protection cathodique galvanique.

Pour conduire le courant il faut avoir un électrolyte, la résistance de ce dernier est essentielle à la performance du système, les véritables électrodes de référence pour ancrage permanent sont les suivants: argent-chlorure d'argent ( $\text{Ag}/\text{AgCl}/\text{KCl}0.5\text{M}$ ) et dioxyde de manganèse ( $\text{Mn}/\text{MnO}_2/\text{KOH}0.5\text{M}$ ). Dans la pratique, les sondes de désintégration sont largement utilisées à base de titane activé et le graphite. La norme européenne reconnaît deux véritables électrodes de référence et des sondes de désintégration (EN12696, 2000).

L'aluminium et le magnésium et leurs alliages sont également utilisés dans la protection cathodique par anode galvanique, un des avantages de ces alliages est qu'ils sont plus légers que le zinc. Toutefois, leurs oxydes et d'autres productions de corrosion sont volumineux et pourraient attaquer le béton. Ils sont donc moins attrayants pour des applications des bétons.

Les premiers systèmes galvaniques pour le béton armé ont été installés dans le États-Unis sur des tabliers de pont. Le premier était en 1978 en utilisant l'aluminium, et à partir de 1976 jusqu'en 1980 une étude a été réalisée sur un système de zinc dans l'Illinois.

Les systèmes de protection cathodique galvaniques ont été largement utilisés depuis le début des années 1990 en Florida, dans des piles du pont en béton précontraint dans la mer. L'une des raisons pour lesquelles le système galvanique est utilisé, est parce que la résistivité du béton est faible en raison des conditions d'exposition marines. Les systèmes de Florida incorporent souvent une anode distribuée de zinc fixée sur le béton exposé à l'atmosphère et des anodes de zinc en

vrac sont placées sous l'eau où le courant passe par l'eau de mer pour protéger les zones immergées de faibles résistances (Broomfield, 2007).

Les anodes distribuées utilisées en Florida sont principalement en zinc pulvérisé par arc électrique de quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur.

Les anodes pulvérisées sont largement utilisées dans les États-Unis pour le système de courant imposé.

À l'origine, les anodes de maille ont été serrées mécaniquement sur la pile. Dans des versions ultérieures, une veste GRP contenant du zinc à maillage, le joint entre cette dernière et la pile est rempli de coulis après la connexion du zinc à l'acier. Tous ces systèmes et leurs performances dans Florida sont discutés dans Kessler et al. (1995,2002). Le prochain développement majeur est le zinc humectant qui est pulvérisé thermiquement sur les surfaces, le zinc humectant pénètre le béton et augmente l'humidité ce qui maintient une faible résistance électrique et maintient aussi le flux de courant entre l'anode et l'acier (Bennett et al., 2000).

Les systèmes sacrificiels de PC ont des avantages évidents de simplicité et de facilité d'application, les principales questions posées concernent leur durée de vie effective.

#### **III-2-5.1.4. Les types d'anode**

-Titane activé avec des oxydes de métaux différents, en particulier, le ruthénium ou l'iridium, utilisé sous forme de treillis, fils ou bandes, est le plus fiable et largement le plus utilisé (Mudd et al., 1988). Il a de bonnes propriétés mécaniques et peut facilement être adapté à toute la surface de la structure afin d'obtenir une bonne répartition du courant.

Il est généralement recouvert d'un revêtement de mortier, mais peut aussi être intégré directement dans le béton, il peut fournir des densités de courant

jusqu'à 100 mA/m<sup>2</sup> sur de longues périodes, des teneurs maximales à court terme de 300-400 mA/m<sup>2</sup>. Les tests de laboratoire et l'expérience sur le terrain indiquent que la durée de vie peut varier de 20 à plus de 100 ans (si la qualité du béton et de recouvrement sont suffisantes).

-Un deuxième type d'anode est basé sur un revêtement conducteur avec de la poudre de carbone dans une matrice organique. Il a les avantages suivants: il ne nécessite pas un recouvrement, il peut facilement être appliqué aux structures de toute forme, et il ne présente pas de problèmes de poids supplémentaire à la structure. Le coût de l'installation peut être inférieur, en baisse d'environ la moitié des systèmes de treillis de titane activé. D'autre part, il ne peut pas livrer les densités de courant supérieure à 20 mA/m<sup>2</sup> sur de longues périodes (et les niveaux maximum de 35 mA/m<sup>2</sup>) et sa durée de vie peut atteindre 10 à 15 an, mais pas dans les climats humides où il peut y avoir perte d'adhésion et les effets de la détérioration prématurée.

-Anodes de l'asphalte conducteurs qui ont fonctionné pendant plus de 20 ans dans la protection des dalles de pont en Amérique du Nord doivent être exclus de nombreuses applications en raison de problèmes de poids et les limites de dimension, et parce qu'ils ne peuvent pas être appliqués sur des surfaces verticales ou sur les toits. Cependant, les systèmes qui ont bien actionné semblent bien fonctionner après telles longues périodes.

-De nouveaux types d'anodes (ciment se superpose à des fibres de carbone nu ou revêtu de nickel, revêtements de titane pulvérisé, les oxydes conducteurs de céramique etc) ont été utilisés depuis quelques années, mais l'expérience acquise est encore insuffisante pour définir leur fiabilité sur de longues périodes.

-Des revêtements solubles de zinc ou d'aluminium ou magnésium sont pulvérisés par projection thermique (ou de leurs alliages) sont également utilisés. L'expérience pratique existe aux Etats

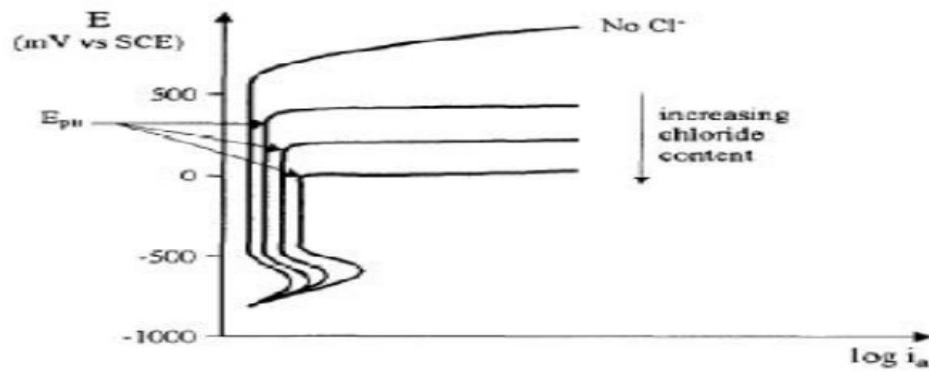
-Unis, entre autres, sur les ponts. Un autre système sacrificiel est basé sur une feuille de zinc attaché à la surface du béton au moyen d'un adhésif à conduction ionique gel (Bennet et Firlotte, 1996 ; Peelen et Polder, 2002 ; Raupach et Bruns, 2002).

-Plusieurs alliages à base d'aluminium (généralement de type Al-Zn-In) ont été testés (Suárez, et al., 1999 ; Genescà et al., 1998), (80% aluminium, 20% zinc, et 0.2% indium). Les résultats montrent que le rendement électrochimique d'un alliage Al anode sacrificielle dépend fortement de la formation de produits de corrosion sur la surface.

### **III-2-5.1.5. Effet de la protection cathodique sur la teneur critique en ions chlore**

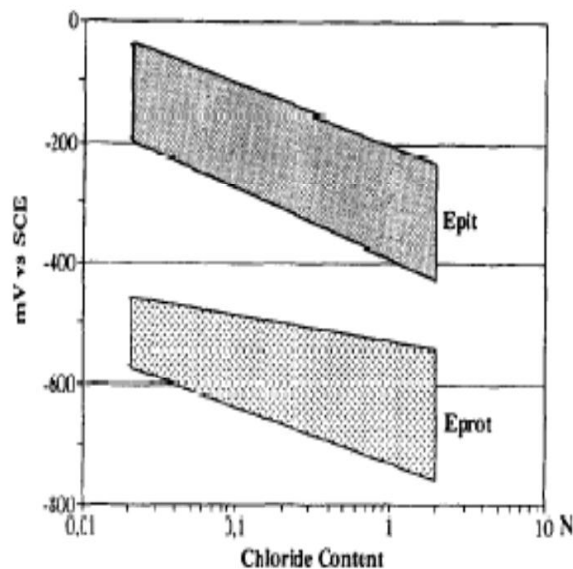
#### **A. Initiation de la corrosion et sa prévention**

Le comportement actif-passif de l'acier en béton est fortement influencé par la présence des chlorures (Figure III.5). Quand la teneur en chlorure augmente, le seuil de passivité est réduit et le potentiel le plus élevé, qui s'appelle le potentiel de piquê de corrosion,  $E_{pit}$ , diminue significativement de +500 à -500 mV vs SCE passant de béton non contaminé au béton très contaminé. Le potentiel de piquê dépend également de la température, du pH, du type et du dosage en ciment, de la porosité du béton, des potentiels etc. Le contenu le plus élevé de chlorure compatible avec les conditions passives pour chaque potentiel est le contenu critique de chlorure à ce potentiel.



**Figure (III.5) :** Comportement anodique de l'acier dans le béton en présence de chlorures  
(P. Pedferri, 1996)

Pour le potentiel normal de corrosion (autour de 0 V SCE), la teneur critique en chlorures est de l'ordre de 0.4 à 1% du poids de ciment. En abaissant le potentiel, le contenu critique des ions chlore nécessaire pour amorcer la corrosion des aciers immergés dans une solution de  $\text{Ca(OH)}_2$  saturé augmente, comme le montre la (Figure III. 6).



