

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Civil et Travaux Publics



Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention du diplôme de Master en  
Domaine : Sciences et technologies  
Filière : Génie civil  
Spécialité : structures  
Thème

**Prévention contre le phénomène de corrosion des  
armatures en acier dans le béton par l'utilisation des  
inhibiteurs**

**Présenté Par :**

- 1) Melle Horch Ahlem
- 2) Melle Henni Saida

**Devant le jury composé de :**

Mme Moussi Wahiba M C A UAT.B.B (Ain Temouchent) Président  
Mme Mouhamed BELHADJ Ahlem Houaria M C A UAT.B.B (Ain Temouchent ) Examineur  
Mme CHERIFI Wafa Nor El Houda M C B UAT.B.B (Ain Temouchent ) Encadrant

*Année Universitaire 2023/2024*

## Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu tout puissant qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier **Mme CHERIFI WAFAA NOUR EL HOUDA**, pour son encadrement, ses précieux conseils et son aide durant toute la période du travail.

ET n'oubliez pas de remercier l'équipe du laboratoire **M. KEDO ADELL, Mlle KAWTER** et **Mme NADJATE**, ainsi que notre professeur **M. KADOUR HAKIM**, pour leur soutien inestimable, leurs conseils précieux et leur engagement indéfectible dans notre croissance et notre réussite.

Nous expédions nos remerciements aigüés à tout le cadre professoral et administratif de la faculté de Technologie, département de Génie Civil et notre chef département **Mme MAAROUF** pour leurs soutiens et leurs savoirs et patience durant toutes ses années de notre formation.

Enfin nous adressons nos vifs remerciements à nos familles et à toute personne qui a participé de près ou de loin à l'exécution de ce modeste travail.

## Résumé

La corrosion des armatures en acier dans le béton est un problème critique qui affecte la durabilité des structures en béton armé. Pour prévenir ce phénomène, on utilise des inhibiteurs de corrosion. Ces substances chimiques peuvent être ajoutées au béton, appliquées sur sa surface, ou injectées dans des structures existantes. Les inhibiteurs agissent en formant des films protecteurs, en augmentant le pH autour de l'acier, ou en complexant les ions corrosifs. Il existe plusieurs types d'inhibiteurs : anodiques, cathodiques et mixtes. Bien qu'ils présentent des avantages tels que la facilité d'application et un coût relativement faible, leur efficacité à long terme et leur compatibilité avec les composants du béton nécessitent une attention particulière. Les inhibiteurs de corrosion sont une solution prometteuse pour prolonger la durée de vie des infrastructures en béton armé. Par conséquent, nous avons affecté plusieurs bancs d'essai à l'université de Ain t'émouchant avec d'appareil CANIN+ pour mesurer le potentiel de corrosion. Ces mesures sont réalisées sur des échantillons de béton ordinaire. Les résultats obtenus à partir de ces mesures révèlent une diminution de potentiel de corrosion pour en enrobage moins important 3.5 par rapport à 5 cm ainsi une augmentation du potentiel dans le milieu (3% NaCl dans le milieu environnements) par contre pour les milieux qui contient (3% NaCl + inhibiteur sur surface ou armature) on trouve des potentiels moins importantes, et pour le milieu de référence qui contient  $Ca(OH)_2$  et milieu de l'air on a remarquer que les potentiels donne des valeurs moins corrosif.

Mot clés : corrosion, NaCl, inhibiteurs, anodiques, cathodiques,  $Ca(OH)_2$ , béton armé, Canin+, Durabilité.

## **Abstract**

The corrosion of steel reinforcement in concrete is a critical issue affecting the durability of reinforced concrete structures. To prevent this phenomenon, corrosion inhibitors are used. These chemical substances can be added to the concrete, applied to its surface, or injected into existing structures. The inhibitors work by forming protective films, increasing the pH around the steel, or complexing with corrosive ions. There are several types of inhibitors: anodic, cathodic, and mixed. Although they offer advantages such as ease of application and relatively low cost, their long-term effectiveness and compatibility with concrete components require careful consideration. Corrosion inhibitors are a promising solution for extending the lifespan of reinforced concrete infrastructures. Therefore, we have allocated several test benches at the University of Ain Temouchent with CANIN+ devices to measure corrosion potential. These measurements are conducted on ordinary concrete samples. The results obtained from these measurements reveal a decrease in corrosion potential for a smaller cover (3.5 cm compared to 5 cm) and an increase in potential in environments with 3% NaCl. However, in environments containing 3% NaCl with an inhibitor applied on the surface or reinforcement, lower potentials were observed. For the reference environment containing  $\text{Ca(OH)}_2$  and air, the potentials indicated less corrosive values.

Keywords: corrosion, NaCl, inhibitors, anodic, cathodic,  $\text{Ca(OH)}_2$ , reinforced concrete, Canin+, durability

## ملخص

تُعد تآكل التسليح الفولاذي في الخرسانة مشكلةً حرجة تؤثر على متانة الهياكل الخرسانية المسلحة. لمنع هذه الظاهرة، تُستخدم مثبطات التآكل. يمكن إضافة هذه المواد الكيميائية إلى الخرسانة، أو تطبيقها على سطحها، أو حقنها في الهياكل الموجودة. تعمل المثبطات عن طريق تشكيل أفلام واقية، أو زيادة درجة الحموضة حول الفولاذ، أو معقدة الأيونات المسببة للتآكل. يوجد عدة أنواع من المثبطات: أنودية، كاثودية ومختلطة. على الرغم من أنها تقدم مزايا مثل سهولة التطبيق وتكلفة منخفضة نسبيًا، فإن فعاليتها طويلة الأمد وتوافقها مع مكونات الخرسانة تتطلب اهتمامًا خاصًا. تُعد مثبطات التآكل حلاً واعدًا لتمديد عمر البنى التحتية الخرسانية المسلحة. ولذلك، قمنا بتخصيص عدة مقاعد اختبار في جامعة عين تيموشنت لقياس إمكانات التآكل. تُجرى هذه القياسات على عينات من الخرسانة العادية. تكشف النتائج CANIN+ باستخدام جهاز التي تم الحصول عليها من هذه القياسات عن انخفاض في إمكانات التآكل لطبقة تغطية أقل (3.5 سم مقارنة بـ 5 سم) مع NaCl 3% ومع ذلك، في البيئات التي تحتوي على 3% NaCl، وفي البيئات التي تحتوي على 3% Ca(OH)<sub>2</sub> مثبت على السطح أو التسليح، لوحظت إمكانات أقل. وفي البيئة المرجعية التي تحتوي على الإمكانات تُظهر قيمًا أقل تأكلًا.

الكلمات الرئيسية : تآكل، NaCl، مثبطات، أنودية، كاثودية، Ca(OH)<sub>2</sub>، خرسانة مسلحة، Canin+، متانة.

## Tables des matières

Résumé.....	I
Abstract.....	II
Tables des matières.....	IV
Liste des Abréviations.....	IX
Liste des figures.....	XII
Liste des tableaux.....	XIV
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	XV
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA CORROSION ET METHODES DE DETECTIONS.....	3
1 Introduction.....	4
2 Définition de béton :.....	4
3 La durabilité de béton :.....	5
3.1 La carbonatation :.....	5
3.2 Le gel / dégel :.....	6
3.3 L'action de l'eau de mer :.....	7
3.4 La lixiviation :.....	7
3.5 L'alcali-réaction :.....	8
3.6 La réaction sulfatique interne :.....	9
3.7 L'action des chlorures :.....	9
3.8 La corrosion des armatures :.....	11
3.8.1 phénomène de la corrosion :.....	11
3.8.2 Définition de la corrosion des armatures :.....	12
3.8.3 Types de corrosion des métaux :.....	13
4 Méthodes d'évaluation de la corrosion :.....	15
4.1 Les Mesure Gravimétrique :.....	15
4.1.1 Définition :.....	15
4.1.2 Principe des mesures gravimétriques:.....	15
4.2 La méthode de polarisation potentiodynamique :.....	16
4.2.1 La volta métrie cyclique :.....	17
4.3 La Spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS) :.....	17
4.3.1 Principe :.....	18
4.4 Théorie de la densité fonctionnelle (DFT) :.....	19
4.4.1 Définition :.....	19
4.4.2 Principe :.....	19
4.5 Méthode d'évolution d'hydrogène :.....	20

4.5.1	Définition : .....	20
4.5.2	Objectif de la méthode : .....	20
4.6	Thermographie infrarouge : .....	21
4.7	Méthodes électromagnétiques : .....	22
4.8	Les Méthodes électrochimiques : .....	22
4.9	Canin+ : .....	24
4.9.1	Mesure de la résistivité : .....	24
4.9.2	Fonctions principales : .....	25
4.9.3	Applications : .....	25
4.9.4	Spécifications : .....	25
5	Conclusion : .....	26
<b>CHAPITRE II : LUTTE CONTRE LA CORROSION PAR L'UTILISATION DES INHIBITEURS</b>		<b>27</b>
1	Introduction : .....	28
2	Prévention par une forme adaptée des pièces : .....	28
3	Prévention par un choix judicieux des matériaux : .....	30
4	Protection par revêtements : .....	31
4.1	Protection par revêtements métalliques : .....	32
4.1.1	Procédés de fabrication de revêtements métalliques : .....	32
4.2	Revêtements non métalliques : .....	33
4.2.1	Revêtements inorganiques : .....	33
4.2.2	Revêtements organiques : .....	34
4.3	Choix du revêtement : .....	34
5	Protection électrochimique : .....	34
5.1	Définition : .....	34
5.2	Champs d'application de la protection cathodique : .....	34
5.3	Types de protection cathodique : .....	35
5.4	Protection anodique : .....	39
6	Protection par inhibiteurs : .....	39
6.1	Définition des inhibiteurs : .....	39
6.1.1	Par domaine d'application : .....	40
6.1.2	Par électrochimie réaction partielle : .....	40
6.1.2.1	Les inhibiteurs anodiques : .....	40
6.1.2.2	Les inhibiteurs cathodiques : .....	40
6.1.2.3	Les inhibiteurs mixtes : .....	41
6.1.3	Par Mécanisme Réactionnel : .....	41
6.1.3.1	Inhibition par adsorption et passivation : .....	41

6.1.3.2	Inhibition par précipitation d'un film : .....	42
6.1.3.3	Inhibition par élimination de l'agent corrosif : .....	42
6.2	Propriétés : .....	42
6.2.1	Abaissement de la vitesse de corrosion : .....	42
6.2.2	Conservation des caractéristiques physico-chimiques : .....	42
6.2.3	Stabilité : .....	42
6.2.4	Compatibilité avec le milieu : .....	42
6.2.5	Stabilité thermique : .....	42
6.2.6	Efficacité à faible concentration : .....	42
6.3	Mode d'action des inhibiteurs de corrosion : .....	43
6.3.1	Interposition d'une barrière : .....	43
6.3.2	Renforcement d'une barrière préexistante : .....	43
6.3.3	Formation d'une barrière par interaction chimique : .....	43
6.3.4	Stabilisation des films d'oxyde : .....	43
6.3.5	Participation aux réactions d'électrode : .....	43
6.4	Nature des inhibiteurs : .....	43
6.4.1	Inhibiteurs organiques : .....	43
6.4.2	Les inhibiteurs minéraux : .....	44
6.4.3	Choix d'un inhibiteur : .....	44
6.5	Inhibiteurs utilisés pour le béton armé (état de l'art) : .....	44
6.5.1	Les nitrites : .....	45
6.5.2	Monofluorophosphate (MFP) : .....	45
6.5.2.1	Comment fonctionne l'inhibiteur MFP : .....	45
6.5.3	Les inhibiteurs organiques : .....	45
6.5.4	Les inhibiteurs verts : .....	47
7	Conclusion : .....	50
CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE ET INTERPRETATION DES RESULTATS .....		51
1	Introduction.....	52
2	Les composants de béton utilisé : .....	52
2.1	Type des granulats : .....	52
2.2	Les essais concernant les granulats : .....	52
2.2.1	Analyse granulométrique des granulats : .....	52
2.2.2	Module de finesse NF EN 12620 : .....	52
2.2.3	Masse volumique : .....	55
2.2.3.1	Masse volumique apparente ( $\rho_{app}$ ) : .....	55
2.2.3.2	Masse volumique absolue ( $\rho_{abs}$ ) : .....	56



2.2.4	Essais d'équivalent de sable NA455 (NF P 18-589) :	57
2.3	Ciment :	57
2.3.1	Domaines d'utilisation :	58
2.3.2	La masse volumique de ciment :	58
2.4	Eau :	59
2.5	Acier :	59
3	La formulation du béton ordinaire :	59
3.1	Résistance moyenne à 28 jours :	59
3.2	Rapport C/E :	60
1.1.1	Détermination de G :	60
3.3	Dosage en ciment :	60
3.4	Calcul de E :	60
1.1.2	Correction sur E :	61
3.5	Optimisation du squelette granulaire :	61
3.5.1	Validation du sable :	61
3.6	Calcul de YA :	61
3.7	Calcul XA :	62
3.8	Pourcentage de sable et de gravier :	63
3.9	Coefficient de compacité g :	63
3.10	Volume absolu des constituants :	64
1.1.3	Volume absolu du ciment :	64
1.1.4	Volume absolu des granulats V (sable +gravier) :	64
3.10.1	Volume absolu du sable ( $V_1=V\%$ ) :	64
3.10.2	Volume absolu du gravier ( $V_2=V\%$ ) :	64
3.11	Dosage des différents constituants pour 1 <b>m<sup>3</sup></b> de béton :	64
3.12	Essai d'affaissement au cône d'Abrams :	65
4	Préparation des échantillons :	65
4.1	Première étape :	65
4.2	Deuxième étape :	66
4.3	Les milieux utiliser :	67
4.4	Inhibiteur :	68
4.5	Interprétation des résultats :	69
4.5.1	Influence du milieu :	69
4.5.2	Influence d'enrobage :	70
	CONCLUSION GENERALE	74
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	77