**Figure (III.6) :** Valeurs des potentiels de piquê et de protection mesurées sur l'acier immergé dans une solutionsaturé de  $\text{Ca(OH)}_2$  en fonction de la teneur en ions chlore (P. Pedferri, 1996)

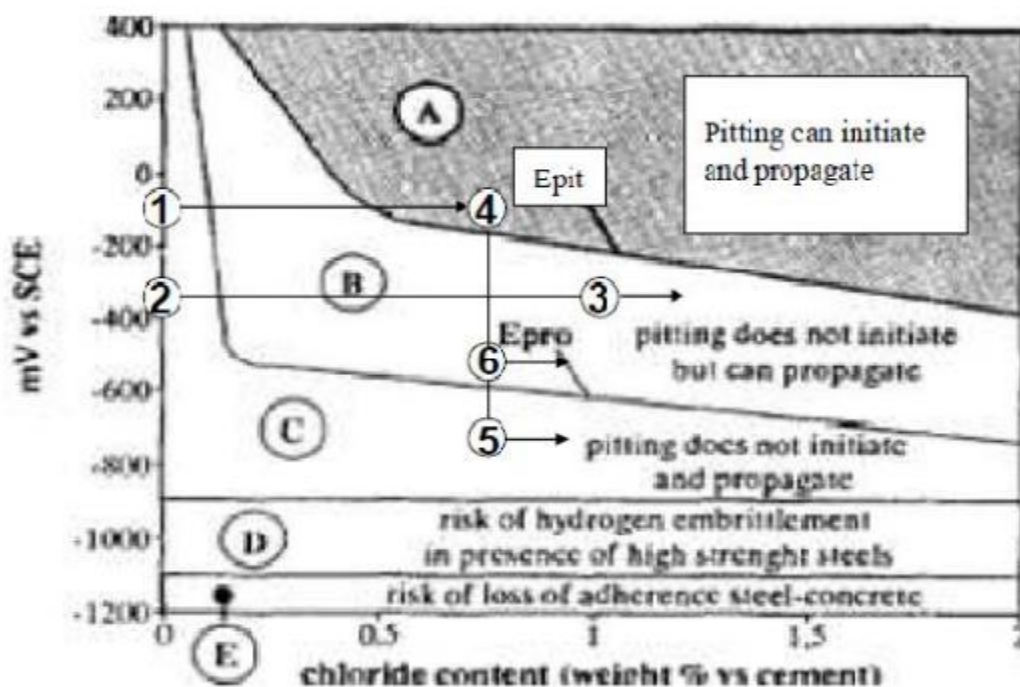
La prévention cathodique de la corrosion d'armature en acier est basée sur l'influence forte du potentiel sur la teneur critique en ions chlore. En imposant une polarisation cathodique aux armatures, dès la mise en oeuvre de la structure et durant toute la durée de sa vie, la teneur critique en ions chlore nécessaire à l'initiation de la corrosion de l'acier dans le béton augmente de sorte que dans la pratique il ne soit jamais atteint pendant la durée de vie de la structure (possible même avec des densités de courant cathodiques basses, dans la gamme de 0.5 à 2 mA/m<sup>2</sup> de surface du béton, produisant une diminution de potentiel de 150-250 mV).

### **B. Propagation de la corrosion et son contrôle**

Si, pour une teneur donnée de chlorure, le potentiel d'acier  $E$  devient plus positif que  $E_{pit}$ , ou, pour un potentiel donné, la teneur en ions chlore est plus haute que la valeur critique, le film protecteur peut être localement détruit et par conséquent une attaque localisée peut avoir lieu.

Les zones où le film est détruit se comportent comme des anodes et les zones qui restent passives se comportent comme des cathodes. Le courant de corrosion, qui traverse le béton des zones anodiques vers les zones cathodiques, transporte des chlorures à l'intérieur des piqûres, où l'alcalinité est réduite par l'hydrolyse des produits de corrosion. Ainsi, la propagation de l'attaque favorise davantage de propagation, apportant une augmentation d'agressivité dans les zones anodiques (mécanisme autocatalytique).

Une fois l'attaque lancée, elle peut également se propager à des potentiels plus négatifs que  $E_{pit}$ . Pour l'arrêter, il est nécessaire d'atteindre un potentiel plus bas  $E_{pro}$  au-dessous duquel l'acier se repassive.  $E_{pro}$ , comme  $E_{pit}$ , change avec la teneur en chlorure, le pH, la température, etc., mais, de toute façon il reste, environ 300 mV inférieur à  $E_{pit}$  (Figure III.7)



**Figure (III.7) :** Comportement de l'acier dans le béton selon le potentiel de l'acier et la teneur en ions chlore par rapport au poids de ciment (P. Pedefferri, 1996)

Avec des potentiels dans la gamme ( $E_{pit}$  -  $E_{pro}$ ), la corrosion ne commence pas, mais si elle est lancée, elle peut se propager. Néanmoins, quand le potentiel de l'acier corrodé est dans cette gamme, la différence de potentiel et le courant de corrosion entre les zones anodiques et cathodiques diminuent, et, en conséquence, le taux de corrosion des zones actives diminue.

Ces réductions deviennent plus importantes lorsque le potentiel diminue, et quand le potentiel approche de  $E_{pro}$ , le courant devient très faible.

### III-2-5.2. Extraction électrochimique des ions chlores

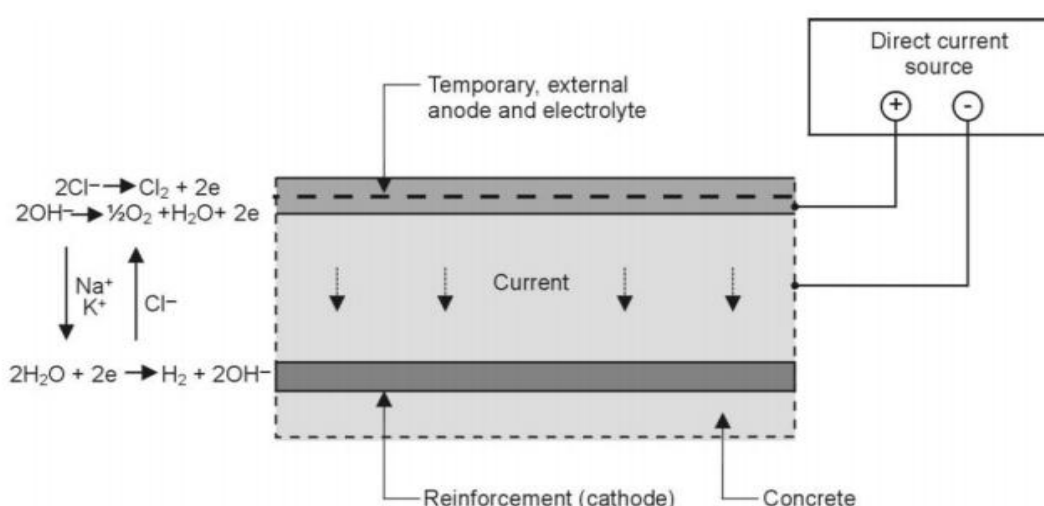
#### III-2-5.2.1. Généralités

La première application d'extraction électrochimique des ions chlore a eu lieu par (Startfull, 1973 ; Morrison et al., 1976). Le « Kansas Department Of Transportation (KDOT) » a extrait les ions chlore en utilisant une anode de cuivre.

Ensuite cette technique a été appliquée pour traiter un pont contaminé par les chlorures en utilisant une densité du courant très élevée de 23 à 28 A/m<sup>2</sup> pendant 24 heures. Ce niveau de courant a provoqué des effets négatifs comme la diminution de l'adhérence acier – béton et la fissuration du béton. A cause de ces effets négatifs cette technique a été refusée comme une technique de réhabilitation. Depuis, de nombreux travaux de recherche se sont intéressés au développement de cette technique en optimisant les valeurs de courants nécessaires pour avoir une application efficace en évitant les effets adverses.

La technique d'extraction électrochimique des ions chlore, ou déchloration, consiste à faire passer un courant électrique continu entre une anode placée sur la surface du béton et l'acier (cathode). Ce courant provoque le déplacement des ions chlore chargés négativement vers l'anode extérieur (Figure III.8). Lorsque les ions chlore arrivent à la surface du béton, ils passent dans l'électrolyte et peuvent donc être enlevées définitivement du béton (Morrison et al., 1976, Marcotte et al., 1999).

Le niveau actuel de courant appliqué lors d'un traitement d'extraction est de 1 à 5 A/m<sup>2</sup>. Cette technique, contrairement à la protection cathodique, est temporaire avec une période d'application de 4 à 5 semaines.

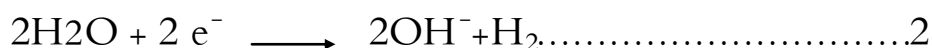


**Figure (III.8) :** Réactions de principe impliquées dans l'extraction de chlorure (L. Bertolini et al., 2004)

### III-2-5.2.2. Principe d'extraction électrochimique des ions chlores

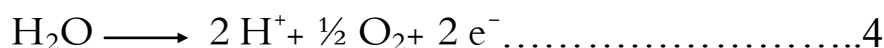
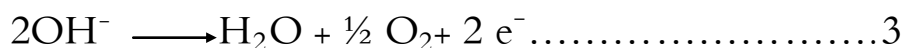
Le courant électrique entre l'anode extérieure et l'armature provoque un mouvement ionique, les anions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{OH}^-$ ) déplacent vers l'anode, alors que les cations ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) se déplacent vers la surface de l'acier.

Sur la surface de l'acier, des ions hydroxyle et/ou l'hydrogène gaz sont formés avec les électrons qui sont fournis par l'alimentation, selon les réactions suivantes :

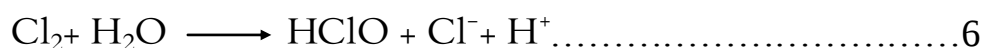


En général, la consommation d'oxygène sur la surface de l'armature est très faible, c'est pourquoi la première réaction se produit très lentement.

Les réactions électrochimiques qui se produisent à l'anode sont une formation de gaz oxygène ou chlore, selon les réactions suivantes :



Si le pH de l'électrolyte est inférieur à 4, une quantité très importante de  $\text{Cl}_2$  se produira. Pour éviter cet effet, l'électrolyte doit être toujours basique ( $\text{pH} > 7$ ). Dans ce cas, les réactions (3) ou (4) deviennent les réactions anodiques principales. La quantité de chlore gazeux produite va être rapidement hydrolysée en acide hypochloreux et en ions hypochlorure selon les réactions suivantes:





Les points positifs de l'application de cette technique sont :

- abaissement de potentiel thermodynamique de l'acier .
- augmentation de la teneur en ions hydroxyle et en conséquence augmentation du pH autour de l'armature .
- diminution de la teneur en ions chlore près de l'acier.

### III-2-5.2.3. Efficacité d'extraction des ions chlore

Des études en laboratoire [Morrison et al., 1976 ; Marcotte et al., 1999 ; Arya et al., 1992 ; Castellote et al., 1992 ; Bennet et al., 1996.) ont montré que l'efficacité de cette technique dépendait de plusieurs facteurs :

- teneur initiale en ions chlore .
- profondeur atteinte par les ions chlores .
- différence de potentiel appliqué .
- type d'électrolyte utilisé .
- qualité du béton d'enrobage.

### III-2-5.3. Effets secondaires des techniques électrochimiques

Les effets bénéfiques des méthodes électrochimiques sont bien assurés. Néanmoins des effets négatifs, dits secondaires, pourraient apparaître lors de l'application d'une de ces techniques.

Ces effets dépendent des niveaux de potentiel et de densité de courant utilisés qui peuvent influencer les caractères d'origine du béton.

En effet, la polarisation de l'acier provoque une redistribution des espèces ioniques existant autour de l'acier. La réduction électrochimique des espèces ioniques sur la surface d'acier peut provoquer des effets négatifs tels que la fragilisation des aciers par hydrogène, l'endommagement de l'interface acier-béton et/ou la dissolution de certaines des phases du béton suite à la valeur élevée de pH (J. Broomfield, 1996). Le déplacement des espèces cationiques vers la surface de l'acier peut provoquer la solvatation de la pâte de ciment. L'accumulation des cations autour de l'acier pourrait commencer ou accélérer la réaction alcali-silice.

#### **III-2-5.3.1. Production d'hydrogène sur la surface d'acier**

La polarisation élevée de l'acier, comme dans le cas de l'extraction de chlorure et de la réalcalinisation, provoque le dégagement d'hydrogène à la surface de l'acier (J. Broomfield, 1996 ; E.E. Velivasakis.1997). Or, l'adsorption de l'hydrogène par l'acier conduit à la fragilisation par hydrogène (B. Elsener et H.Böhni, 1994) surtout pour les ouvrages en béton précontraint. De plus, la production de l'hydrogène gazeux conduit à une augmentation locale de pression qui pourrait induire des fissurations dans la matrice cimentaire. L'utilisation de deux dernières techniques n'est donc pas recommandée pour les structures de béton précontraint.

Par contre, si la densité de courant effectuée est inférieure à  $1\text{A/m}^2$ , alors la production de l'hydrogène n'a aucun effet nocif sur l'ensemble de la structure (J. Broomfield.1996 ; E.E. Velivasakis, 1997). Ainsi, la protection cathodique ne devrait pas être concernée par ce problème d'hydrogène.

#### **III-2-5.3.2. Diminution de l'adhérence acier-béton**

L'influence de la formation de gaz d'hydrogène et l'accumulation des espèces cationiques autour de l'acier sur l'adhérence acier-béton a été beaucoup étudiée.

Des études (E.B. Rosa et al., 1913 ; G. Mole, 1977) ont montré que le passage à long terme d'un courant cathodique provoque une diminution effective de l'adhérence. Selon ces études, l'accumulation de  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  autour de l'acier était la cause principale de cette diminution.

D'après une autre étude (J. Vrabie., 1977), la perte d'adhérence acier-béton était de 10% pour une densité de charge totale d'environ 37000 Ah/m<sup>2</sup>. Cette perte d'adhérence était en relation avec la densité de charge totale appliquée et non avec la densité de courant de protection appliquée. D'autre part, l'application d'un potentiel de -1620 mV vs SCE pendant 24 mois n'avait aucun effet sur l'adhérence (J.A. Chaw, 1965). Les résultats de cette dernière étude sont en contradiction avec les résultats obtenus par Locke et al. (1983).

Le dégagement de gaz hydrogène peut avoir lieu suivant le niveau de polarisation cathodique d'acier (N. Ihekweba et al., 1996). Ce dégagement de gaz hydrogène peut être possible lorsque le potentiel d'acier est plus négatif que -1000 mV vs SCE. D'après Bennett et al. (1993), la perte d'adhérence acier-béton est de 40% en appliquant une densité de courant de 50 A/m<sup>2</sup> et des charges de 2000 Ah/m<sup>2</sup>, cette étude a montré aussi qu'avec des densités de courant inférieures à 5 A/m<sup>2</sup> et des charges de 1500 Ah/m<sup>2</sup> d'acier, les effets étaient négligeables.

De même, une autre étude (C. Page, 1994) a montré que l'application de densités de courant de 5 mA/m<sup>2</sup> à 5 A/m<sup>2</sup> ne provoque aucun effet sur l'adhérence acier-béton.

### **III-3. Prévention des armatures dans le béton**

#### **III-3-1. Introduction**

Il est bien connu que la vie d'une structure en béton armé, dans la mesure où la corrosion est concernée, présente deux périodes distinctes. Au premier lieu (la phase d'initiation) dans le dioxyde de carbone ou les chlorures pénètrent le béton

d'enrobage, atteindre l'armature et dépassiver par la suite l'acier. Dans le second (la phase de propagation) a lieu la corrosion (modèle de Tuutti). La durabilité nécessaire pour la durée de vie demandée peut être obtenue théoriquement en augmentant à la fois la période d'initiation (p.ex. en agissant sur la qualité du béton ou sur l'épaisseur de l'enrobage), et le temps de propagation (par exemple, contrôler les facteurs qui déterminent la vitesse de corrosion, tel que la résistivité du béton).

En général, la première action, qui prolonge le temps d'initiation, est plus viable et fiable. Dans tous les cas, la prévention commence dans la phase de conception, lorsque la structure est conçue et les calculs de structure sont faits, l'épaisseur de l'enrobage est fixée, les détails sont élaborés, les matériaux et leurs proportions et d'éventuelles mesures supplémentaires de prévention sont choisis. La prévention continue lorsque le béton est mélangé, coulé, compacté et durci et dans l'ensemble de durée de vie de la structure, avec une surveillance, inspection et de maintenance programmée. Il est bien connu que le coût des préventions adéquates réalisées durant les phases de conception et de construction sont minimales par rapport aux économies qu'ils permettent au cours de la durée de vie et plus encore, par rapport aux coûts de la réhabilitation qui pourraient être nécessaires à des dates ultérieures.

### **III-3-2. Mesures préventives**

#### **III-3-2.1. Armatures résistantes à la corrosion**

##### **III-3-2.1.1. Les armatures en acier inoxydable**

Un acier inoxydable est un acier qui contient au minimum 10,5% de chrome (EN 10088). Ce chrome participe à la formation d'une couche superficielle dite couche « passive » ; elle est composée d'un film très mince de quelques nanomètres, invisible à l'œil nu ; ce film est constitué d'oxydes et d'hydroxydes de

chrome. Cette couche fait partie intégrante du métal et elle assure une sorte de protection anti - corrosion durable.

Les aciers inoxydables sont divisés en quatre groupes: ferritique, ferro-austénitique, martensitique et austénitique.

Historiquement, les aciers inoxydables les plus couramment utilisés dans l'industrie de la construction sont aciers austénitiques tels que 304, 316, et 316 LN aciers inoxydables (Smith et Tullman, 1999). Ces aciers sont en faibles pourcentages de carbone et contiennent environ 18 pour cent de chrome et 8 pour cent de nickel. Ferritique-austénitique aciers inoxydables ont également été utilisés comme acier d'armature pour béton. On les appelle des aciers inoxydables duplex qui contiennent 21 à 28 pour cent de chrome et de 1 à 8 pour cent de nickel. Les aciers ferritiques ont moins de 17 pour cent de chrome et aciers martensitiques ont de 12 à 18 pour cent de chrome. Ni l'un ni l'autre n'a été employé en tant qu'acier d'armature de béton.

Une étude de FHWA a évalué l'utilisation de 304 et 316 aciers inoxydables dans les tabliers des ponts en béton armé. L'étude a indiqué que les armatures des tabliers construits en utilisant seulement 304 inoxydables pour les armatures inférieures et supérieures ont démontré une forte résistance à la corrosion. Toutefois, pour les armatures traditionnelles des ponts construits en utilisant l'acier inoxydable 304 pour les armatures supérieures seulement et couplé avec de l'acier classique pour les armatures inférieures exposées à une faible résistance à la corrosion. L'acier inoxydable 316 a bien exécuté dans les deux cas (McDonald et al., 1998). Une autre étude a évalué 304, 316LN, et de l'acier inoxydable duplex 2205 et a indiqué que l'acier inoxydable solide ne montrait aucun signe de corrosion lorsque la concentration de chlorure dans le béton adjacent aux barres en acier inoxydable a été 15 fois plus élevée que le seuil d'initiation de la corrosion classique (Clemena et Virmani, 2002).

Bien que beaucoup d'études aient indiqué le rendement élevé des aciers inoxydables dans le béton, le principal obstacle à son utilisation dans les structures en béton armé est leur coût initial élevé.

### **III-3-2.1.2. Acier microcomposite**

MMFX acier microcomposite a été développé par la Société MMFX acier et contient environ 9 pour cent de chrome. La propriété de composition chimique et le procédé de production de contrôle de la microstructure martensitique de microcomposite qui consiste des feuilles non transformées de nano d'austénite entre les lattes de martensite disloqué, ayant pour résultat une quasi-carbure aciers.

En raison de sa microstructure, la formation des cellules microgalvanic est empêchée, ce qui rend l'acier résistant à la corrosion.

Les études réalisées à l'université du Texas A&M ont indiqué que le seuil de chlorure de MMFX était d'environ neuf fois celle de l'acier classique et très proche de celle de l'acier inoxydable 304 (Trejo et Pillai, 2004). Les études réalisées à l'université du Kansas ont indiqué que l'acier de MMFX a eu un seuil plus élevé de corrosion et une plus faible vitesse de corrosion y comparé à l'armature en acier classique (Darwin et al., 2002 ; Gong et al., 2002).