ANNEXES .....	81
Annexe A .....	82
Annexe B.....	83
Annexe C.....	85

## Liste des Abréviations

### Symboles Romains

A	Affinité électronique
A	Aire
D	Densité de l'acier
E	Potentiel
E <sub>corr</sub>	Potentiel de corrosion
EI ou E <sub>I<sub>Rct</sub></sub> ou ELG	Efficacité inhibitrice
I	Courant stationnaire
I	Potentiel d'ionisation
I <sub>0</sub>	Densités de courant de corrosion en absence de l'inhibiteur
I <sub>corr</sub>	Densité du courant de corrosion
I <sub>inhibiteur</sub>	Densité de courant de corrosion en présence d'inhibiteur
R <sub>ct0</sub>	Résistance de transfert de charge en absence d'inhibiteurs
R <sub>ct</sub>	Résistance de transfert de charge en présence d'inhibiteurs
R <sub>p</sub>	Résistance de polarisation
S	Surface de l'acier exposée
V <sub>0</sub>	Vitesse de corrosion en absence d'inhibiteur
V <sub>inhibiteur</sub>	Vitesse de corrosion en présence d'inhibiteur
W	Perte de masse
Z(ω)	Impédance
ΔE	Energie de gap
ΔI	Courant sinusoïdal
ΔM ou V <sub>corr</sub>	Vitesse de corrosion
ΔN	Nombre d'électrons transférés

$Fe^{2+}$	Les ions ferreux
$Fe^{3+}$	Ions ferrique
M	Milieu
$M_{Fe}$	La masse atomique du fer
$n_{Fe}$	La valence des ions ferreux
$OH^-$	Les ions hydroxydes
t	La période d'exposition
$t_i$	Une composante de la sortie souhaitée T
$t_{ini}$	le temps d'initiation à la corrosion
V	La différence de potentiel
x	L'épaisseur de l'enrobage de béton
E (%)	L'efficacité inhibitrice
T	Température
$\theta$	Taux de recouvrement de l'inhibiteur sur les sites de corrosion
$Cl^-$	Les ions chlorure
$SO_4^{2-}$	Les ions de soufre
$CO_2$	Le dioxyde de carbone

### **Symboles Grecs**

$\beta$	L'indice de fiabilité
$\gamma$	Le coefficient d'inhibition
$\Delta E$	Différence de potentiel
$\Delta i$	Valeurs des courants enregistrés dans OCP
$\rho_{Fe}$	La masse volumique du fer
$\tau \%$	Le taux d'inhibition
$\phi$	La loi de distribution de Gauss de moyenne nulle et d'écart-type unitaire
$\omega$	Pulsation
$\Phi$	déphasage du courant alternatif par rapport au potentiel
$\chi$	Electronégativité absolue

$\chi_{fe}$  Electronégativité absolue du fer  
 $\chi_{inhibiteur}$  Electronégativité absolue de la molécule inhibitrice  
 $\mu$  Moment dipolaire  
 $\eta_{fe}$  Duretés globales du fer  
 $\eta_{inhibiteur}$  Duretés globales de la molécule inhibitrice

## Liste des figures

### Chapitre I :

Figure 1. 1 <i>Constituants d'un béton</i> [3] .....	4
Figure 1. 2 <i>Carbonatation de béton</i> [8] .....	6
Figure 1. 3 <b>Le gel et dégel d'une terrasse</b> [16] .....	6
Figure 1. 4 <i>Dégradation du béton dans un site maritime</i> [11] .....	7
Figure 1. 5 <i>La lixiviation d'un mur en béton</i> [13].....	8
Figure 1. 6 <i>L'alcali réaction sur un béton</i> [8] .....	8
Figure 1. 7 <i>La réaction sulfatique interne dans les bétons</i> [14] .....	9
Figure 1. 8 <i>Action des chlorures sur le béton</i> [9] .....	11
Figure 1. 9 <i>Effets de la corrosion sur le comportement mécanique de structures corrodées</i> [18] .....	12
Figure 1. 10 <i>La corrosion des armatures</i> [7] .....	12
Figure 1. 11 <i>Mécanisme de corrosion de l'acier dans le béton</i> [19] .....	13
Figure 1. 12 <i>Différents types de corrosion</i> [20].....	14
Figure 1. 13 <i>Tracé des courbes de polarisation (droite de Tafel)</i> [21].....	17
Figure 1. 14 <i>Schéma d'une expérience de voltamétrie cyclique</i> [22].....	17
Figure 1. 15 <i>Illustration schématique du montage pour la mesure du volume d'hydrogène dégagé</i> [21].....	21
Figure 1. 16 <i>Caméra infrarouge</i> [23].....	22
Figure 1. 17 <i>Radar à pénétration de sol (GPR)</i> [23] .....	22
Figure 1. 18 <i>Organigramme décrivant les mesures électrochimiques</i> [21].....	23
Figure 1. 19 <i>Schéma d'une cellule électrochimique</i> [21].....	23
Figure 1. 20 <i>Schéma représentatif de la chaîne électrochimique de mesure utilisé Au laboratoire</i> [21] .....	24
Figure 1. 21 <i>Exemple de matériel commercialisé pour la cartographie de la résistivité de type Wenner (IFSTTAR)</i> [23].....	25
Figure 1. 22 <i>Analyse de la corrosion par CANIN+</i> [21].....	26

### Chapitre II :

Figure 2. 1 <i>Les types de vidange du réacteur chimique</i> [2].....	29
Figure 2. 2 <i>Diminution du risque de corrosion d'un coude. Risque plus élevé pour (a) que pour (b)</i> [2] .....	29
Figure 2. 3 <i>Diminution du risque de corrosion sous contrainte d'un boulon, contrainte locale élevée (a) et contrainte locale peu élevée (b)</i> [2] .....	30
Figure 2. 4 <i>Différents types de raccords isolants</i> [2].....	30
Figure 2. 5 <i>Corrosion en présence de revêtements métalliques plus nobles (a), et moins nobles (b) que le substrat</i> [3].....	32
Figure 2. 6 <i>Principes de la protection par anode sacrificielle</i> [2].....	35
Figure 2. 7 <i>Protection cathodique par anode sacrificielle : (a) d'un échangeur de chaleur ; (b) réservoir d'eau ; (c) canalisation enterrée ; (d) bateau</i> [2] .....	36
Figure 2. 8 <i>Principe de la protection par courant imposé</i> [2].....	38
Figure 2. 9 <i>Principe de protection anodique</i> [2] .....	39
Figure 2. 10 <i>Classements d'inhibiteur de corrosion</i> [4] .....	40
Figure 2. 11 <i>Diagramme d'Evans montrant le déplacement du potentielle de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur anodique, cathodique ou mixte</i> [4].....	41

### Chapitre III :

Figure 3. 1 <i>Type des granulats (sec) utilisé (photo prise par les auteurs)</i> .....	52
Figure 3. 2 <i>Tamiseuse d'analyse granulométrique (photo prise par les auteurs)</i> .....	53
Figure 3. 3 <i>Analyse granulométrique de gravier (3/8)</i> .....	53
Figure 3. 4 <i>Analyse granulométrique de sable corrigé</i> .....	55
Figure 3. 5 <i>Analyse granulométrique de gravier (8/16)</i> .....	55
Figure 3. 6 <i>Essai de la masse volumique apparente (photo prise par les auteurs)</i> .....	56
Figure 3. 7 <i>L'essai de la masse volumique absolue (photo prise par les auteurs)</i> .....	57
Figure 3. 8 <i>Fiche technique de ciment GICA CEM II /A-L 42.5 N</i> .....	58
Figure 3. 9 <i>NETTOYAGE DES ACIERS (PRISE PAR LES AUTEURS)</i> .....	59
Figure 3. 10 <i>GRAPHE POUR TROUVER LE DOSAGE DU CIMENT</i> .....	60
Figure 3. 11 <i>Courbes granulométriques selon Dreux Gorisse</i> .....	63
Figure 3. 12 <i>ESSAI D'AFFAISSEMENT DE CONE D'ABRAMES</i> .....	65
Figure 3. 13 <i>LES MATERIAUX UTILISES PRISE PAR LES AUTEURS</i> .....	66
Figure 3. 14 <i>Démoulage DES EPROUVETTES PRISE PAR LES AUTEURS</i> .....	66
Figure 3. 15 <i>SCHEMA D'UNE EPROUVETTE CYLINDRIQUE EN BETON ARME</i> .....	67
Figure 3. 16 <i>Différent type des milieux utiliser pour les éprouvettes (photo prise par les auteurs)</i> .....	67
Figure 3. 17 <i>Inhibiteur utilisé (photo prise par les auteurs)</i> .....	68
Figure 3. 18 <i>Suivi du potentiel des éprouvettes <math>e = 3.5\text{cm}</math> pour béton ordinaire dans les cinq milieux</i> .....	69
Figure 3. 19 <i>Suivi du potentiel des éprouvettes <math>e = 5\text{cm}</math> pour béton ordinaire dans les cinq milieux</i> ....	70
Figure 3. 20 <i>Suivi du potentiel des éprouvettes <math>e=3.5\text{cm}</math> et <math>e=5\text{cm}</math> pour béton ordinaire dans milieu 1</i> .....	71
Figure 3. 21 <i>Suivi du potentiel des éprouvettes <math>e=3.5\text{cm}</math> et <math>e=5\text{cm}</math> pour béton ordinaire dans milieu 2</i> .....	71
Figure 3. 22 <i>Suivi du potentiel des éprouvettes <math>e=3.5\text{cm}</math> et <math>e=5\text{cm}</math> pour béton ordinaire dans milieu 3</i> .....	72
Figure 3. 23 <i>Suivi du potentiel des éprouvettes <math>e=3.5\text{cm}</math> et <math>e=5\text{cm}</math> pour béton ordinaire dans milieu 4</i> .....	72
Figure 3. 24 <i>Suivi du potentiel des éprouvettes <math>e=3.5\text{cm}</math> et <math>e=5\text{cm}</math> pour béton ordinaire dans milieu 5</i> .....	73

## Liste des tableaux

### Chapitre III :

Tableau 3. 1 Résultats de l'analyse granulométrique de gravier (3/8).....	53
Tableau 3. 2 Résultats de l'analyse granulométrique de sable (0/4) .....	54
Tableau 3. 3 Résultats de l'analyse granulométrique de sable (0/4) corrigé .....	54
Tableau 3. 4 Résultats de l'analyse granulométrique de gravier (8/16) .....	55
Tableau 3. 5 Résultats de masse volumique apparente des granulats utilisés .....	56
Tableau 3. 6 Résultats de masse volumique absolue des granulats utilisé .....	56
Tableau 3. 7 LA MASSE VOLUMIQUE ABSOLU DU CIMENT .....	58
Tableau 3. 8 Détermination de G.....	60
Tableau 3. 9 Correction sur E .....	61
Tableau 3. 10 EVALUATION DE L'OUVRABILITE PAR RAPPORT A L'AFFAISSEMENT AU cône d'Abrams .....	63
Tableau 3. 11 TABLEAUX POUR DETERMINER LA COEFFICIENT DE COMPACITE.....	64
Tableau 3. 12 LES RESULTATS DE ESSAI D'AFFAISSEMENT .....	65



# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

La corrosion des armatures dans le béton est la principale source de dégradation des structures réalisées dans les milieux marins ou les milieux humides, tout en réduisant leur durée de vie et rendant leur maintenance plus coûteuse.

Avant l'activité agressive des ions chlorures et la carbonatation qui abaisse la valeur du pH, l'acier est encore protégé par passivation due à un pH basique du béton ( $\text{pH} > 12,5$ ), et la vitesse de corrosion à cette étape est considérée comme négligeable. Lorsque l'interface acier/béton devient riche en ions chlorures (atteignant un seuil critique), l'alcalinité du béton autour de l'acier est réduite, détruisant ainsi la passivation de l'acier, entraînant une corrosion accélérée et l'éclatement de l'enrobage du béton.

En raison de l'importance des dommages causés par la corrosion, plusieurs solutions peuvent être utilisées pour protéger l'armature de la corrosion : la protection par revêtements, la protection électrochimique ou l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion...etc. Ce dernier reste le mode de protection le plus couramment employé car il est simple d'utilisation et apporte de bons moyens de protection qui s'avèrent moins coûteuses.

D'une manière générale, les inhibiteurs peuvent être divisés en deux catégories : inorganiques ou organiques. De nombreux inhibiteurs contenant du nitrite et du chromate ont montré des résultats très intéressants pour empêcher la corrosion des barres d'acier ; Cependant, leur utilisation est limitée dans de nombreux pays en raison de leur toxicité pour la santé humaine et l'environnement ; par conséquent, l'utilisation de l'inhibiteur est conditionnée par certains paramètres, tels que la non toxicité, l'efficacité inhibitrice élevée, l'adhérence du film protecteur...etc.

Ce mémoire de fin d'étude traite les modes d'applications des inhibiteurs de corrosion, il est structuré en trois chapitres :

- Chapitre I : GENERALITES SUR LA CORROSION ET METHODES DE DETECTIONS
- Chapitre II : LUTTE CONTRE LA CORROSION PAR L'UTILISATION DES INHIBITEURS
- Chapitre III : : PARTIE EXPERIMENTALE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Notre mémoire est clôturé par une conclusion générale et des perspectives d'étude.

**CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA CORROSION  
ET METHODES DE DETECTIONS**

## 1 Introduction

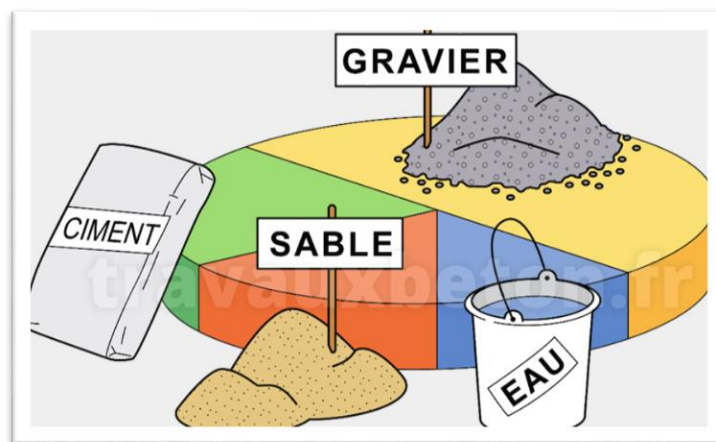
Les ouvrages de génie civil, les bâtiments, les ouvrages d'art et les réseaux sont conçus pour remplir un certain nombre de fonctions. Le but de la conception, du dimensionnement et de l'exécution est d'obtenir un taux de probabilité acceptable entre l'utilisation exigée de la structure, sa durée de vie et son coût. Ces objectifs se traduisent en termes d'exigences, que l'on peut simplifier en exigences de résistance mécanique et de stabilité, exigences de comportement approprié en service et exigences de durabilité.

La satisfaction de ces exigences doit être envisagée de manière dynamique, le maître d'ouvrage souhaite que les fonctions soient assurées non seulement aujourd'hui, mais aussi demain. Ainsi, tout indice laissant penser que ce ne sera pas le cas doit être pris en compte pour adapter la stratégie de gestion de l'ouvrage et éventuellement commander des travaux de rénovation ou de remise en état.

Face à un patrimoine vieillissant, les préoccupations concernant la durabilité et la sécurité sont de plus en plus présentes chaque jour, que ce soit pour garantir le vieillissement correct des ouvrages existants, réduire les effets d'un vieillissement prématuré ou prolonger la durée de vie fonctionnelle d'un ouvrage au-delà de celle initialement prévue. À cela s'ajoutent les éventuelles modifications des ouvrages pour améliorer leur niveau de service. Prédire la durée de vie résiduelle d'un ouvrage donné n'est pas chose facile : cela dépend de l'état de santé actuel (souvent difficile à cerner) et de la cinématique de vieillissement, qui elle-même dépend des caractéristiques du matériau et des agressions futures. Évaluer les propriétés matérielles et géométriques de l'ouvrage est donc une étape indispensable à la prédiction de sa durée de vie. [1]

## 2 Définition de béton :

Le béton est un matériau composite formé de liant (ciment), de granulats (gravier, sable), de l'eau et éventuellement des ajouts. L'eau dans le béton existe sous diverses formes. Elle joue un double rôle d'hydratation et d'ouvrabilité du mélange. Elle se présente sous forme d'eau libre (ou capillaire) d'eau adsorbée, d'eau chimiquement liée. Du fait de son hétérogénéité, il est nécessaire de comprendre le rôle de chacun des composants du béton dans la phase de montée et /ou de baisse en température. Lorsque le béton est exposé à une température élevée, il subit diverses transformations physico-chimiques. [2]



**Figure 1. 1** Constituants d'un béton [3]

### 3 La durabilité de béton :

La durabilité d'un béton est de pouvoir conserver sa résistance et de continuer de remplir sa fonction tout au long de sa durée de vie utile pas à une durée indéfinie, il en résulte que le béton doit résister aux mécanismes de dégradation aux quels il peut être exposé, tels que les cycles de gel-dégel et certaines formes d'attaques chimiques.

La mauvaise durabilité se manifeste par une détérioration qui peut résulter de facteurs externes ou de phénomènes internes du béton, les actions peuvent être mécaniques, physiques ou chimiques, Ces dernières sont causées par les réactions alcali-silice et alcali-carbonate, les attaques chimiques externes sont causées par la présence d'ions agressifs tels que les chlorures, les sulfates et les gaz carboniques ainsi que de nombreux gaz et liquides d'origines naturelles ou industrielles. Il convient de noter avant toutes choses que la détérioration du béton est rarement attribuable à une seule cause: le béton peut souvent se comporter de façon satisfaisante en dépit de certaines déficiences, mais lorsqu'un facteur défavorable s'ajoute, les désordres apprêteront. [4]

Nous rappelons ci-dessous les phénomènes qui nuisent à la durabilité du béton :

- **La carbonatation**
- **Le gel / dégel**
- **L'action de l'eau de mer**
- **La lixiviation**
- **L'alcali-réaction**
- **La réaction sulfatique interne**
- **L'action des chlorures**
- **La corrosion des armatures (Notre cas d'étude) [5]**

#### 3.1 La carbonatation :

Réaction chimique due à la combinaison de la chaux libre du béton avec le gaz carbonique de l'air. La carbonatation d'un béton est un phénomène habituel sur ce type de matériau de construction. Le dioxyde de carbone qui est présent dans l'atmosphère va finir par pénétrer à l'intérieur même de la porosité du béton.

Le dioxyde de carbone va alors pouvoir dégrader le béton à cause de l'hydratation naturelle du ciment. La carbonatation est responsable de la modification progressive de la microstructure interne du béton. Elle peut très facilement dégrader un béton armé au fil des années. Il arrive même que l'armature en fer soit complètement mise à nue par cette dégradation.

La carbonatation va entraîner un problème de tenue d'une structure en béton armé dans la durée. Le ferrailage qui garantit la résistance de l'ensemble finit par gonfler sous l'influence de la rouille. La corrosion parvient à faire éclater le béton qui doit subir le retrait qui est la conséquence directe de la carbonatation. L'acier est alors mis à nu jusqu'à sa destruction inéluctable par la rouille. [6]

Il se traduit selon une réaction produisant du carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  :

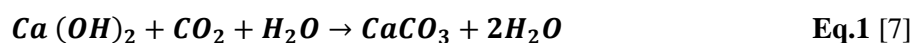




Figure 1. 2 *Carbonatation de béton* [8]

### 3.2 Le gel / dégel :

La répétition des cycles de gel-dégel peut entraîner des fissurations dans la masse des bétons de mauvaise qualité, et surtout l'application de sels fondants provoque à terme une détérioration des surfaces (écaillage). Ces agressions traduisent différents types de phénomènes :

- Effets thermiques,
- Redistribution de l'eau dans la porosité,
- Apparition et propagation de fissures,
- Modification de la microstructure,
- Modification de l'interface entre la pâte et le granulat. [9]



Figure 1. 3 *Le gel et dégel d'une terrasse* [10]

### 3.3 L'action de l'eau de mer :

Un béton exposé en site maritime peut être sujet à plusieurs types d'agressions :

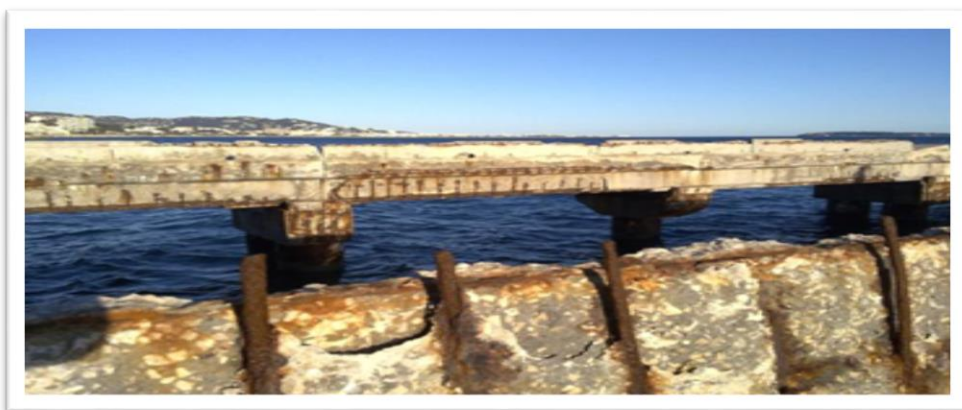
- a) Agressions mécaniques résultant de l'action des vagues et des marées, comprenant l'abrasion causée par les chocs des matériaux flottants et l'érosion due aux effets des vagues.
- b) Agressions chimiques résultant de la présence de chlorures dans l'eau de mer et de sulfates.
- c) Agressions climatiques résultant des variations de température et éventuellement des phénomènes de gel-dégel.

Variations du niveau de la mer, elles peuvent être :

- a) Continuellement immergées (béton situé sous le niveau de la mer à marée basse). Les bétons dans cette zone sont rarement sujets à des dégradations importantes.
- b) Continuellement émergées et exposées aux embruns et brouillards marins contenant des chlorures. Les bétons dans cette zone peuvent subir de légères agressions.
- c) Alternativement émergées ou immergées en fonction du niveau de la mer (zones de marnage déterminées par les niveaux de marée haute et basse) ou exposées aux éclaboussures provoquées par les vagues. Les bétons dans cette zone sont les plus agressés.

Indépendamment de leurs caractéristiques propres, la résistance des bétons varie donc en fonction du type d'exposition au milieu marin et du degré d'immersion.

Le béton en présence d'eau de mer est soumis à plusieurs réactions chimiques impliquant des sulfates, des chlorures et des ions magnésium selon plusieurs mécanismes (cristallisation de sels expansifs, précipitation de composés insolubles, attaques ioniques, dissolution de la portlandite, etc.). [11]



**Figure 1. 4** *Dégradation du béton dans un site maritime* [12]

### 3.4 La lixiviation :

Le phénomène de lixiviation des bétons correspond dans les grandes lignes à un lessivage des hydrates de la pâte de ciment au contact de milieux fluides. Les constituants hydratés de la pâte de ciment des bétons forment un milieu basique, le pH de leur solution interstitielle étant de l'ordre de 13.



Dans ces conditions, la majorité des milieux fluides présente un caractère acide vis-à-vis du béton, entraînant ainsi des déséquilibres chimiques susceptibles d'aboutir notamment à une mise en solution des hydrates.

Les milieux, naturels ou pas, pouvant conduire à des phénomènes de lixiviation correspondent aux eaux pures, aux eaux douces, aux pluies acides, et aux milieux plus franchement acides (acides minéraux et organiques, eaux résiduaires).

Le pouvoir lixiviant d'un milieu est proportionnel à son acidité vis-à-vis du béton. Les recherches conduites sur ce sujet au cours des deux dernières décennies concernaient essentiellement la durabilité des bétons constitutifs des conteneurs de déchets radioactifs pouvant, au cours de leur histoire, être soumis au ruissellement des eaux de pluie et d'infiltration. [13]



**Figure 1. 5** *La lixiviation d'un mur en béton [14]*

### **3.5 L'alcali-réaction :**

Une réaction alcali-agrégats est une réaction chimique qui se produit dans les bétons entre les composés du ciment, la silice des granulats et les alcalins présents dans la pâte de ciment. Cela entraîne des gonflements préjudiciables à la résistance des bétons. Il est donc essentiel de prévoir et de détecter cette réaction pour éviter le faïençage ou l'éclatement. Si la principale réaction alcali-agrégats est de type alcali-silice, il existe également des réactions alcali-carbonate et alcali-silicate. [8]



**Figure 1. 6** *L'alcali réaction sur un béton [8]*



### 3.6 La réaction sulfatique interne :

La Réaction Sulfatique Interne (RSI) est déclenchée et se développe sous l'effet de plusieurs paramètres : la présence d'eau, une température élevée du béton à un âge précoce, la durée de maintien de cette température initiale élevée, ainsi que les teneurs en sulfates et en aluminates du ciment, et la teneur en alcalins du béton.

La RSI est une pathologie capable d'endommager les bétons. Elle est provoquée par la formation différée d'ettringite dans un matériau cimentaire durci, plusieurs années après la construction de l'ouvrage et sans apport de sulfate externe.

Cette réaction peut se produire en raison d'un échauffement important du béton, notamment au sein de pièces critiques où la chaleur générée par l'hydratation du ciment n'est que partiellement dissipée vers l'extérieur, entraînant ainsi une élévation significative de la température du béton, plusieurs heures ou plusieurs jours après son coulage, elle peut également apparaître dans le cas d'ouvrages coulés pendant des périodes de chaleur.