### **III-3-2.2. Revêtement des armatures**

#### **III-3-2.2.1. Barres recouvertes d'époxy**

La barre recouverte d'époxy (ECR) est utilisée dans de nombreux ponts aux États-Unis, elle est produite par application de poudre époxy sur les surfaces fraîchement décapées en acier à haute température. Les barres d'armature recouverte d'époxy fondu sont trempées, le plus souvent dans un bain d'eau pulvérisée. ASTM A 775 (Spécification standard pour les barres d'armature en acier recouvert d'époxy) et A 934 (Spécification pour les barres d'armature en acier préfabriqué recouvert

d'époxy) fournit des spécifications de contrôle de la qualité des revêtements époxy lors de l'enduction, la manutention, l'expédition et de stockage (Manning, 1996).

Bien que la barre recouverte d'époxy ait été couramment utilisé depuis les années 1970 dans les tabliers de pont, des études récentes ont signalé que (ECR) peut ne pas fournir la durée de vie souhaitée en raison de problèmes de décollement cathodique, le département de Transport de Florida a déclaré que l'étude de décollement électrochimique des revêtements époxy pourrait engager en raison de l'exposition à l'eau salée et suivant la corrosion de macrocellules, pendant le service en sous-structures de pont (Sagues et al., 1994). Cependant, plus tard des études de décollement cathodique de l'ECR est rapporté que la réduction de l'adhérence était liée à l'eau pénétrée dans le revêtement et l'oxydation de l'acier fondamental, plutôt que la présence des ions chlorure ou le revêtement a endommagé excessivement (CRSI 1995 ; Weyers et al., 1998). Si le revêtement avait déjà décollé lorsque les ions chlorure sont arrivés à la surface de l'armature, la corrosion pourrait se produire sous le revêtement (Pyc et al., 2000). Clair (1992) a conclu que la vie de l'ECR de structures serait supérieur à celui des structures d'acier conventionnelles que de trois à six ans dans les milieux marins au Canada et dans le nord des États- Unis. Il a indiqué que les mécanismes de défaillance de l'ECR inclus décollement cathodique, une perte de propriétés isolantes époxy dans le cadre d'action de macrocellule, et l'évolution de l'hydrogène à cathodes secondaires développées sur l'anode macro après le pH a diminué en raison d'une action de macrocellule.

Bien que le décollement cathodique de l'ECR ait été rapporté par de nombreux chercheurs, une étude réalisée de FHWA en 1996 a indiqué que l'incorporation de l'ECR de structures en béton armé obtenu de bons résultats. L'étude a évalué un total de 92 tabliers de ponts, deux murs de barrière de pont, et un mur de barrière de bruit situés dans 11 états et trois provinces qui ont été

construits avec ECR et constaté que, globalement, les structures étaient en bon état, et seulement deux pour cent de segments de l'ECR ont montré la corrosion significative. Ces endroits ont été extraits à partir de fissuration de la lourde couche de béton peu profonde, haute perméabilité du béton, et les concentrations élevées de chlorure (Smith et Virmani, 1996). Dans une autre étude de FHWA il a été signalé que, pour obtenir la meilleure performance d'exécution, il doit être utilisé non seulement pour la nappe supérieure, mais pour les deux nappes de haut et de bas. L'étude a également recommandé la réparation des fissures et les zones endommagées de l'ECR (McDonald et al., 1998).

Actuellement de nombreuses entreprises cherchent à développer les barres modifiées de l'ECR. Pour résoudre le décollement cathodique et le problème de corrosion et apporter de nouveaux produits sur le marché.

#### **III-3-2.2.2. Revêtements de l'acier (galvanisation)**

Des nombreux travaux ont été effectués en utilisant des revêtements sur l'acier. Cette méthode a été beaucoup développée, de l'utilisation de peintures non métalliques jusqu'à l'application de recouvrement galvanique sur les aciers.

Les peintures jouent un rôle de barrière physique qui protège la surface métallique en empêchant le contact direct de cette surface avec les espèces agressives et les autres composants favorisant le commencement de la corrosion. Cette méthode a l'inconvénient de n'être pas sûre, car un petit défaut dans l'application de recouvrement provoquera un grand risque de corrosion de l'acier (V.S. Ramachandran et J. Beaudoin, 1999 ; A. Sagues, 1994 ; NACE, 1965 ; Freyssinet, 2000).<sup>[25]</sup>

---

[25] Al hajjar, H. (2008). Applicabilité et efficacité d'une protection galvanique aux aciers de précontrainte, Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 228p. Juin 2008

De nombreux ouvrages protégés par l'application de revêtements de peinture montrent l'inefficacité de cette méthode pour éviter la corrosion d'acier car de nombreuses armatures recouvertes souffrent des effets de la corrosion.

On peut éviter les effets défavorables de cette technique en utilisant des recouvrements métallique « galvanique », à base de zinc, qui protègent l'acier même en présence de défauts d'application. Le zinc qui est un métal moins noble que l'acier, c'est-à-dire plus anodique que l'acier, se corrodera au profit de l'acier. La galvanisation à chaud permet de déposer des barres en acier dans un bain de zinc fondu à une température d'environ 450 °C (COST 521, 2003). Au contact de la solution interstitielle, il se forme un composé insoluble d'hydroxyzincate de calcium qui remplit les pores interfaciale de la pâte de ciment et agit comme des ponts entre le revêtement de zinc et le béton (R. Fratesi, G. Moriconi et L. Coppola., 1996), et protège bien contre la carbonatation et l'action des ions chlore. Dans une même structure ou partie de structure, il faut éviter d'utiliser en même temps des barres galvanisées et non galvanisées (ou boulons, ancrages, etc.).

En général, cette technique de protection est efficace pour éviter la corrosion de l'acier. Les aciers protégés par un dépôt surfacique de zinc supportent la présence d'une quantité plus élevée d'ions chlore. La diminution du pH de la solution interstitielle jusqu'à 9.5 ou 9, liée à la carbonatation du béton, ne réduit pas l'efficacité de cette technique parce que le zinc reste passif pour ces valeurs de pH.

Les inconvénients de cette technique peuvent être résumés par les points suivants : premièrement, l'efficacité de cette technique dépend de la composition chimique de l'acier et de la valeur du pH de solution interstitielle. Ainsi, dans certains cas, les couches d'alliage Zn-Fe se forment mais la couche de zinc pur n'est pas continue à la surface de l'alliage, ce qui provoque une diminution de résistance contre la corrosion (on peut avoir cet inconvénient pour l'acier ayant une

teneur élevée en silicium). Deuxièmement, le dégagement d'hydrogène à la surface de l'armature lors de la réaction entre le zinc superficiel et la solution interstitielle du béton frais provoque une diminution de l'adhérence entre l'armature galvanisée et le béton, mais les conditions d'utilisation restent toutefois respectées.

### **III-3-2.2.3. Faible perméabilité / Diffusivité du béton**

Une autre méthode de protection contre la corrosion est de diminuer la perméabilité ou la diffusivité du béton. Faible perméabilité / valeurs de diffusivité vont ralentir la pénétration de l'eau, l'oxygène, le chlorure de ions, et d'autres produits chimiques qui initient la corrosion de l'armature. Une faible perméabilité réduit aussi la conductivité électrique du béton. Utilisation des rapports eau/ciment plus faible (à l'aide de superplastifiants) et des ajouts cimentaires peuvent aussi diminuer la perméabilité / diffusivité du béton. Des études ont montré que l'utilisation des bétons avec une eau/ciment de 0,3 et 0,32 indiquent que le béton est pratiquement imperméable (Sherman et al., 1996). Cependant, des enquêtes concernant les fissures des tabliers de pont, ont indiqué que les bétons de ciment dont le contenu nécessaire pour obtenir ces rapports eau-ciment peuvent présenter une fissuration excessive, ce qui permettrait la pénétration plus rapide d'eau, d'oxygène et d'autres produits chimiques dans le béton. L'application des traitements de surface en béton tels que les membranes de polymère, scelleurs pénétrants, et la modification de revêtements à base de ciment ou acrylique peut également empêcher la pénétration de l'eau, l'oxygène, et d'autres produits chimiques dans le béton. L'utilisation d'une plus grande profondeur de la couverture par la conception peut aussi prolonger la phase d'initiation à la corrosion en augmentant la distance qui doit être parcourue par les chlorures et d'autres produits chimiques pour initier la corrosion.

### III-4. Étapes à suivre pour réhabiliter une structure en béton armé corrodée

Il convient de suivre la démarche développée ci-après lorsqu'un ouvrage en béton armé est dégradé par corrosion.<sup>[26]</sup>

La méthodologie à appliquer pour déterminer les techniques de réhabilitation est celle qui est décrite dans ce cotexte. Elle comprend les quatre phases suivantes.

✓ **Le diagnostic** : il a pour but de déterminer la nature des désordres et, en cas de corrosion, l'origine de celle-ci et son étendue. Il permet de savoir si la corrosion est localisée ou généralisée ce qui a une très grande importance dans le choix des techniques de réparation.

✓ **Les exigences et les contraintes** : le maître de l'ouvrage doit préciser dans "son programme" ses exigences (simple remise en état de l'ouvrage (réparation)) ou remise en état avec modification de son état de service (renforcement, élargissement), en tenant compte de son état de conservation (force portante, etc.). Le maître d'oeuvre devra respecter le programme à la lettre sauf impossibilité technique avérée.

Il doit aussi recenser ou faire recenser les contraintes imposées durant les travaux (maintien en service partiel ou total de l'ouvrage etc.), d'environnement (pollution, bruit, hygiène, sécurité etc). et techniques pour la mise en oeuvre de la méthode de réhabilitation (conditions de température et d'hygrométrie à respecter, prise en compte des chocs et vibrations dus au trafic, aux engins de démolition et incidence sur la tenue des produits de réparation en cours d'application, détermination des matériels nécessaires pour accéder à l'ouvrage et pour effectuer les travaux etc.).