La RSI entraîne un gonflement interne du béton, se manifestant par l'apparition à sa surface de fissures multidirectionnelles d'une maille de l'ordre de 10 à 30 cm. [7]



**Figure 1. 7** *La réaction sulfatique interne dans les bétons [15]*

### 3.7 L'action des chlorures :

L'attaque des matrices cimentaires par l'eau de mer combine différentes agressions de nature, notamment les chlorures, les sulfates et le dioxyde de carbone, auxquels s'ajoutent, selon la situation de l'ouvrage, les effets néfastes des cycles d'humidification-séchage et l'impact physique des vagues en zone de marnage. En plus de l'agression physico-chimique subie par la matrice, les dommages liés à la corrosion des armatures viennent s'ajouter à cette complexité.

Le phénomène est donc très complexe. Dans le cadre de cette lettre d'information consacrée au chlore, nous ne traiterons que de l'action du chlorure de sodium et du chlorure de magnésium. [5]

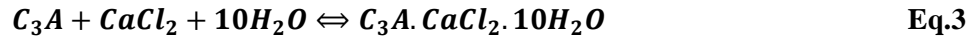
- **Chlorure de sodium :**

L'action du chlorure de sodium sur la matrice cimentaire est double :

1. Consommation des ions calcium de la portlandite et du C-S-H, par formation de chlorure de calcium soluble :



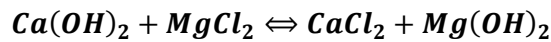
2. Formation de monochloroaluminate de calcium  $C_3A.CaCl_2.10H_2O$  par réaction des chlorures avec l'aluminate tricalcique  $C_3A$  et les aluminates hydratés.



Cette réaction, qui consomme des chlorures, permet de réduire le taux d'ions libres, ce qui retarde le risque de corrosion des aciers. Cependant, cette protection peut être déstabilisée par une action sulfatique associée qui, réagissant avec le monochloroaluminate de calcium, peut produire de l'ettringite susceptible de provoquer une expansion. Dans les zones d'aspersion et de marnage, en plus de l'action chimique sur la matrice cimentaire, les cycles de dissolution-cristallisation du chlorure de sodium peuvent entraîner des pressions de cristallisation qui provoquent un écaillage de surface. Il s'agit d'un phénomène de lixiviation de la chaux qui accroît la porosité du béton. [5]

- **Chlorure de magnésium :**

Comme le chlorure de sodium, ce sel exerce une action dissolvante sur la chaux. Cependant, le gel présent dans la solution conduit à la formation de brucite ( $Mg(OH)_2$ ) :

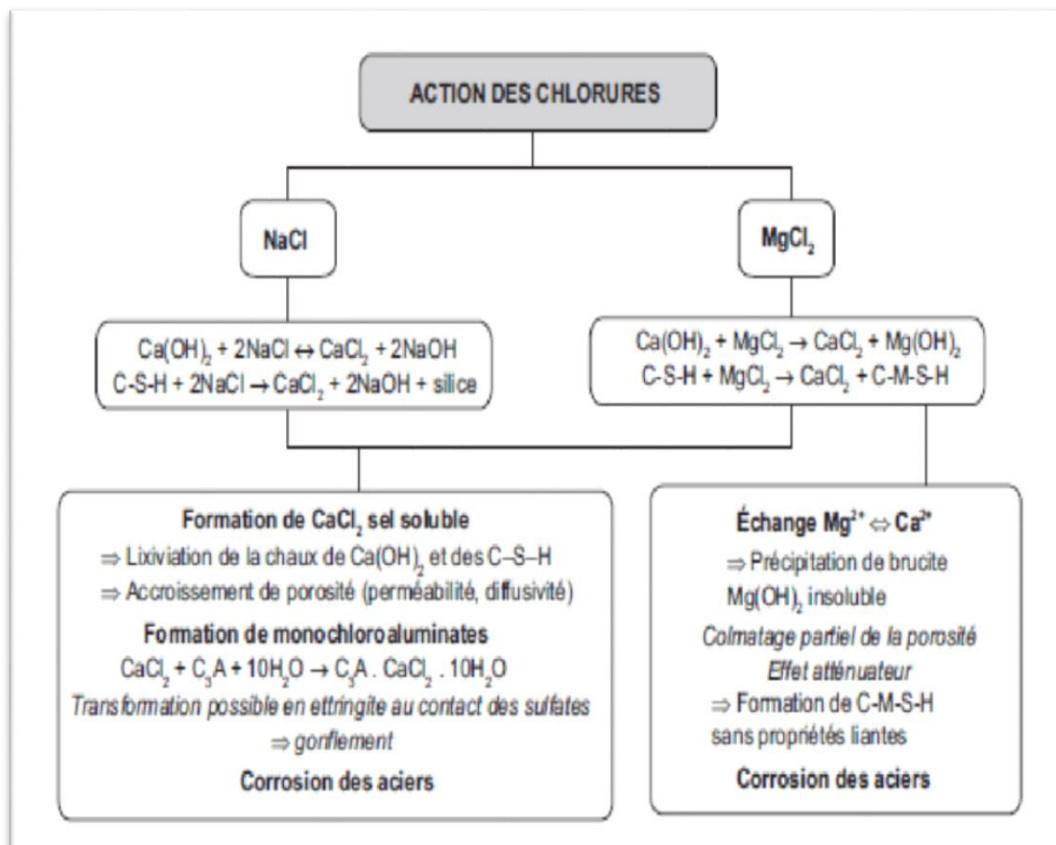


**Eq.4**

Qui, précipitée à la surface du béton, peut ralentir la pénétration des ions agressifs dans le béton. Comme pour le chlorure de sodium, la réaction du chlorure de magnésium avec les aluminates provoque la formation de monochloroaluminate de calcium.

- Enfin, il est bon de signaler un phénomène fréquent de substitution ionique pouvant accompagner ce type de réactions en milieu marin, à savoir la substitution du calcium des

CSH par le magnésium, donnant naissance à des M-S-H moins compacts et résistants.

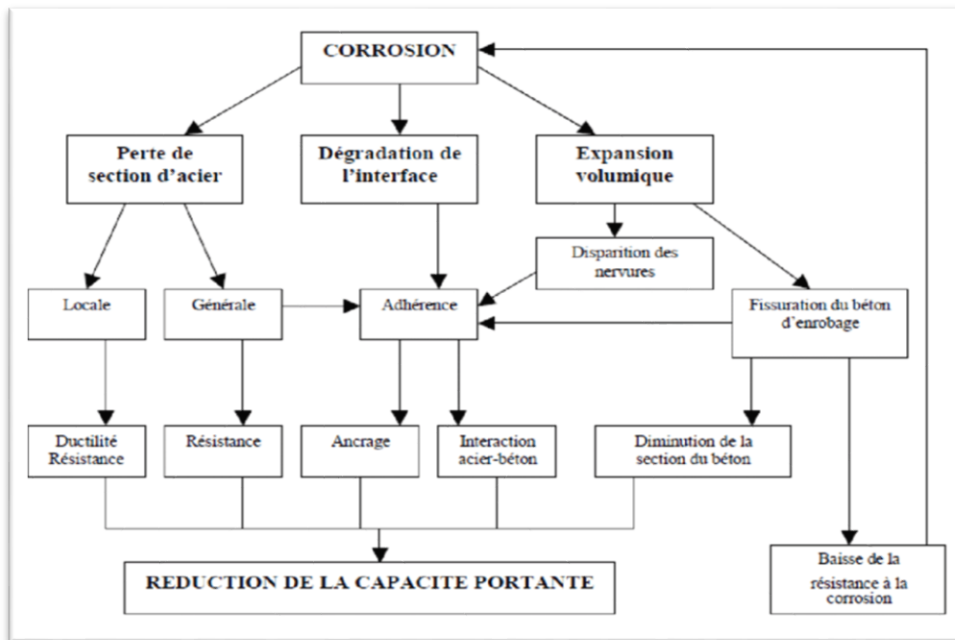


**Figure 1. 8** Action des chlorures sur le béton [16]

### 3.8 La corrosion des armatures :

#### 3.8.1 phénomène de la corrosion :

La corrosion est définie comme le phénomène suivant lequel métaux ont tendance, sous l'action d'un agent atmosphérique ou chimiques à retourner à leur état orginal d'oxyde, sulfure, carbonate. Plus stable par rapport au milieu considéré, et ainsi à subir une détérioration de leurs propriétés chimiques et mécaniques. L'interaction avec le milieu ambiant peut être chimique, électrochimique ou biochimique. Le problème de corrosion a pris de nos jours une importance considérable à cause de l'utilisation de plus en plus grande métaux et alliages dans la vie moderne. C'est un problème qui intéresse donc les industriels, les ingénieurs et les scientifiques. A cause des efforts déployés par ces derniers, la compréhension des mécanismes régissant les différents phénomènes de corrosion n'a pas cessé de se développer et ceci dans le but d'améliorer les procédés capables de lutter contre ce fléau. Du point de vue économique la corrosion pose un problème crucial. En effet, on estime que chaque année le quart de la production mondiale de l'acier est détruite par la corrosion. [17]



**Figure 1. 9** Effets de la corrosion sur le comportement mécanique de structures corrodées [18]

### 3.8.2 Définition de la corrosion des armatures :

La corrosion des armatures en acier dans le béton est une pathologie qui affecte les structures en béton armé et surtout celles réalisées sur les zones côtières. Sa gravité résulte dans le cout et le temps de réparation des ouvrages dégradés par la corrosion qui peut dépasser dans certains cas le cout de réalisation d'une structure neuve. D'après une étude réalisée aux États-Unis en 2016, le coût direct annuel de la corrosion dans les seuls ponts routiers est d'environ 8,3 milliards de dollars, y compris l'entretien, la réparation, le remplacement et le coût du capital. Les coûts indirects, y compris les retards de trafic et la perte de productivité, peuvent représenter 10 fois ce nombre. [19]

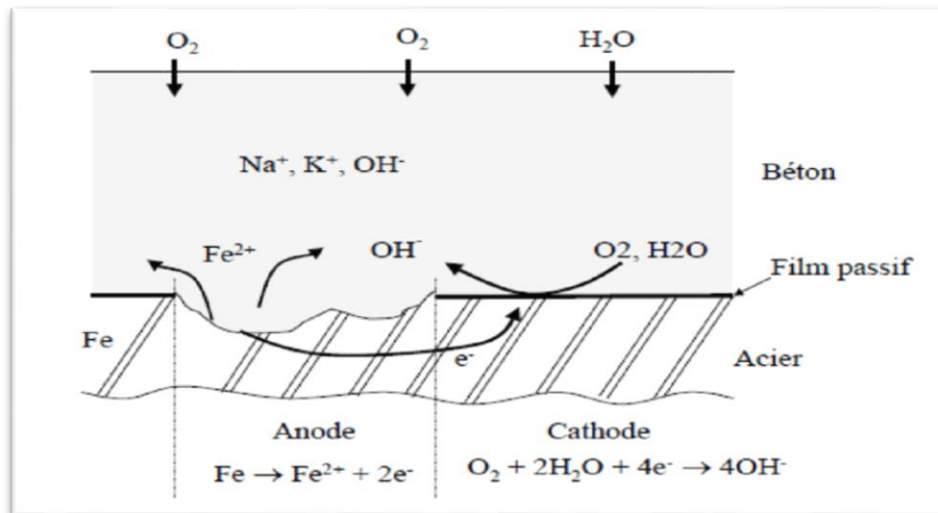


**Figure 1. 10** La corrosion des armatures [7]

La corrosion des armatures dans les ouvrages en béton armé peut se présenter sous deux facettes soit par l'effet de la carbonatation ou par la pénétration des chlorures. Cette réaction électrochimique, nécessite la présence simultanée de quatre facteurs :

- Une zone anodique (oxydation du fer)
- Une zone cathodique (réduction d'espèces chimiques en solution : eau ou oxygène dissous)
- Un milieu conducteur d'électrons (l'acier)
- Un milieu électrolytique (le liquide interstitiel du béton) [19]

La figure 2.1 montre la Mécanisme de la corrosion de l'acier dans le béton :



**Figure 1. 11 Mécanisme de corrosion de l'acier dans le béton [19]**

Le béton, du fait de sa forte alcalinité (pH>12), apporte aux armatures une excellente protection face à la corrosion. Dans ces conditions, il y'a formation de film protecteur très mince autour de ces aciers qui les protégera dans les conditions normales. En présence d'eau et d'oxygène, ce film passif peut être détruit par des agents agressifs comme les chlorures et les sulfates. La couche passive formée sur l'acier est déstabilisée par l'abaissement du pH produit par la réaction chimique entre le dioxyde de carbone et les hydrates de la pâte de ciment. Les ions chlorures pénètrent dans la structure poreuse du béton et peuvent atteindre les armatures. [19]

### 3.8.3 Types de corrosion des métaux :

Il existe différents types de corrosion dans la peinture industrielle, qui varient en fonction des conditions environnementales ainsi que des caractéristiques du matériau lui-même :

- **Corrosion atmosphérique** : Il s'agit d'un type de corrosion qui se développe uniformément sur toute la surface du matériau. Elle est principalement due à l'effet des agents corrosifs présents dans l'atmosphère, tels que l'oxygène, le dioxyde de carbone, la vapeur d'eau, les composés de soufre et de chlore.
- **Corrosion galvanique** : La corrosion galvanique est un type de corrosion très courant, qui se produit lorsque deux matériaux de potentiel différent sont liés électriquement l'un à l'autre au contact d'un électrolyte, comme l'eau salée. Dans certaines circonstances, la vitesse de réaction de la corrosion galvanique peut être très élevée et il convient donc d'y remédier le plus rapidement possible.