---

[26] Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion, Documents scientifiques et techniques, (AFGC /CEFRACOR), 107p.Taché, G ., et al. (2003).

✓ **L'étude technico-économique** : cette étude comparative concerne le choix des actions à entreprendre (fermeture définitive, réparation, remplacement, maintien en état...) avec leur incidence économique. La décision finale étant du ressort du maître de l'ouvrage.

Si cette étude aboutit à la décision d'une réhabilitation elle doit alors permettre de choisir la ou les techniques les mieux adaptées.

✓ **La mise au point du marché de réparation** : le maître d'œuvre doit préciser les hypothèses sur l'état de l'ouvrage si cela est nécessaire (contractualisation partielle ou totale des résultats des études effectuées pendant les phases précédentes, visite contradictoire de l'ouvrage avec chacun des candidats de la consultation, état des lieux avec le candidat désigné...), les différentes contraintes imposées, les règles de sélection des offres, les variantes et les propositions techniques autorisées.

En outre, le maître d'œuvre doit indiquer quelles garanties ou responsabilités seront demandées à l'entrepreneur (par exemple, responsabilité civile en cours de travaux contre les dommages causés à l'ouvrage à réparer, à d'autres ouvrages, aux usagers et aux tiers etc.), garanties particulières de durée fixée sur certains des travaux de réparation (par exemple, revêtement de protection, inhibiteur de corrosion etc.).

Il y a lieu de rappeler qu'après réception des travaux de réparation, outre la mise en œuvre de la responsabilité contractuelle (en cas d'application défectueuse du contrat), de la garantie de parfait achèvement ou des garanties particulières, peuvent s'appliquer également les principes de la responsabilité décennale.

Les principes de la responsabilité décennale s'appliquent aux travaux de réparation (travaux neufs sur existant) mais normalement pas aux désordres que pourrait subir l'ouvrage du fait des travaux de réparation. Ces désordres relèvent de

la responsabilité de droit commun (dite responsabilité délictuelle ou quasi-délictuelle), A ceci s'ajoute aussi la responsabilité en matière de produits défectueux.

### **III-5. Cas d'étude**

Avant de présenter notre travail, nous pouvons donner une synthèse sur quelques sujets qu'ils ont traité le domaine de durabilité et qu'ils ont touché principalement la dégradation et la réparation des ouvrages en béton armé, Un certain nombre d'expertises ont été faites sur la dégradation des ouvrages dans la région de EL OUED. Parmi ces expertises, celles qui ont confirmé que la cause principale été l'agressivité du sol, surtout dans le cas ou la partie infrastructure été touché, mais pour le reste la qualité des matériaux utilisés, la réalisation de l'ouvrage, son exploitation ou l'environnement.

Ce travail présente les objectifs suivants :

- Mettre en évidence les différents facteurs d'influence sur la dégradation des ouvrages et leurs fréquences .
- Analyse des travaux de réparation des ouvrages qui sont la conséquence des désordres .
- Il s'appui sur des données recueillies au cours des visites sur site pour les ouvrages au cours de réparation, et des dossiers d'expertises.

Cette contribution comporte Traiter les éléments dégradés dans la zone de la el oued .

La plupart des dommages sont dus à la qualité du béton, aux problèmes de sol, à la surchauffe estivale, aux défauts de conception et au manque d'entretien.

### III-5-1. Introduction

La région d'el-oued (Sud Est d'Algérie) comme d'autre région du territoire national a témoigné pendant plus de trentaine d'années une évolution dans la construction des ouvrages en béton armé, une partie de ces derniers souffrent pendant une longue période de multiples problèmes de dégradation qui sont provoquées par plusieurs sources notamment par la corrosion des armatures, ces dégâts inquiètent constamment les autorités locales qui n'ont pas trouvé une solution durable (manque des spécialistes d'une façon suffisante ainsi que les mains d'œuvres qualifiées), d'une autre part la plus part de ces ouvrages dégradés sont pour des gens privés et qui n'ont pu pas faire une réparation adéquate à cause de coût très cher.

Rechercher notre étude tourne sur et domaine de génie civil, représente château d'eau au ville d'el-oued (OUED EL ALANDA), notre diagnostic a prouvé que la cause principale de dégradation de béton est l'agressivité du milieu environnant, surtout dans le cas où la partie infrastructure été touchée, aussi on a trouvé parmi l'agressivité de milieu d'autre causes qui sont responsable de dépassement des armatures et d'éclatement du béton d'enrobage, on cite la mauvaise qualité du béton, défauts de conception, mauvaise mise en œuvre, etc...

L'analyse de notre cas vise principalement les étapes suivantes :

- Une description détaillée des ouvrages dégradés ;
- Collection des désordres constatés ;
- Analyse détaillée des désordres constatés ;
- Causes des dégradations ;
- Mécanisme de dégradation par les principaux agents agressifs ;
- Solution technique de réparation et de prévention ;
- Conclusion.

La dernière partie analyse d'une façon profonde les principaux facteurs qui influent sur la durabilité vis-à-vis de la corrosion dans la région d'El Oued, on cite dans un ordre préférentielle, la qualité du béton, les conditions climatiques et environnementales, les conditions de la mise en œuvre. Autres facteurs pouvant intervenir dans ce contexte, on cite la conception des structures et les méthodes d'entretien.

### **III-5-2. Réhabilitation de château d'eau a EL-OUED**

Un ouvrage en génie civil est conçu pour une durée de vie bien définie (50 ans en générale), mais il est livré à lui-même pendant sa mise en service. Il est sujet de plusieurs dégradation et agressions (vieillesse, fissuration, corrosion...), pouvant réduire sa durée de vie en le rendant inapte à accomplir ces fonctions normales.

L'élaboration d'un projet de réhabilitation d'un ouvrage résulte généralement d'une large synthèse qui nécessitera de la part de l'Ingénieur des connaissances étendues sur le domaine d'emploi des différentes techniques de réparation, le choix d'une technique de réparation est fonction de sa faisabilité, des délais nécessaires des coûts directs (démolition, réparation, et travaux provisoires) et des coûts indirectes (déviations de la circulation, incidences, etc.).

Ce travail consiste tout d'abord à procéder à des opérations d'expertise, de diagnostic, des essais sur site, afin de proposer des solutions de réparation. La solution technique de réparation est fonction de l'élément étudié, ensuite l'examen visuel des ouvrages a révélé différents désordres : éclatement et fissuration des éléments en béton armé, corrosion des aciers, trace de rouille, infiltrations et fuites d'eaux.

Les résultats d'un vrai diagnostic nous ont permis de proposer des solutions techniques de réparation et de réhabilitation. Les travaux de confortement sont classés ci-dessous :

- Réfection de la coupole inférieure de la cuve.
- Réfection du revêtement d'étanchéité à l'intérieur de la cuve.
- Réfection des fissures sur poteaux.
- Réfection des murs voiles.
- Réfection de la plate forme.

Le béton de ciment constitue certainement un des matériaux de constructions les plus durables. Certains ouvrages demeurent en excellent état après plus d'un siècle d'exposition à des conditions climatiques particulièrement rigoureuses. Il est quelque fois surprenant de constater que certains ouvrages récents présentent une détérioration importante, alors que les connaissances actuelles sur le ciment et le béton sont très approfondies.

Les questions que l'on se pose lors du diagnostic d'un ouvrage peuvent être résumées de la manière suivante :

- Quelles sont l'origine et l'étendue des désordres ?
- Quelles sont leur évolution probable et leurs conséquences sur la sécurité de l'ouvrage ?
- L'ouvrage est-il réparable et quelles sont les méthodes de réparation et/ou de protection appropriée ?

Dans tous les cas, il paraît nécessaire de procéder à une enquête afin de collecter le maximum d'informations sur : l'âge, les plans, la nature des matériaux (ciment, dosage,...) et la nature de l'environnement.

Ensuite, l'inspection visuelle détaillée permet de reconnaître la nature des désordres, de décrire leur localisation et, le cas échéant, d'analyser leur évolution depuis la dernière visite. Parmi les causes de désordres, la principale est la corrosion des armatures. Les désordres apparaissent sous la forme de fissures, d'éclats ou d'épaufrures. Mais la corrosion est généralement amorcée dans des zones voisines sans pour autant avoir encore provoqué de désordres visibles. Une détection s'impose.

Après avoir identifié l'agent agressif à l'origine de la corrosion (carbonatation ou chlorures), et évalué sa profondeur de pénétration, la mise en œuvre d'essais non destructifs (mesures d'enrobage et de potentiel) permet de déterminer correctement l'étendue des zones corrodées et d'en prévoir l'évolution (Taché, 1998). Les principaux paramètres qui conditionnent le comportement d'un ouvrage vis-à-vis de la corrosion sont, dans l'ordre de leur importance : l'enrobage, la qualité du béton et l'environnement (Poineau, 1994 ; Baron, 1992).

Dans cette optique, le présent travail propose un diagnostic de château en béton armé âgés de (23 - 25) ans, permettant de mettre en évidence les causes principales de l'accélération de leur dégradation dans un premier temps, les étapes de réparation et de renforcement sont discutées dans un deuxième temps.

### **III-5-2.1. Description des ouvrages**

Les deux châteaux d'eau, objet de cette étude, se trouvent en plein Banlieue ville d'el-oued (Algérie).

Château d'eau de Oued Al-Alenda: il est composé d'une ossature avec poteaux, poutres et voile avec une infrastructure composée d'un radier général.

La cuve comporte un voile, une coupole inférieure et une coupole supérieure.

Le ciment qui est utilisé pour l'exécution de la semelle et de la cuve est de type HTS.

Le ciment qui est utilisé pour les autres parties de l'ouvrage est de type CPA.

Il a les caractéristiques géométriques suivantes :

- Hauteur totale d'une 30 m .
- Diamètre intérieur de l'ouvrage 7,5 m .
- Diamètre extérieur de l'ouvrage 12.5m .
- Capacité de la cuve 1000m<sup>3</sup> .d'eau potable .

### **III-5-2.2. Description des désordres observées**

L'examen des parties visibles et accessibles de ces ouvrages a révélé les désordres affectant l'extérieur des 2 châteaux d'eau ainsi que les parements intérieurs de la cuve du château d'eau suivant:

- Traces de rouille sur les murs voiles .
- Gonflement de plate forme avec l'apparition de fissures et quelques perforations .
- Fissures axiales au niveau de quelques poteaux.
- Trace de calcite de couleur blanchâtre au niveau de pieds des poteaux et des voiles et de la cuve.
- L'infrastructure est immergée totalement dans l'eau de la nappe phréatique .

Les figures ci-après illustrent les différentes dégradations citées.



**Photo (III.1)** : Quelques renforts visuels du dôme inférieur du château d'eau érodé



**Photo (III.2)** : Éclat de béton à certains endroits du dôme inférieur



**Photo (III.3)** : L'impact des fissures au niveau de la scène

### **III-5-2.3. Causes probables des dégradations**

Dans cette section nous nous sommes basés sur une prospection visuelle, fondement du diagnostic, établir des photographies complètes, parfaitement commentées et légendées ainsi n'oublions pas l'élaboration d'une recherche profonde concernant les plans d'exécution et autres informations auprès des archives de la direction d'hydraulique et algérienne des eaux.

Les résultats de différentes consultations ont permis de dégager les causes des dégradations le plus probable résumées ci-dessous.

### **III-5-2.4. Infiltrations des eaux potables**

Nous avons observé que le revêtement d'étanchéité ne fonctionne plus et qu'il y a un contact direct entre l'eau conservé et le béton de la cuve ce qui crée des petites perforations au niveau de la coupole inférieure ce qui laisse l'eau s'infiltrer et s'écouler de la cuve vers les éléments porteurs (voiles-poteaux-poutres).

D'une autre part on note l'absence d'une façon parfaite des travaux de l'entretien et de maintenance qu'il faut exécuter d'une manière périodique.

### **III-5-2.5. Pénétrations des agents agressifs dans l'eau potable (chlorure) le corps du béton**

Le béton a dans la plupart des cas, une porosité ouverte, cela signifie que le réseau de capillaires est continu; il est donc sensible aux pénétrations des agents agressifs, dont l'eau est le principal véhicule. La circulation capillaire se produit de la même façon dans les fissures. Après une enquête, il apparut que l'augmentation de pourcentage de chlore existe dans l'eau stockée égale 914.681 mg/l, couplé (cas de dégradation de l'étanchéité) à une accumulation importante du chlorure émanant des eaux de gâchage utilisées dans le béton (le norme EN 1008:2002 a conseillé qu'il ne faut pas dépasser 1000mg/l), par ailleurs l'existence d'un pourcentage important d'humidité venant de stockage des eaux, et à des opérations

de remplissage / vidange de la cuve qui peuvent créer des cycles de mouillage / séchage journalière caractériser par une forte variation de température pendant le même jour. Enfin et lorsque les facteurs cités précédemment interviennent, les ions chlorures s'associent avec l'ion hydrogène de l'eau pour former de l'acide chlorhydrique. Cette réaction engendre une importante baisse de pH et la dépassivation des armatures créent finalement des fissurations et un éclatement du béton d'enrobage.

### **III-5-2.6. Méthodes de restauration**

- Contacter l'autorité de contrôle hydraulique (CTH) pour réaliser l'étude nécessaire.
- Recyclez les tuyaux pour éviter d'endommager les éléments structurels.

### **III-5-2.7. Nature des travaux de confortement**

- Réfection de la coupole inférieure de la cuve.
- Réfection du revêtement d'étanchéité à l'intérieur de la cuve
- Réparation des fissures sur poteaux.
- Réfection des murs voiles.
- Réfection de la plate forme.

### **III-5-2.8. Traitement des armatures corrodées**

Tous les aciers doivent être traités et passivés sur la longueur totale des aciers corrodés et une zone de sécurité de 50 cm de part et d'autre, avec :

- piquage du béton par burinage jusqu'à atteindre le béton sain.
- Mettre les armatures à nu en les dégageant d'au moins 2 cm tout autour .

- Débarrasser les barres d'armatures de toutes les traces de rouille par sablage .
- Rinçage et nettoyage par sablage de toute la surface du béton .
- Les barres non exposées aux jets de sables doivent être nettoyées à l'aide d'une brosse métallique .
- Traitement des armatures corrodées par un produit anticorrosion (Sika Monotop 610AC)

### III-5-2.9. Reconstitution du béton

Il existe principalement 2 techniques de reconstitution du béton : mise en place d'un mortier prêt à l'emploi, soit de manière traditionnelle à la taloche, soit par projection. La méthode par projection est réservée aux surfaces planes importantes, on utilisera donc la technique traditionnelle.

Il est conseillé que Le SIKA MONOTOP 610 AC doit toujours être recouvert d'un mortier de réparation de la gamme des SIKA MONOTOP, après un délai minimum de 3 heures à 20°C.

Le choix de mortier de réparation est résumé dans le tableau suivant :

| Produits           | Epaisseur d'application | Température d'utilisation | DPU à 20°C  | Catégorie norme NF            |
|--------------------|-------------------------|---------------------------|-------------|-------------------------------|
| SIKA MONOTOP 650   | 4 à 50 mm               | + 5°C à + 30°C            | 30 à 45 min | Classe 2 sur surface rugueuse |
| SIKA MONOTOP 612F  | 3 à 60 mm               | + 5°C à + 30°C            | 20 à 25 min | Classe 2 sur surface rugueuse |
| SIKA MONOTOP 615EG | 3 à 80 mm               | + 5°C à + 30°C            | 15 à 20 min | Classe 1 sur surface rugueuse |

**Tableau (III.2) : PROCEDE SIKA, 2005**

#### III-5-2.9.1. Préparation des SIKA MONOTOP

Les SIKA MONOTOP sont gâchés à l'eau à consistance adaptée.<sup>[27]</sup>

[27] Archives de CTH SUD centre d'el' oued

A titre indicatif, la quantité d'eau de gâchage est d'environ :

- 0,6 litre pour 5 kg de SIKA MONOTOP 650.
- 0,75 litre pour 5 kg de SIKA MONOTOP 612 F.
- 0,9 litre pour 5 kg de SIKA MONOTOP 615 EG.

### **III-5-2.9.2.Mise en œuvre des SIKA MONOTOP**

-Humidifier le support à refus tout en évitant qu'il soit ruisselant pendant l'application.

-Les SIKA MONOTOP 650, 612 F et 615 EG s'appliquent à la taloche ou à la truelle, d'une façon traditionnelle.<sup>[28]</sup>

-La finition s'effectue à la taloche plastique, éponge ou polystyrène dès que le mortier commence à tirer.

### **III-5-2.10. Conditions atmosphériques**

Ces conditions ont une incidence très importante sur les propriétés finales des produits mis en œuvre.

- Si la température dépasse 25°C, tenir les emballages au frais.<sup>[29]</sup>
- Ne pas appliquer sur support gelé ou lorsqu'il y a des risques de gel dans les heures qui suivent l'application.
- En cas de pluie, arrêter les travaux non abrités et protéger le mortier frais.
- Après la fin de prise des SIKA MONOTOP, la pluie n'est plus néfaste : elle sert au contraire de produit de cure intermédiaire.

---

[28] Archives de CTH SUD centre d'el' oued

[29] Archives de CTH SUD centre d'el' oued

### **III-5-2.11. Mise en peinture (ou revêtement de protection)**

Les SIKA MONOTOP peuvent être recouverts par les peintures et revêtements de façade, tels que définis dans la norme NF P 84.403, en phase aqueuse, du type acrylique ou pliolite ou l'utilisation de revêtement de protection (SIKAGARD 680S) : revêtement méthacrylate coloré pour la protection des bétons contre les agressions atmosphériques.

### **III-5-2.12. Prévention**

L'application sur béton du SIKA FERROGARD 903 qui agit par imprégnation et diffusion, constitue un traitement préventif contre la corrosion des armatures non apparentes, tel que décrit dans l'annexe B de la norme ENV 1504-9.

Le SIKA FERROGARD 903 retarde l'apparition des phénomènes de corrosion et ralentit la vitesse des réactions de formation de la rouille.

### **III-5-2.13. Réfection du revêtement d'étanchéité à l'intérieur de la cuve du château**

Au cours du diagnostic il a été constaté que l'étanchéité existante avait une adhérence nulle au support et était détérioré. Il faut donc remplacer le revêtement dans son intégralité. Pour cela on enlève l'étanchéité existante par un décapage par jet ultra-haute pression ou hydrosablage ou sablage à sec. Le choix est laissé à l'entrepreneur. Il faut ensuite assécher le béton mis à nu.

Cette étape est indispensable afin de décharger les contre-pressions liées à l'eau enfermée dans le béton.

Une fois ces étapes terminées, l'entrepreneur devra alerter la maîtrise d'œuvre afin de faire le point sur l'état du béton qui était caché par le revêtement d'étanchéité. En effet, lors du diagnostic il n'a pas été possible d'effectuer de sondage destructif sur l'étanchéité puisque le château d'eau a du être remis en service à la fin du diagnostic.

On ne sait pas si le parement intérieur du béton de la cuve est affecté de désordres. Une fois les désordres réparés, s'il y en avait, on met en place la nouvelle étanchéité. Nous avons laissé le choix entre 2 systèmes d'étanchéité :

- Un système classique à base de résine armée .
- Une membrane d'étanchéité désolidarisée.

Dans ce stade nous proposons un système classique, tout d'abord on a humidifié la surface de la coupole avant la mise en œuvre

**Etapes d'exécution d'étanchéité : (Solution Sika). <sup>[30]</sup>**

1/- La pose d'une couche d'accrochage de 1cm d'un mélange de barbotine qui contient :

- 01 volume de sikalite .
- 01 volume d'eau .
- 01 brouette de sable 0/3mm .
- 01 sac de ciment (HTS).

2/- Une deuxième couche de finition de 1à 2cm de mortier qui contient :

- 01 volume de sikalite .
- 02 volume d'eau .
- 02 brouettes de sable 0/3mm .
- 01 sac de ciment (HTS).