- **Corrosion par piqûres** : La corrosion par piqûres est une attaque localisée sur la surface du métal, accélérée par la présence de chlorures. Il s'agit d'un type de corrosion très dangereux, surtout s'il se produit dans des réservoirs industriels ou des silos contenant des liquides, car il existe un risque de perforation.
- **Corrosion par érosion** : La corrosion par érosion se produit principalement à l'intérieur de tubes ou de tuyaux en raison de l'écoulement de liquides, qui élimine successivement les couches d'oxyde se formant progressivement à la surface. [20]



*Corrosion atmosphérique*



*Corrosion galvanique*



*Corrosion par piqûres*



*Corrosion par érosion*

**Figure 1. 12** *Différents types de corrosion [20]*

## 4 Méthodes d'évaluation de la corrosion :

Les méthodes d'évaluation de la corrosion nous fournissent une indication de l'évolution de la vitesse de corrosion et du potentiel de corrosion du niveau de métal, tout en s'inspirant du mode d'inhibition de ces vitesses pour minimiser les dommages causés par cette pathologie.

Il existe de nombreuses méthodes d'évaluation de la corrosion, les plus largement utilisées et citées dans la littérature sont les suivantes :

- a) **La méthode gravimétrique** ou la perte de masse facile à mettre en œuvre et a l'avantage de permettre une mesure directe.
- b) **Les mesures électrochimiques** à citer : les techniques de polarisation potentiodynamique, la voltamétrie cyclique, la spectroscopie d'impédance électrochimique.
- c) **Les méthode DFT** (théorie de densité fonctionnelle).
- d) **Méthode d'évolution de l'hydrogène.** [21]

### 4.1 Les Mesure Gravimétrique :

#### 4.1.1 Définition :

Parmi les méthodes d'évaluation des métaux exposés à une solution électrolytique, les mesures gravimétriques basées sur les tests de perte de masse. La méthode de perte de masse est facile à utiliser, ne nécessite pas beaucoup d'équipement, et permettent d'estimer directement la vitesse corrosion de l'acier immergé dans l'électrolyte en présence d'agents agressifs, dans notre cas les ions chlorures. Les mesures gravimétriques sont connues comme moyens de mesure de la corrosion, aucune indication sur les premières recherches par perte de masse n'a été signalée dans la littérature, Le matériel nécessaire pour ces mesures :

- Une polisseuse
- Un bain thermostat
- Une balance de haute précision
- Un séchoir électrique, des béchers
- Un pH mètre

L'inconvénient de cette méthode qu'elle ne permet pas de traiter les mécanismes impliqués dans le processus de corrosion. [21]

#### 4.1.2 Principe des mesures gravimétriques:

La méthode gravimétrique est l'une des méthodes les plus précises en chimie analytique Théodore W. Richards (1868-1928) et ses étudiants de l'université de Harvard ont développé et amélioré de nombreuses techniques d'analyse gravimétrique de l'argent et du chlore, ce qui leur a permis de déterminer la masse atomique de 25 éléments avec une exactitude remarquable. A cet effet, ils ont

préparé des échantillons purs de chlorures et de ces éléments, et ont ensuite décomposé des masses connues et déterminé leur teneur en chlorures par gravimétrie.

En égard à ces travaux, Richards devint en 1914 le premier Américain à recevoir le prix Nobel En Chimie. Le principe de cette méthode repose sur la perte de masse " $\Delta M$ ", subie par l'échantillon de surface " S " pendant le temps "t" d'immersion dans une solution maintenue à température constante . La vitesse de corrosion est calculée par la formule suivante :

$$V = \Delta M / S \cdot t \text{ (mg/h.cm}^2\text{)} \quad \text{Eq.5}$$

$$\Delta M = M_1 - M_2$$

- $M_1$  : La masse de l'échantillon au début de l'essai (mg)
- $M_2$  : La masse de l'échantillon à la fin de l'essai (mg)
- $\Delta M$  : La vitesse de corrosion (mg/cm<sup>2</sup>.h)
- $S$  : La surface de l'acier exposée en cm<sup>2</sup>
- $t$  : Temps d'immersion dans la solution (heures) [21]

La valeur de l'efficacité inhibitrice est donnée par la formule suivante :

$$ELG(\%) = (V_0 - V_{inhibiteur} / V_0) * 100 \quad \text{Eq.6 [21]}$$

Où :

$V_0$  et  $V_{inhib}$  représentent respectivement les vitesses de corrosion en absence et en présence d'inhibiteur. La vitesse de corrosion peut être déterminée par les recommandations Rilem; les taux de corrosion sont calculés en utilisant la formule 3 :

$$V_{corr} = \frac{8.76 \times 10^7 \times W}{ATD} \text{ (}\mu\text{m/y)} \quad \text{Eq.7 [21]}$$

Où :

- $W$  : la perte de masse (g)
- $A$  : l'aire (cm<sup>2</sup>)
- $T$  : le temps d'immersion(h)
- $D$  : la densité de l'acier (g/cm<sup>3</sup>) [21]

#### 4.2 La méthode de polarisation potentiodynamique :

C'est une technique électrochimique à balayage potentiodynamique qui permet de caractériser à partir d'une courbe de polarisation limitée à faible surtension anodique et cathodique, une résistance, définie comme une résistance de polarisation qui est proportionnelle au courant de corrosion  $I_{corr}$  ( $\mu\text{A/cm}^2$ ),



L'intersection des deux droites anodique et cathodique donne la densité du courant de corrosion  $I_{corr}$  ( $\mu A/cm^2$ ), voir figure 2.3

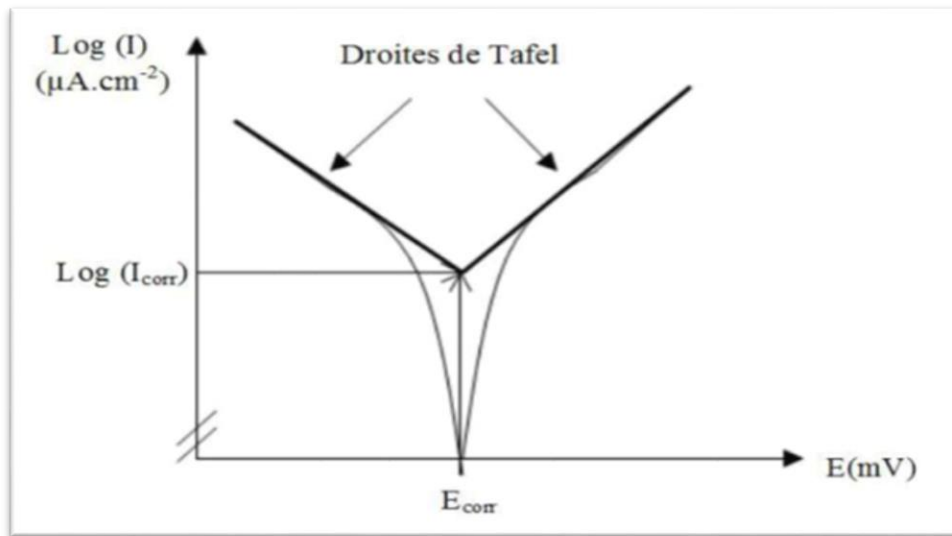


Figure 1.13 Tracé des courbes de polarisation (droite de Tafel) [21]

#### 4.2.1 La volta métrie cyclique :

La volta métrie cyclique consiste à effectuer un balayage linéaire du potentiel autour d'un endroit donné et à observer toute apparition et/ou disparition de phénomènes électrochimiques (oxydation et/ou réduction). Certains paramètres, comme la vitesse de balayage, peuvent expliquer la réversibilité de certaines réactions. Dans l'étude des inhibiteurs, cette technique a été mise en œuvre notamment pour caractériser l'adsorption des molécules inhibitrices sur le matériau dès les premières minutes d'immersion. [21]

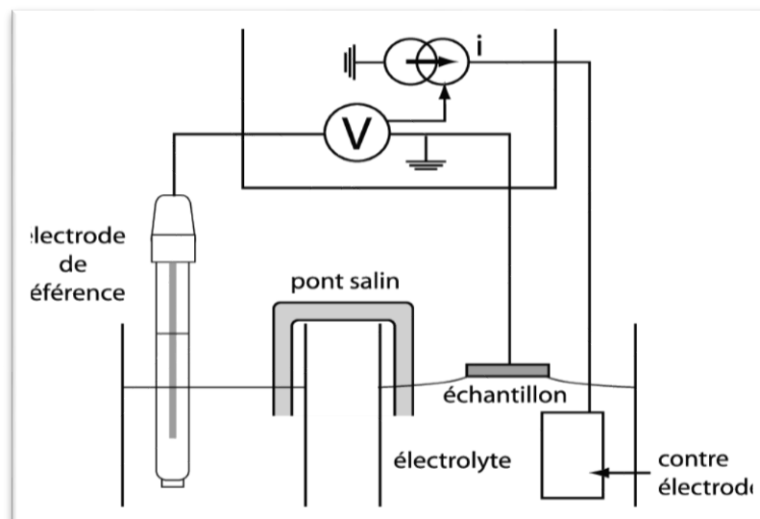


Figure 1.14 Schéma d'une expérience de voltamétrie cyclique [22]

#### 4.3 La Spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS) :

La spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE) est une technique couramment utilisée pour spécifier les mécanismes impliqués dans le processus de corrosion.

### 4.3.1 Principe :

La mesure de l'impédance électrochimique comprend l'étude de la réponse du système électrochimique après interférence, qui est généralement un signal alternatif de faible amplitude.

- La spectroscopie d'impédance électrochimique est utilisée pour étudier la corrosion des métaux non revêtus ou pour mesurer la capacité de protection des revêtements organiques. Cette technologie utilise un courant alternatif d'amplitude sinusoïdale pour envoyer un signal de stimulation à la surface de l'électrode de travail pour l'exciter, et la réponse obtenue est également sinusoïdale, ce qui peut renseigner sur la résistance de l'électrolyte et les propriétés électriques du matériel. La réponse enregistrée est convertie en fonction de la résistance et représentée en séparant la composante.

Résistance (partie réelle) et la composante capacitive (partie imaginaire); le signal est converti par des représentations classiques : diagrammes de Nyquist et/ou tracé de Bode. [21]

En pratique, la mesure d'impédance consiste à superposer une interférence sinusoïdale de faible amplitude  $\Delta E$  à un point de fonctionnement fixe, exprimé en  $|E|$ , et une pulsation  $\omega = 2\pi f$  (en  $\text{rad.s}^{-1}$ ), le potentiel appliqué à l'électrode est égal à :

$$E(t) = E + \Delta E \quad \text{avec} \quad \Delta E = |\Delta E| \sin(\omega t)$$

**Eq.8**

- Il en résulte alors un courant sinusoïdal  $\Delta I$  de même pulsation  $\omega$ , superposé au courant stationnaire  $I$ , tel que :

$$I(t) = I + \Delta I \quad \text{avec} \quad \Delta I = |\Delta E| \sin(\omega - \Phi)$$

**Eq.9**

$\Phi$ : correspondant au déphasage du courant alternatif par rapport au potentiel. L'impédance  $Z(\omega)$  est définie comme étant le rapport entre le signal de perturbation et la réponse associée :

$$Z(\omega) = \frac{\Delta E}{\Delta I}$$

**Eq.10**

L'impédance  $Z(\omega)$  est un nombre complexe caractérisé par son module  $|Z|$  et sa phase  $\varphi$

- L'objectif de l'analyse d'un spectre d'impédance est d'associer à chacune des étapes observables sur les diagrammes de Nyquist/ou de Bode des grandeurs physiques représentatives. Ceci peut être abordé par la modélisation du spectre en proposant un circuit électrique équivalent (CEE), composé d'un certain nombre d'éléments simples
- L'interprétation des diagrammes par l'intermédiaire de CEE doit respecter deux conditions primordiales :
  - Tous les éléments du circuit doivent avoir une signification physique précise, associée aux propriétés physiques du système

- Le spectre simulé à partir du CEE doit être le plus fidèle possible au spectre expérimental et l'erreur ne doit pas présenter de caractères systématiques en fonction de la fréquence
- La mesure de l'efficacité inhibitrice peut se faire aussi par la méthode de spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS) à partir de l'équation suivante :

$$EI_{Rct}(\%) = \frac{Rct - Rct_0}{Rct} \times 100$$

Eq.11

Où :

- $Rct$  : résistance de transfert de charge en présence d'inhibiteurs
- $Rct_0$  : résistance de transfert de charge en absence d'inhibiteurs [21]

#### 4.4 Théorie de la densité fonctionnelle (DFT) :

##### 4.4.1 Définition :

La théorie fonctionnelle de la densité (DFT) « Density Functional Theory" est une méthode de calcul quantique utilisée pour étudier la structure électronique des échantillons. Au début du XXI<sup>e</sup> siècle, cette méthode a été l'une des les plus utilisées dans les calculs quantiques aussi bien en physique de la matière condensée qu'en chimie quantique en raison de son application possible à des systèmes de tailles très variées, allant de quelques atomes à plusieurs centaines .

Au cours de la dernière décennie, l'utilisation d'inhibiteurs de corrosion basés sur l'informatique quantique a attiré une attention considérable. La théorie de la densité fonctionnelle basée sur l'informatique quantique (DFT) est largement acceptée comme "technologie verte d'inhibition de la corrosion" en raison de ses travaux théoriques.

Le DFT peut être utilisé pour concevoir des inhibiteurs de corrosion pour empêcher la corrosion de l'acier doux, de l'aluminium, du cuivre, du zinc et du magnésium dans les milieux aqueux. Le DFT est le moyen le plus simple d'étudier la structure moléculaire et le comportement des inhibiteurs de corrosion. [21]

##### 4.4.2 Principe :

Dans la théorie de la densité fonctionnelle (DFT), le principe est de déterminer divers paramètres chimiques quantiques comme :

- L'énergie orbitale moléculaire la plus haute occupée HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital)
- L'énergie de l'orbitale moléculaire le plus bas inoccupée LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital)
- L'électronégativité absolue ( $\chi$ )
- L'indice global d'électrophilicité ( $\omega$ )
- Le moment dipolaire ( $\mu$ )

- La dureté globale ( $\eta$ )
- La mollesse ( $\sigma$ ),
- L'affinité électronique (A)
- Le potentiel d'ionisation (I)
- L'énergie de gap ( $\Delta E$ ) et le nombre d'électrons transférés ( $\Delta N$ ) ont été déterminés en utilisant les équations suivantes :

Eq.12

$$\eta = \frac{E_{LUMO} - E_{HOMO}}{2}$$

$$\sigma = \frac{\eta}{2} \quad \text{Eq.13}$$

$$\omega = \frac{\chi^2}{2\eta} \quad \text{Eq.14}$$

$$\Delta N = \frac{\chi_{fe} - \chi_{inh}}{[2(\eta_{fe} + \eta_{inh})]} \quad \text{Eq.15}$$

- $\chi_{fe}$  et  $\chi_{inh}$  : Représentent l'électronégativité absolue du fer et de la molécule inhibitrice respectivement.
- $\eta_{fe}$  et  $\eta_{inh}$  : Les duretés globales du fer et de la molécule inhibitrice respectivement.

Les différents paramètres quantiques ont été calculés par la méthode B3LYP/ 6-31 G (d,p) de base pour tous les atomes dans les phases gazeuse et aqueuse, la géométrie des structures moléculaires synthétisées a été optimisée par le logiciel standard Gaussian09W. [21]

## 4.5 Méthode d'évolution d'hydrogène :

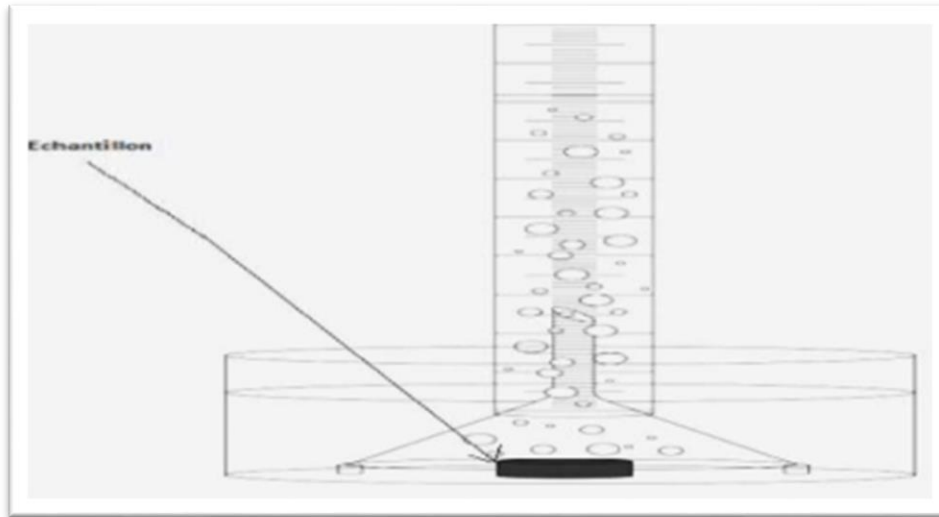
### 4.5.1 Définition :

La présence d'atomes d'hydrogène dans le réseau métallique peut être très nocive, entraînant une perte de résistance mécanique et de ductilité. On pense généralement que l'hydrogène s'adsorbe d'abord sur la surface métallique avant d'entrer dans le réseau et diffuse sous forme d'ions. Les atomes d'hydrogène peuvent avoir diverses origines à savoir une corrosion électrochimique au cours de laquelle la réaction cathodique est traduite par proton réduction. Une fois qu'ils ont pénétré le réseau cristallin, ils peuvent causer la fragilisation (les atomes d'hydrogène provoquent une perte marquée de la capacité de déformation plastique du métal, qui devient cassant) [21] .

### 4.5.2 Objectif de la méthode :

C'est une méthode largement utilisée pour déterminer la vitesse de corrosion des matériaux, basée sur le fait que lors de la dissolution de l'acier, une partie égale d'hydrogène est produite en collectant l'hydrogène gazeux en évolution. La vitesse de corrosion peut être déterminée facilement et rapidement avec du matériel disponible dans la plupart des laboratoires. [21]

Une configuration commune est illustrée dans la figure 2.5



**Figure 1. 15** Illustration schématique du montage pour la mesure du volume d'hydrogène dégagé [21]

L'efficacité d'inhibition est calculée à partir du volume d'hydrogène par l'équation suivante :

$$EI(\%) = \left[ 1 - \frac{V_{Ht}^1}{V_{Ht}^0} \right] \times 100$$

**Eq.16**

Où :

- $V_{Ht}^1$  : représente le volume d'hydrogène dégagé au moment "t" pour une solution en présence d'inhibiteurs
- $V_{Ht}^0$  : représente le volume d'hydrogène dégagé au moment "t" pour une solution en absence d'inhibiteurs [21]

#### **4.6 Thermographie infrarouge :**

En tant que méthode d'inspection sous la surface, la thermographie infrarouge (IRT) s'est avérée capable de détecter la corrosion dans les structures en béton armé. La méthode est basée sur les perturbations résultantes des caractéristiques de transfert de chaleur des matériaux en béton. Les fissures, la réaction des agrégats alcalins, la corrosion et d'autres formes de détérioration peuvent provoquer une distribution anormale de la température. Avec l'avènement des nouvelles générations de caméras IR, l'IRT devient une technique plus précise, fiable et rentable pour la surveillance de la corrosion dans les structures en béton armé. Cependant, comme la méthode GPR, l'interprétation de l'IRT est également qualitative, c'est -à- dire qu'un degré plus élevé de corrosion de l'acier entraîne une distribution thermique plus forte sur la surface du béton, qui présenterait des vitesses de chauffage plus rapides, et donc augmenter la température des matériaux en béton. [23]



**Figure 1. 16** *Caméra infrarouge* [23]

#### **4.7 Méthodes électromagnétiques :**

Une autre méthode non destructive de surveillance de la corrosion est le radar à pénétration de sol (GPR) (Figure 2.7), qui est basé sur la propagation d'une onde électromagnétique dans une structure en béton armé.

Malgré sa capacité, GPR ne présente qu'une évaluation qualitative des dommages dus à la corrosion. [23]



**Figure 1. 17** *Radar à pénétration de sol (GPR)* [23]

#### **4.8 Les Méthodes électrochimiques :**

Compte tenu des propriétés électrochimiques de la corrosion, les méthodes d'essais électrochimiques consistent à déterminer les caractéristiques d'interface spécifiques et les paramètres diélectriques entrant en jeu lors de la réaction électrochimique. L'organigramme présenté montre les mesures

électrochimiques utilisées pour suivre l'évolution de la corrosion. [21]

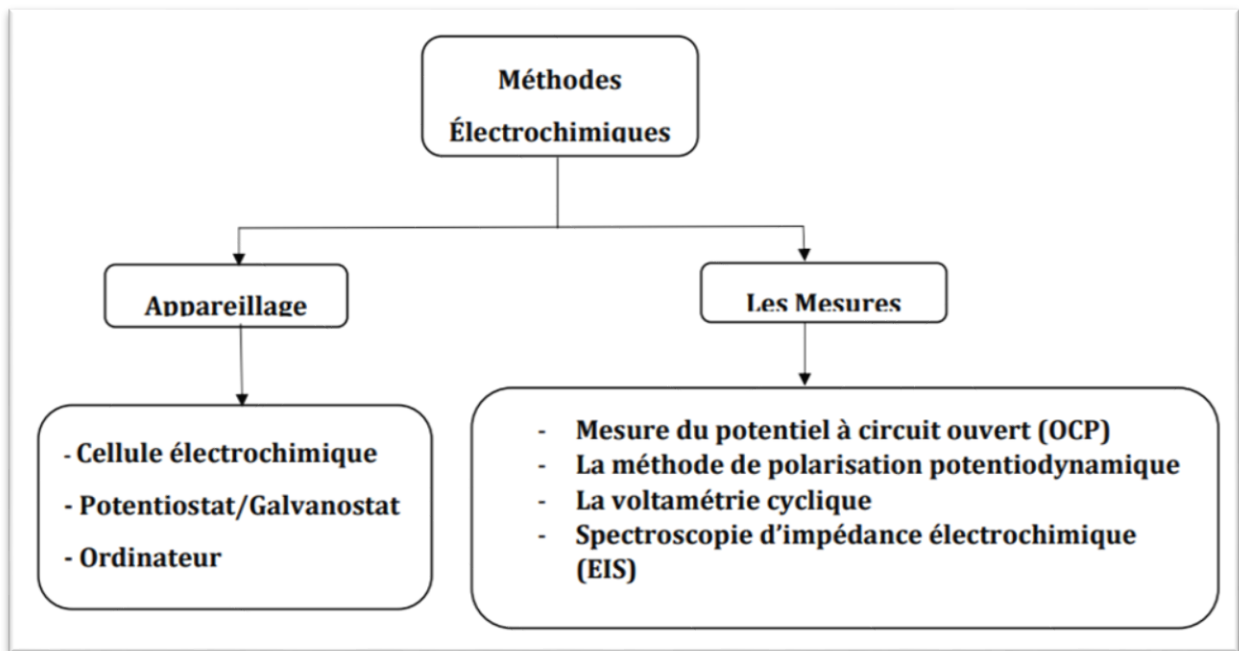


Figure 1. 18 Organigramme décrivant les mesures électrochimiques [21]

L'électrochimie est une technologie qui étudie l'utilisation de la simulation électrique pour analyser la réactivité chimique du système en analysant les mécanismes d'oxydation et de réduction dans la réaction. Les mesures électrochimiques sont effectuées dans une cellule électrochimique, qui contient trois électrodes : une électrode de travail (ET), qui est l'échantillon à tester, une contre-électrode (CE) pour le passage du courant et une électrode de référence (ER), qui sert d'étalon. Les trois électrodes sont immergées dans la solution à tester (électrolyte) voir figure 2.9

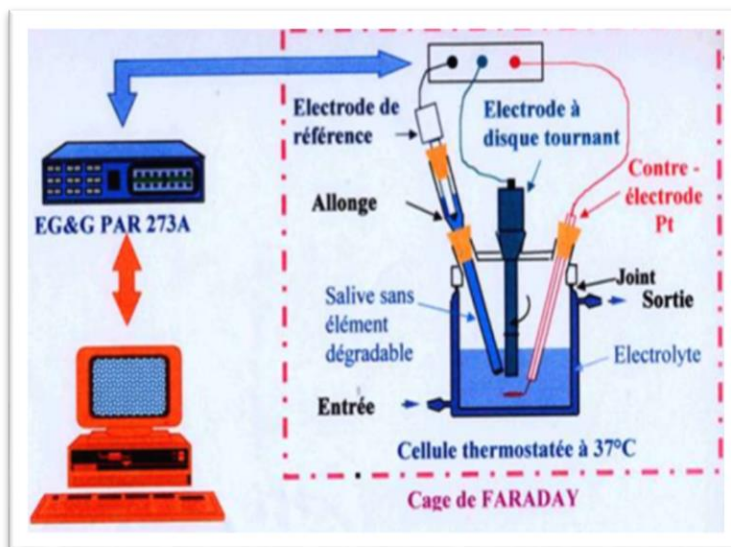


Figure 1. 19 Schéma d'une cellule électrochimique [21]

- **Electrode de travail (ET) :**

Elle représente la zone de recherche où se situe le matériau dont on veut connaître ses caractéristiques.