---

[30] Archives de CTH SUD centre d'el' oued

Une autre proposition exige l'application d'une membrane d'étanchéité : gamme (SikaTrocral).

Enfin lorsque le nouveau système d'étanchéité sera en place, l'entrepreneur devra effectuer un test d'étanchéité par une mise en eau avant la remise en service de la cuve.

### **III-5-2.14. Réfection des fissures sur poteaux**

Nous constatons dans notre cas que les fissures peuvent provenir d'une mauvaise mise en œuvre des bétons

- Mauvais positionnement des aciers ...
- Mauvaise qualité des bétons employés ...
- Vibration trop importante du béton lors du coulage...
- Manque de cure du béton...
- Fluage et retrait gênés....

Pour réparer on propose deux solutions l'une à base de SIKA et l'autre à base de LANKOREP.

#### **✓ Solution SIKA**

Les fissures inertes seront traitées par injection avec le SIKADUR 52 INJECTION ou par calfeutrement avec les SIKA MONOTOP 612 F, 650 ou 615 EG.

#### **✓ Solution LANKOREP**

- Positionner les injecteurs sur l'axe de la fissure : la distance entre injecteurs doit être de 0,20 m à 1,00 m suivant la configuration de la fissure .

- Cacheter la fissure entre les injecteurs avec un produit à prise rapide 224 LANKOPLUG .

- Vérifier la bonne communication entre injecteurs et l'étanchéité du cachetage par l'injection d'eau propre .

- Injecter le 737 LANKOREP FISSURE avec un pot à pression (pression d'injection de l'ordre de 0,5 Mpa).

Commencer par le bas, lorsque le coulis ressort par un injecteur voisin de celui d'origine, procéder au cachetage de l'injecteur utilisé et passer au suivant jusqu'au remplissage de tous les injecteurs .

Mettre en place un récipient (capacité  $\pm 1$  litre) pour alimenter gravitairement la fissure et compenser le remplissage capillaire.

### **III-5-2.15. Réfection des murs voiles**

Nous avons préconisé dans ce cas la méthode de réparation suivante:

-Enlever le béton endommagé avec la mise à nu des aciers corrodés (au moins 2cm derrière l'armature) ;

-Enlever la rouille des aciers corrodés et nettoyer les surfaces dégagées à l'aide d'eau sous pression et d'air comprimé .

-Traiter ensuite les aciers nettoyés à l'aide d'un produit (Sika Monotop 610AC) ;

-La mise en place d'un revêtement de reprofilage à l'aide d'un seul type Sika Monotop (650/612F/615 EG) .

-La mise en place d'un revêtement de protection (SIKAGARD 680 S, SIKAGARD 550 W ELASTIC).

-La mise en place d'un revêtement préventif par imprégnation (SIKA FERROGARD 903).

### **III-5-2.16. Réfection de la plate forme**

La réfection du dallage sur terre plein s'effectuer suivants les étapes suivants :

-L'enlèvement du l'ancien dallage .

-La mise en place d'une couche de hérisson (graviers et cailloux) de 20 cm pour éviter le poinçonnement du film d'étanchéité .

-Disposer d'une couche de sable d'au moins 5 cm d'épaisseur .

-Les couches de hérisson et de sable doivent être soigneusement compactées .

-Disposer sur toute la surface un film polyane (ou griltex) d'une épaisseur de 200 microns minimum pour éviter les remontées d'eau par capillarité .

-Disposer d'une couche d'isolant à la périphérie du voile du château sur 1m environ .

-Disposer d'une couche d'isolant à la périphérie du voile du château sur 1m environ .

-Disposer d'un pare-vapeur (film polyéthylène) .

-Coulage d'une dalle en béton armé de 10 cm minimum .

### **III-6. Conclusion**

Ce travail présente les résultats du diagnostic et réparation réalisé sur château d'eau en béton armé. L'un des objectifs de cette étude était de déterminer les causes de dégradation de la cuve ainsi que les éléments structuraux (voile-poteau), Les résultats des investigations convergent vers une attaque chimique par les ions de chlorures (Cl-) qui se trouvent dans l'eau potable conservée et les eaux souterraines à cause de la remontée d'eau, de plus l'existence d'un taux d'acide carbonique dissous dans l'eau de la nappe phréatique, sont les deux agents agressifs qui incitent le béton a provoqué la corrosion des armatures, d'autre part n'oublions pas l'effet de sulfate qui gonfle le béton en contact avec le sol et perd la liaison entre les composantes de la matrice cimentaire. Pour le renforcement cité dans ce contexte on a utilisé des ciments à base de sika conformément à la norme européenne EN1504 (Selon l'autorité de contrôle technique hydraulique CTH EL OUED Agence).

## **Conclusions Générales**

L'objectif de ce travail de recherche consistait à étudier l'effet de la corrosion des armatures sur la durabilité des ouvrages en béton armé.

Nous avons tout d'abord effectué une étude bibliographique centrée sur la corrosion de l'acier due à la carbonatation par le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) de l'atmosphère et la présence d'ions chlore (Cl<sup>-</sup>) dans le béton, les techniques électrochimiques et les méthodes non destructives utilisées pour détecter et suivre l'évolution de l'état de corrosion des aciers dans le béton et qui sont discutées dans ce mémoire sont les suivantes : les appareils destinés pour mesurer l'enrobage des armatures, la méthodes magnétique, la méthode électromagnétique (radar), la méthode d'auscultation par thermographie infrarouge. Les méthodes nucléaires, les méthodes mécaniques (impact écho – la méthode par ultrason – l'émission acoustique), inspection visuelle, les méthodes électrochimiques (potentiel de corrosion - la résistivité électrique - résistance de polarisation).

L'étude bibliographique a montré que la corrosion de l'acier est la cause majeure de dégradation des ouvrages en béton armé et précontraint, surtout lorsque ces ouvrages sont exposés à un milieu marin ou aux sels de déverglaçage.

Elle a prouvé aussi que les méthodes de réparation et de maintenance telles que la réparation traditionnelle, revêtements d'imprégnations, inhibiteurs de corrosion, béton projeté et plus particulièrement les techniques électrochimiques représentent des moyens efficaces pour protéger l'acier des structures. Il est connu que la protection cathodique améliore la stabilité thermodynamique de l'acier dans le béton, même en présence des ions chlore. Mais elle peut provoquer, comme les autres méthodes électrochimiques de maintenance, des effets secondaires négatifs tels que la fragilisation des aciers par hydrogène, l'endommagement de l'interface acier-béton, la solvatation de la pâte de ciment, initiation ou accélération la

réaction alcali-silice. De plus des mesures préventives sont proposées ici et qui a pour but d'empêcher ou retarder la corrosion des armatures telles qu'armatures résistantes à la corrosion (en acier inoxydable /acier microcomposite), Revêtement des armatures, la prévention cathodique, diminution de la perméabilité ou la diffusivité du béton enfin nous avons pu présenter une démarche à suivre pour réhabiliter efficacement un ouvrage dont les armatures sont corrodées.

Notre étude comporte deux parties, la première partie concerne les facteurs qui influent sur la durabilité vis à vis de la corrosion, on aborde d'une façon détaillé par ordre différentielle la qualité et les propriétés de la composition du béton, les conditions climatiques et environnementales et les conditions de mise en place du béton.

La deuxième partie traite, un réservoir (château) d'eau à El Oued Commune Oued El Alanda, nos ouvrages ont subi des détériorations pendant quelques années, notre investigation a assuré que l'agressivité du milieu qui est riche en agents agressifs notamment le chlore et le sulfate devient la première cause de gonflement et d'éclatement du béton d'enrobage et ainsi la dépasseivation des armatures.

Notre démarche se déroule suivant les étapes ci-après :

- Une description détaillée de l'ouvrage dégradé .
- Collection des désordres constatés .
- Analyse détaillée des désordres constatés .
- Causes des dégradations.
- Mécanisme de dégradation par le principal agent agressif .
- Solution technique de réparation et de prévention .

L'objectif principal visé par notre étude est de rechercher les origines de dégradations causées par la corrosion des armatures et leurs influences sur la durabilité des ouvrages en béton armé afin de les éviter plus tard, ainsi que nous présentons des méthodes de réhabilitation appropriées pour chaque type d'ouvrage suivant les exigences de chacune d'elles.

Après avoir fait cette étude analytique, nous avons abouti aux conclusions suivantes :

Les principales causes de désordres des ouvrages corrodés dans la région de Sud Est d'Algérie (El Oued) se résument ci-dessous :

- L'agressivité du milieu environnant
- L'infiltration des eaux à travers la couche du béton d'enrobage ;
- La mauvaise qualité et la non proportionnalité des composantes du béton dans les plus part des cas ;
- La mauvaise mise en œuvre du béton ;
- L'Influence des conditions climatiques sur la qualité du béton surtout en été (la température atteint plus de 50 °C) ;
- Les Défauts de conception;
- Manque des opérations périodiques de surveillance et des travaux d'entretien.

Dans notre réparation nous avons abordé purement une réparation traditionnelle fondée sur l'utilisation de produit anti-corrosif, ainsi qu'une couche de réparation à base du béton armé ou d'un mortier à base de sika, sans oublier l'utilisation d'un revêtement pour protéger le béton contre toutes les agressions (norme NF P 84.403), l'emploi d'une couche préventive par imprégnation sur le béton est très indispensable pour les armatures non apparentes (Selon l'autorité de

contrôle technique hydraulique CTH EL OUED Agence).