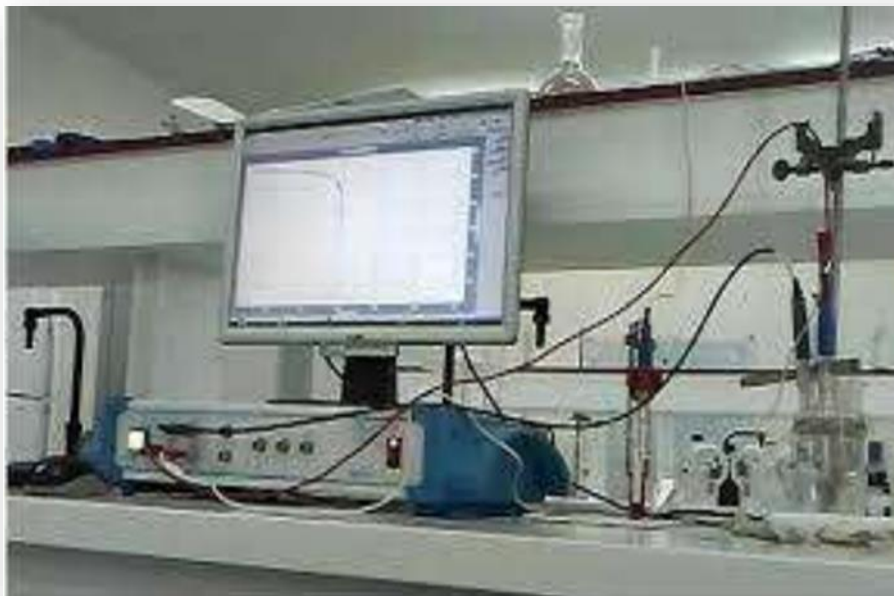
- **Electrode de référence (ER) :**

Cette électrode a un potentiel spécifique et constant, donc un potentiel défini avec précision qui peut être appliqué à l'électrode de travail.

- **La contre électrode (CE) :**

La contre-électrode est le conducteur qui ferme le circuit de la cellule et permet au courant dans l'électrode de travail de traverser la solution. Il est généralement constitué de métaux inertes tels que le platine et le graphite.

La cellule électrochimique est connectée à un potentiostat/galvanostat piloté par un ordinateur pour collecter et traiter les données, ainsi qu'un électromètre pour assurer la liaison entre la batterie électrochimique et le potentiostat. Voir figure 2.10 [21]



**Figure 1. 20** Schéma représentatif de la chaîne électrochimique de mesure utilisé Au laboratoire [21]

#### **4.9 Canin+ :**

C'est la méthode avancée de cellule électrochimique, L'instrument d'analyse de la corrosion Canin+ fournit deux méthodes de recherche et d'évaluation de la corrosion de l'acier dans le béton : Méthode de mesure du potentiel à demi-cellule et la méthode de **la résistivité** du béton. Cette combinaison des mesures de résistivité et de potentiel vous permet d'obtenir des informations aussi précises que possible sur l'état de corrosion des barres d'armature. [24]

##### **4.9.1 Mesure de la résistivité :**

L'objectif de cette technique est de mesurer la résistivité apparente du béton de surface. Les mesures de résistivité électrique sont effectuées à l'aide d'un contrôleur de terre Megger DET4 et d'un dispositif de quatre électrodes (Figure 2.10), formant un carrée adaptés aux investigations sur site. [23]





**Figure 1. 21** Exemple de matériel commercialisé pour la cartographie de la résistivité de type Wenner (IFSTTAR) [23]

#### **4.9.2 Fonctions principales :**

- Présentation immédiate de la zone de test et lecture directe sur l'écran de l'appareil.
- Représentation possible de 240 mesures en tons de gris faciles à lire. [24]

#### **4.9.3 Applications :**

- Canin+ convient parfaitement à l'évaluation des potentiels de corrosion sur des surfaces importantes de 8000 m<sup>2</sup> ou égales à un multiple de ce chiffre. Cela dépend de la dimension de la grille sélectionnée. L'électrode à roue en particulier permet de couvrir de plus grandes zones facilement et rapidement.
- Le principe de mesure et les facteurs à prendre en compte par l'ingénieur qui évalue la probabilité de la corrosion sont décrits dans le document « Principe de mesure de Canin - Bases d'une interprétation optimale » disponible dans la section des téléchargements.
- Le logiciel Canin ProVista procure aussi une aide inestimable dans l'évaluation de la probabilité de corrosion d'une structure. Un exemple d'application de ce logiciel est disponible dans la section des téléchargements. [24]

#### **4.9.4 Spécifications :**

- Mesures rapides et non-destructives
- 2 méthodes de mesure de la corrosion
- Menu à 9 touches de fonction
- Logiciel Canin Provista pour traitement et transfert des données [24]



**Figure 1. 22** *Analyse de la corrosion par CANIN+ [21]*

## **5 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons donné une vue générale de phénomène de corrosion et les méthodes les plus couramment utilisées pour détecter la corrosion ; qui sont : les méthodes gravimétriques (la perte de masse) et les méthodes électrochimiques.

L restent des méthodes directes et simples pour refléter les phénomènes électrochimiques se produisant dans un milieu électrolytique. Ce qui permet de mieux d'analyser l'effet de protection et de détecter les substances adsorbées sur la surface traitée. Ces phénomènes d'adsorption, d'oxydation et de ségrégation provoqués par la corrosion modifient la composition chimique et physique de la surface de l'acier. Avec le développement continu du domaine de la recherche sur l'inhibition de la corrosion, les méthodes d'évaluation de la corrosion sont également continuellement développées pour mieux comprendre le processus de corrosion, dans le chapitre suivant on va parler de principe d'utilisation des inhibiteurs pour protéger les armatures contre la corrosion.

**CHAPITRE II : LUTTE CONTRE LA CORROSION  
PAR L'UTILISATION DES INHIBITEURS**

## 1 Introduction :

La lutte contre la corrosion représente toutes les mesures qu'on peut prendre pour protéger les matériaux métalliques contre l'action destructive du milieu. Plusieurs techniques de protection existent que l'on peut classer comme suit :

- Prévention par une forme adaptée des pièces.
- Prévention par un choix judicieux des matériaux.
- Protection par revêtements.
- Protection électrochimique.
- Protection par inhibiteurs (Notre cas d'étude). [25]

## 2 Prévention par une forme adaptée des pièces :

Il est possible de réduire le risque de corrosion en donnant aux objets des formes adaptées aux conditions d'emploi, et, par conséquent, affectent significativement leur durée de vie. À cet effet, il est recommandé de suivre les directives suivantes :

- Dans le cas de pièces en contact avec un liquide (eau, etc.) il faut prévoir un bon drainage pour éviter le problème d'accumulation (toitures métalliques, récipients métalliques, etc.).
- Faciliter l'écoulement des fluides à travers les canalisations pour éviter le risque d'érosion par corrosion et de corrosion par cavitation.

Les exemples suivants le montrent :

### 1.Élimination des zones humides :

La réduction du risque de corrosion à l'intérieur d'un réacteur chimique, au cours des temps d'arrêt est schématisée par des vidanges incomplètes (a), favorisant la corrosion et la vidange complète (b), réduisant le risque de corrosion. [26]

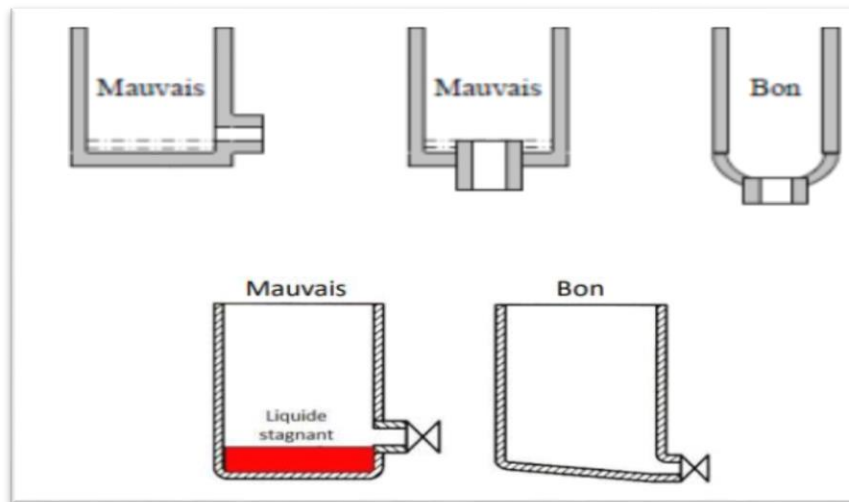


Figure 2. 1 Les types de vidange du réacteur chimique [26]

**a) Ecoulement des fluides :**

Une conception judicieuse de l'écoulement des fluides réduit le risque de corrosion par érosion et de corrosion par cavitation. Il faut éviter les changements brusques de direction. Le rayon du coude d'une conduite doit être supérieur à 3 fois son diamètre

La conception minutieuse du flux de liquide réduit le risque de corrosion par cavitation. Des changements d'orientation soudains doivent être évités. Le rayon du coude d'une canalisation doit être plus de 3 fois son diamètre [26]

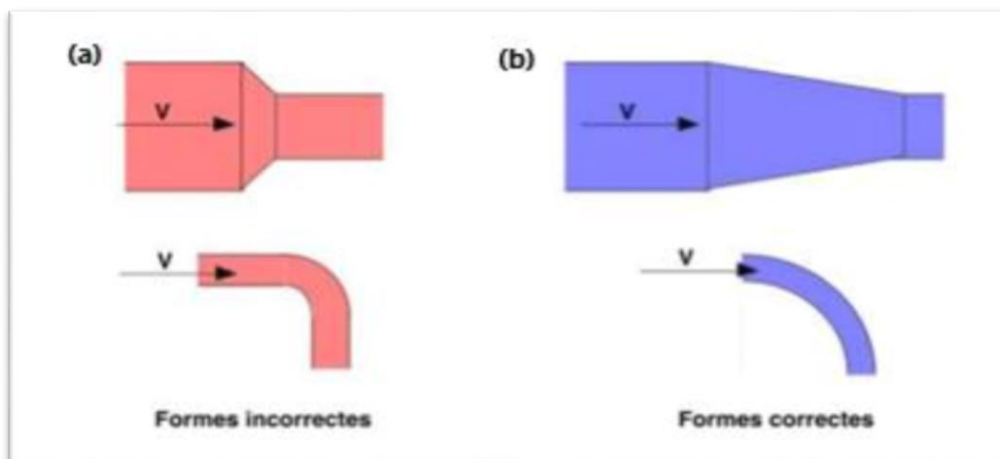
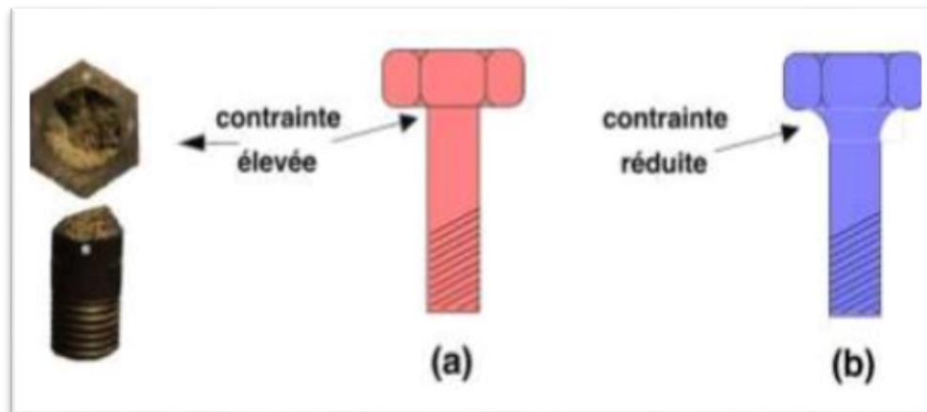


Figure 2. 2 Diminution du risque de corrosion d'un coude. Risque plus élevé pour (a) que pour (b) [26]

**b) Contraintes :**

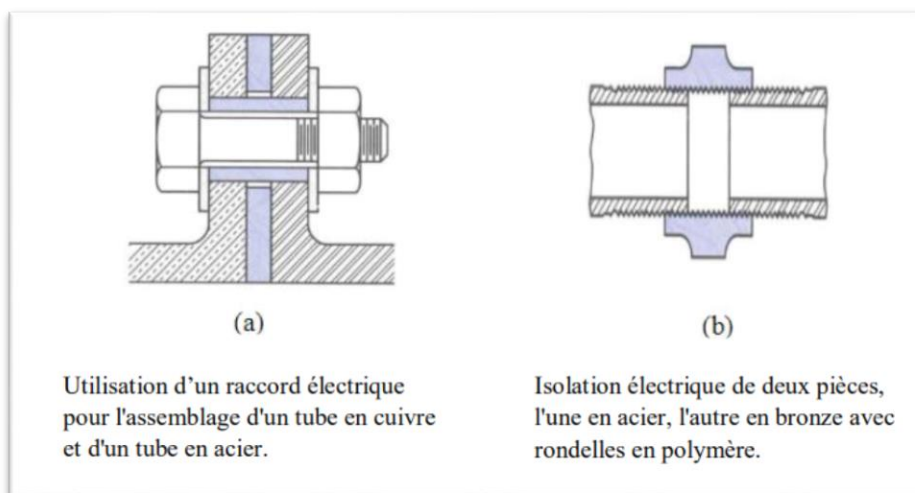
La distribution des contraintes dans une pièce influence sa sensibilité à la corrosion sous contrainte. Une forme arrondie au voisinage de la tête d'un boulon évite la concentration des contraintes. L'usinage introduit souvent des contraintes résiduelles dans les pièces, un traitement thermique Adéquat permet alors de les réduire, indépendamment de la forme. [26]



**Figure 2. 3** Diminution du risque de corrosion sous contrainte d'un boulon, contrainte locale élevée (a) et contrainte locale peu élevée (b) [26]

**c) Contact entre différents matériaux :**

Un contact électrique et électrolytique entre divers métaux permet la formation de piles galvaniques, provoquant une corrosion accélérée du métal moins noble. Le choix de matériaux appropriés et la séparation de différents métaux par isolation permettent d'éviter ce type de corrosion. Dans les grandes installations, l'isolement électrique de différents métaux n'est pas toujours possible. L'utilisation de pièces sacrificielles, peu coûteuses et faciles à remplacer, peut parfois résoudre le problème. [26]



**Figure 2. 4** Différents types de raccords isolants [26]

**3 Prévention par un choix judicieux des matériaux :**

Il sera possible de lutter contre les risques de corrosion par le choix judicieux des matériaux. Le choix des matériaux tient compte des facteurs ci-après :

- Domaine d'utilisation.
- Nature et niveau des sollicitations mécaniques et thermiques.
- Traitements sélectionnés.
- Prix et disponibilité des matériaux.