Après cette étude analytique qui a dégagé de nouvelles interrogations concernant la corrosion des armatures dans le béton. Ces questions pourraient conduire à de nouvelles recherches sur la corrosion et son effet sur la durabilité des ouvrages en béton armé, on cite notamment :

- Influence du niveau d'endommagement des ouvrages en béton armé sur la propagation de la corrosion.
- Analyser la corrélation entre la fissuration, le niveau d'endommagement et le degré de corrosion.
- Etudier la thermodynamique de la formation des produits de corrosion en tenant compte de la présence des défauts et des fissures.
- Etude comparative entre quelques méthodes de diagnostic pour détecter et évaluer l'ampleur de la corrosion.
- Influence de concentration des agents agressifs dans le béton d'enrobage sur les symptômes d'endommagement.
- Effet des adjuvants à base de chlorure sur l'initiation de la corrosion.
- Efficacité des inhibiteurs de corrosion pour stabiliser les couches d'oxydes.
- Estimation d'une meilleure concentration d'un inhibiteur de corrosion au niveau de l'acier pour qu'elle soit efficace dans un ouvrage en béton armé.
- Etudier le comportement mécanique et / ou chimique du béton d'enrobage protégé cathodiquement dans les nouveaux ouvrages implantés dans un terrain agressif.
- Etudier le mécanisme de réapparition des cellules de corrosion dans des zones voisines des zones déjà réparées traditionnellement.

## Références bibliographiques

- Archives de CTH SUD centre d'el' oued
- Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II (2009) .
- THE THEORETICAL ANALYSIS OF GALVANIC CORROSION (Zn, Fe and Cu) UNDER ACTIVATION CONTROL (Baccalauréat en génie chimique 2004)
- THE THEORETICAL ANALYSIS OF GALVANIC CORROSION (Zn, Fe and Cu) UNDER ACTIVATION CONTROL (Baccalauréat en génie chimique 2004)
- The corrosion protection of embedded steel reinforcement in reinforced concrete structures using galvanic anodes, Proceedings of the 2nd international conference on concrete repair, rehabilitation and retrofitting
- Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures-( Mémoire Option : Structures \*Université de Université de Douala.2007\*)  
\*الحماية من التآكل لحديد التسليح المدمج في الهياكل الخرسانية المسلحة باستخدام الأنودات الجلفانية ، وقائع المؤتمر الدولي الثاني لإصلاح الخرسانة وإعادة التأهيل والتعديل\*
- A new arrangement of galvanic anodes for the repair of reinforced concrete structures (Dépôt institutionnel de l'Université de Loughborough).
- Durabilité des ouvrages en béton ( Le journal mensuel).
- PATHOLOGIE DE STRUCTURES EN BÉTON ARMÉ è-( Mémoire Option : Structures \*Université de Larbi Tébessi 2016\*)
- Effect of Environmental Factors on Building-( Mémoire Option : Génie civil\*Université des sciences et technologies du Soudan 2015\*)
- Evaluation non destructive du gradient de teneur en eau dans les structures en béton armé par résistivité électrique-( Mémoire Option : Génie civil\*Université DE TOULOUSE 2016\*)

- CORROSION OF EPOXY COATED REBAR IN FLORIDA BRIDGES (Final Report to Florida D.O.T.WPI No. 0510603, State Job No. 99700-7556-010)
- Application La Méthode Ultrasonique Pour Le Calcul Previsionnel De La Résistance En Compression Béton Après Traitement Thermique-(ALGERIE EQUIPEMENT décembre 2012)
- [01].(p-04)Diagnostic des ouvrages en béton armé facteurs de vieillissement des ouvrages, Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, 1: 27-37.Taché, G., Vié, D. (1998).
- [02].(p-05)Diagnostic des ouvrages en béton armé facteurs de vieillissement des ouvrages, Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, 1: 27-37.Taché, G., Vié, D. (1998).
- [03].(p-011)Effect of Environmental Factors on Building-( Mémoire Option : Génie civil\*Université des sciences et technologies du Soudan 2015\*).
- [04].(p-011)Effect of Environmental Factors on Building-( Mémoire Option : Génie civil\*Université des sciences et technologies du Soudan 2015\*).
- [05].(p-15)Effect of Environmental Factors on Building-( Mémoire Option : Génie civil\*Université des sciences et technologies du Soudan 2015\*)
- [06].(p-016)Effect of Environmental Factors on Building-( Mémoire Option : Génie civil\*Université des sciences et technologies du Soudan 2015\*).
- [07]. (p-18)Paradis, F. (2009). Influence de la fissuration du béton sur la corrosion des armatures, Caractérisation des produits de corrosion formés dans le béton. Thèse de doctorat de l'Université Laval, 289p.
- [08]. (p-20)Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures-( Mémoire Option : Structures \*Université de Université de Douala.2007\*).
- [09]. (p-20)Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures-( Mémoire Option : Structures \*Université de Université de Douala.2007\*)

- [10]. (p-28) Andrade, C., Garcés, P., Martínez, I. (2008). Galvanic currents and corrosion rates of reinforcements measured in cells simulating different pitting areas caused by chloride attack in sodium hydroxide, *Corrosion Science* 50 (2008) 2959–2964.
- [10]. (p-28) Bänziger, H., Vogelsang, J., Schulze, G. (2008). The corrosion protection of embedded steel reinforcement in reinforced concrete structures using galvanic anodes, *Proceedings of the 2nd international conference on concrete repair, rehabilitation and retrofitting (ICCRRR)*, Cape Town, South Africa, November 24–26, 2008.
- [11]. (p-31) Evaluation non destructive du gradient de teneur en eau dans les structures en béton armé par résistivité électrique-( Mémoire Option : Génie civil\*Université DE TOULOUSE 2016\*)
- [12]. (p-32) Evaluation non destructive du gradient de teneur en eau dans les structures en béton armé par résistivité électrique-( Mémoire Option : Génie civil\*Université DE TOULOUSE 2016\*)
- [13]. (p-34) Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures-( Mémoire Option : Structures \*Université de Université de Douala.2007\*)
- [14]. (p-35) Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures-( Mémoire Option : Structures \*Université de Université de Douala.2007\*)
- [15]. (p-36) Evaluation non destructive du gradient de teneur en eau dans les structures en béton armé par résistivité électrique-( Mémoire Option : Génie civil\*Université DE TOULOUSE 2016\*)
- [16]. (p-37) Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures-( Mémoire Option : Structures \*Université de Université de Douala.2007\*)
- [17]. (p-38) Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures-( Mémoire Option : Structures \*Université de Université de Douala.2007\*)

- [18]. (p-45) Evaluation non destructive du gradient de teneur en eau dans les structures en béton armé par résistivité électrique-( Mémoire Option : Génie civil\*Université DE TOULOUSE 2016\*)
- [19]. (p-46) Evaluation non destructive du gradient de teneur en eau dans les structures en béton armé par résistivité électrique-( Mémoire Option : Génie civil\*Université DE TOULOUSE 2016\*)
- [20]. (p-47) Evaluation non destructive du gradient de teneur en eau dans les structures en béton armé par résistivité électrique-( Mémoire Option : Génie civil\*Université DE TOULOUSE 2016\*)
- [21]. (p-74) Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II, © 2009 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-46850-3. Alexander, M. G., Beushausen, H.-D., Dehn, F., Moyo, P. (2008).
- [22]. (p-83) Xu, J., Yao, W. (2009) .Current distribution in reinforced concrete cathodic protection system with conductive mortar overlay anode, Construction and Building Materials 23 (2009) 2220–2226.
- [23]. (p-84) Xu, J., Yao, W. (2009) .Current distribution in reinforced concrete cathodic protection system with conductive mortar overlay anode, Construction and Building Materials 23 (2009) 2220–2226
- [24]. (p-86) Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures-( Mémoire Option : Structures \*Université de Université de Douala.2007\*)
- (p-77) Andrade, C., Garcés, P., Martínez, I. (2008).Galvanic currents and corrosion rates of reinforcements measured in cells simulating different pitting areas caused by chloride attack in sodium hydroxide, Corrosion Science 50 (2008) 2959–2964.
- [25]. (p-105) Al hajjar, H. (2008). Applicabilité et efficacité d’une protection galvanique aux aciers de précontrainte, Thèse de doctorat de l’université de Toulouse, 228p. Juin 2008.

- [26]. (p-108) Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion, Documents scientifiques et techniques, (AFGC /CEFRACOR), 107p. Taché, G., et al. (2003).
- [27]. (p-121) Archives de CTH SUD centre d'el' oued
- [28]. (p-122) Archives de CTH SUD centre d'el' oued
- [29]. (p-122) Archives de CTH SUD centre d'el' oued
- [30]. (p-124) Archives de CTH SUD centre d'el' oued

## RESUMÉ

Dans le cadre de ce travail nous avons élaboré un état de lieu de quelques ouvrages corrodés dans la région d'El Oued (Sud Est de l'Algérie), cette étude est réalisée premièrement après une synthèse bibliographique qui porte essentiellement sur le phénomène de la corrosion dans les ouvrages en béton armé et son diagnostic, deuxièmement on a expliqué les méthodes de réparation et de prévention pour rendre l'ouvrage capable de fonctionner .

Où nos efforts ont été orientés vers une étude analytique qui comprenait un réservoir d'eau ( château d'eau) dans la ville d'EL-OUED Commune Oued El Alanda.

**Mots clés:** La corrosion, les effets de sol et eaux, milieu agressives, electrochemical réactions.

## ABSTRACT

As part of this work we have drawn up an inventory of some corroded structures in the region of El-Oued (South East of Algeria), this study is carried out first after a bibliographical synthesis which mainly relates to the phenomenon of corrosion in reinforced concrete structures and its diagnosis, secondly we explained the repair and prevention methods to make the structure capable of functioning.

Where our efforts were directed towards an analytical study which included a water reservoir (water tower) in the town of EL-OUED Commune Oued El Alenda.

**Key words:** Corrosion, soil and water effects, aggressive environment, Réactions électrochimiques.

## ملخص

في إطار هذا العمل قمنا بانجاز دراسة على منشئ تعرض للصدأ في منطقة الوادي ( جنوب شرقي الجزائر) . هذه الدراسة أنجزت أولا بعد بحث مكتبي انصب أساسا حول ظاهرة الصدأ في المنشآت الخرسانية المسلحة و تشخيصها ، وكذا قمنا بشرح طرق الإصلاح والوقاية من اجل إعادة المنشأ للاستغلال.

حيث تم توجيه جهودنا نحو دراسة تحليلية تضمنت خزان مياه (برج مياه) في بلدية واد العلنده بولاية الوادي .

**الكلمات المفتاحية:** الصدء ، تأثيرات التربة والماء، الأوساط العدوانية، التفاعلات الكهروكيميائية