Le choix du matériau doit tenir compte essentiellement de l'influence défavorable et des conditions d'exploitation. Il n'y a pas de métaux ou alliages qui ont une résistance absolue à la corrosion, mais seuls les matériaux résistants à la corrosion sont connus dans certains milieux agressifs. Le comportement à la corrosion n'est qu'un critère dans le choix des matériaux, quoique souvent déterminant. La résistance à la corrosion est une propriété du métal moyen et non pas du métal seul. Le tableau ci-après présente la résistance à la corrosion de certains métaux purs dans les différents milieux .

**TAB 1.2. Résistance à la corrosion de certains métaux dans les milieux corrosifs [26]**

Milieu	Fe	Cr	Ni	Cu	Al	Zn	Ti	Ta
<b>Air humide</b>	-	+	+	+	+	m	+	+
<b>Eau froide naturelle aérée</b>	m	+	+	+	-	+	+	+
<b>Eau de mer</b>	-	+	+	m	m	-	+	+
<b>Acide non oxydant</b>	-	m	m	+	-	-	+	+
<b>Acide oxydant</b>	-	+	m	-	-	-	+	+
<b>Acide + Cl<sup>-</sup></b>	-	+	m	-	-	-	m	+
<b>Base + O<sub>2</sub></b>	+	+	+	+	-	-	+	m
<b>Oxydation à haute température</b>	m	+	+	-	-	-	m	-

Avec :

**+ : Bonne résistance à la corrosion.**

**- : Mauvaise résistance à la corrosion.**

**m : résistance moyenne.**

#### **4 Protection par revêtements :**

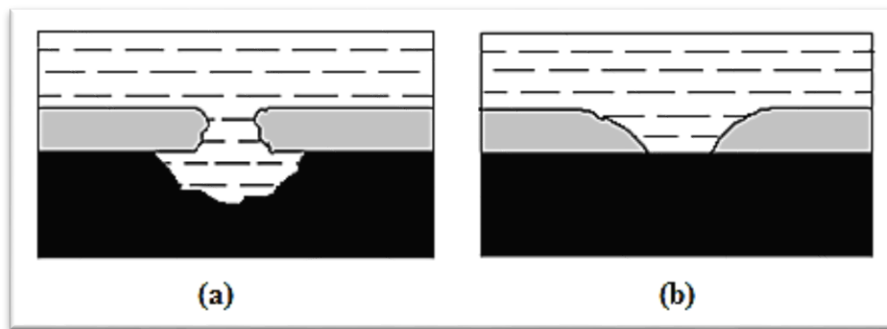
Les revêtements constituent une barrière physique entre le milieu agressif et le métal à protéger. Leur efficacité dépend de leur propre comportement vis-à-vis du milieu agressif ainsi que de l'intégrité du revêtement. [27] On distingue :

#### 4.1 Protection par revêtements métalliques :

Les revêtements métalliques sont couramment employés pour protéger l'acier contre la corrosion atmosphérique. Selon leur comportement à la corrosion par rapport au substrat on distingue deux types de revêtements métalliques :

- Ceux plus nobles que le substrat cathodique.
- Ceux moins nobles que le substrat anodique.

Le chrome, le nickel ou le cuivre forment des revêtements plus nobles qu'un substrat en acier, contrairement au zinc, au cadmium ou l'aluminium. Dans les deux cas, la couche forme une barrière entre le métal de base et le milieu corrosif. Par contre, la différence se remarque à partir des pores par exemple. Un revêtement plus noble corrode localement le substrat qui joue le rôle d'anode (figure 3.6.a). Les revêtements plus nobles que le substrat donc contenir aucun défaut. En revanche, lorsque le dépôt est moins noble que le substrat (figure 3.6.b), le phénomène s'inverse. Le dépôt joue le rôle de l'anode et se détériore, alors que le substrat cathode, reste protégé. En plus, il faut noter que la durée de vie du revêtement est proportionnelle à son épaisseur [27].



**Figure 2. 5** Corrosion en présence de revêtements métalliques plus nobles (a), et moins nobles (b) que le substrat [27]

##### 4.1.1 Procédés de fabrication de revêtements métalliques :

Différentes techniques sont utilisées pour fabriquer des revêtements métalliques et en voici les principales :

- L'électrodéposition.
- La déposition chimique.
- L'immersion dans du métal liquide.
- La déposition par phase gazeuse (PVD, CVD).
- La déposition par projection au pistolet. [26]

##### a) Immersion :

Les parties à protéger sont immergées dans un bain métallique fondu. Les revêtements les plus courants sont les métaux de faible point de fusion : - étain : étamage, - zinc : zingage, galvanisation Applications : Protection contre la corrosion atmosphérique. Pièces de machines à laver, corps de vannes, bacs. [26]



**b) Diffusion :**

Les pièces à protéger subissent un traitement thermique en contact avec un élément chimique. Celui-ci diffuse depuis la surface. La pièce est couverte de métal pur à la surface avec une sous-couche d'alliage :

- shérardisation : cémentation à 350°C de sable et de gris de zinc,
- chromisation : cémentation au fluorure de chrome à 1050 °C,
- calorisation : cémentation Al +  $Al_2O_3$  à 850 °C.

Applications : Pièces mécaniques ; esthétique ; décoration. [26]

**c) Métallisation :**

Le métal protecteur (Zn, Al) est fondu à l'aide d'un pistolet métallique à gaz. Le métal fondu est pulvérisé à l'air comprimé. Les gouttelettes sont donc projetées sur la pièce à grande vitesse (environ 100 m/s), permettant leur soudage en donnant un dépôt très adhérent et une très bonne protection.

Applications : canalisations souterraines en fonte ou acier, automobile. [26]

**d) Placage :**

Procédé effectué sur tôles en laminage à chaud. La pression et la diffusion thermique assurent la liaison entre le métal qui doit être protégé et le métal de protection. Le cuivre, le nickel et le laiton sont utilisés pour protéger les métaux ferreux et l'acier inoxydable. Le cuivre, le nickel et le laiton sont utilisés pour protéger les métaux ferreux et l'acier inoxydable.

Applications : construction mécanique, chaudronnerie, cuves. [26]

**e) Electrolyse :**

Un courant électrique traverse un bain électrolytique à travers une cathode composée de la pièce à protéger (pôle -) et de l'anode du métal à déposer. Le métal d'apport se dissout dans l'électrolyte et se dépose sur la cathode. Principaux métaux d'apport utilisés : cuivre, nickel, chrome, zinc, étain. Il existe plusieurs étapes à suivre : par exemple, le chromage d'une pièce en acier nécessite un placage en cuivre suivi d'un nickelage.

Applications :

- Dépôts épais : dépôts pour gravure électronique, vilebrequins, matrices, moules...
- Dépôts minces : décoration, sous-couche avant dépôt final, pistons et segments, industrie électrique. [26]

## **4.2 Revêtements non métalliques :**

### **4.2.1 Revêtements inorganiques :**

On distingue deux types de revêtements inorganiques non métalliques :

**a) Les couches de conversion :**

Ces couches sont obtenues par une réaction du métal avec un milieu choisi et, par conséquent, contiennent toujours des ions du substrat. On distingue les couches suivantes :

- L'anodisation.
- Oxydation chimique.
- Chromatisation.

## **b) Les couches étrangères au substrat :**

Ces couches sont, en revanche, fabriquées par des procédés de déposition qui n'impliquent pas de réaction du substrat. Les revêtements minéraux non métalliques étrangers au substrat comprennent :

- Ceux plus noble que le substrat.
- Les émaux.
- Les ciments.
- Les ciments réfractaires. [26]

### **4.2.2 Revêtements organiques :**

Ils forment une barrière plus ou moins imperméable entre le substrat métallique et le milieu, et on les classes en trois familles :

- Revêtements en bitumes.
- Revêtements polymétriques.
- Peintures et vernis. [27]

### **4.3 Choix du revêtement :**

Le choix d'un revêtement anticorrosion doit remplir les conditions suivantes :

- Résistance d'isolement élevée,
- Imperméabilité à la vapeur d'eau, à l'air,
- Faible transmission d'espèces ioniques,
- Inertie chimique et bactériologique,
- Adhérence et de mouillabilité à la surface métallique
- Résistance mécanique, pour que les propriétés anticorrosion puissent être maintenues de façon permanente. [26]

## **5 Protection électrochimique :**

### **5.1 Définition :**

La protection cathodique réduit le potentiel d'électrode du métal. Lorsque deux métaux différents immergés dans un milieu corrosif sont reliés électriquement, la vitesse de corrosion de l'un augmente et celle de l'autre diminue. Cette réduction de potentiel est obtenue par passage d'un courant entre la surface à protéger (cathode) et une électrode auxiliaire (anode). [26]

### **5.2 Champs d'application de la protection cathodique :**

#### **a) Ouvrages au contact du sol :**

- Canalisations de produits pétroliers liquides, de gaz combustibles ou d'autres fluides de types produits chimiques.
- L'extérieur des cuvelages de puits (pétrole, gaz).
- Les réservoirs enterrés.

- Inflammables comme le G.P.L.
- Réservoirs de propane liquide installés ou enterrés.
- Réservoirs des stations-service les plus importantes.

**b) Ouvrages immergés :**

- Les installations offshore fixes et les navires.
- Les bouées et ouvrages portuaires. [26]

**5.3 Types de protection cathodique :**

La transformation d'une surface métallique corrodée en une surface protégée cathodiquement exige que le potentiel naturel de la surface soit réduit à celui de la zone d'immunité. Pour ce faire, un dispositif de protection de courant continu doit être installé dans le même électrolyte. La mise en œuvre d'un tel système nécessite l'application d'un ou de deux types d'anodes :

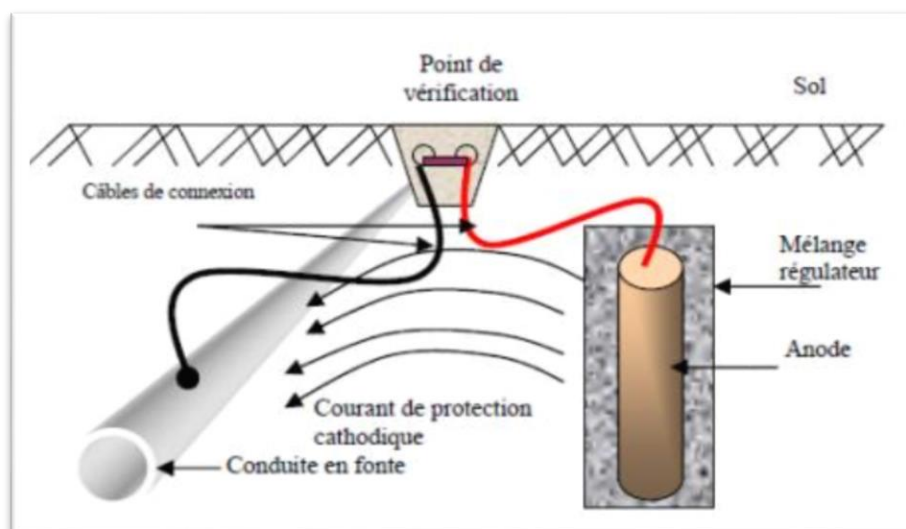
- Anodes galvaniques (sacrificielles) ayant un potentiel électrochimique supérieur à celui du métal à protéger.
- Anodes reliées à un générateur électrique offrant une protection par courant imposé.

La protection cathodique peut ainsi être effectuée soit :

**a) Par anodes sacrificielles :**

Protection cathodique consistant à diminuer le potentiel en imposant un courant extérieur à partir d'une anode auxiliaire, un courant galvanique peut être utilisé par couplage avec un métal moins noble, ce qui crée une pile de corrosion à grande échelle dans laquelle le métal à protéger constitue la cathode, l'anode étant uniquement le siège d'une réaction de corrosion : c'est la protection par anode sacrificielle. En cas de protection par anode sacrificielle, le métal à protéger a un potentiel supérieur ou égal à celui de l'anode, la différence possible étant due à la chute de potentiel introduite par la résistance de la liaison entre anode et cathode.

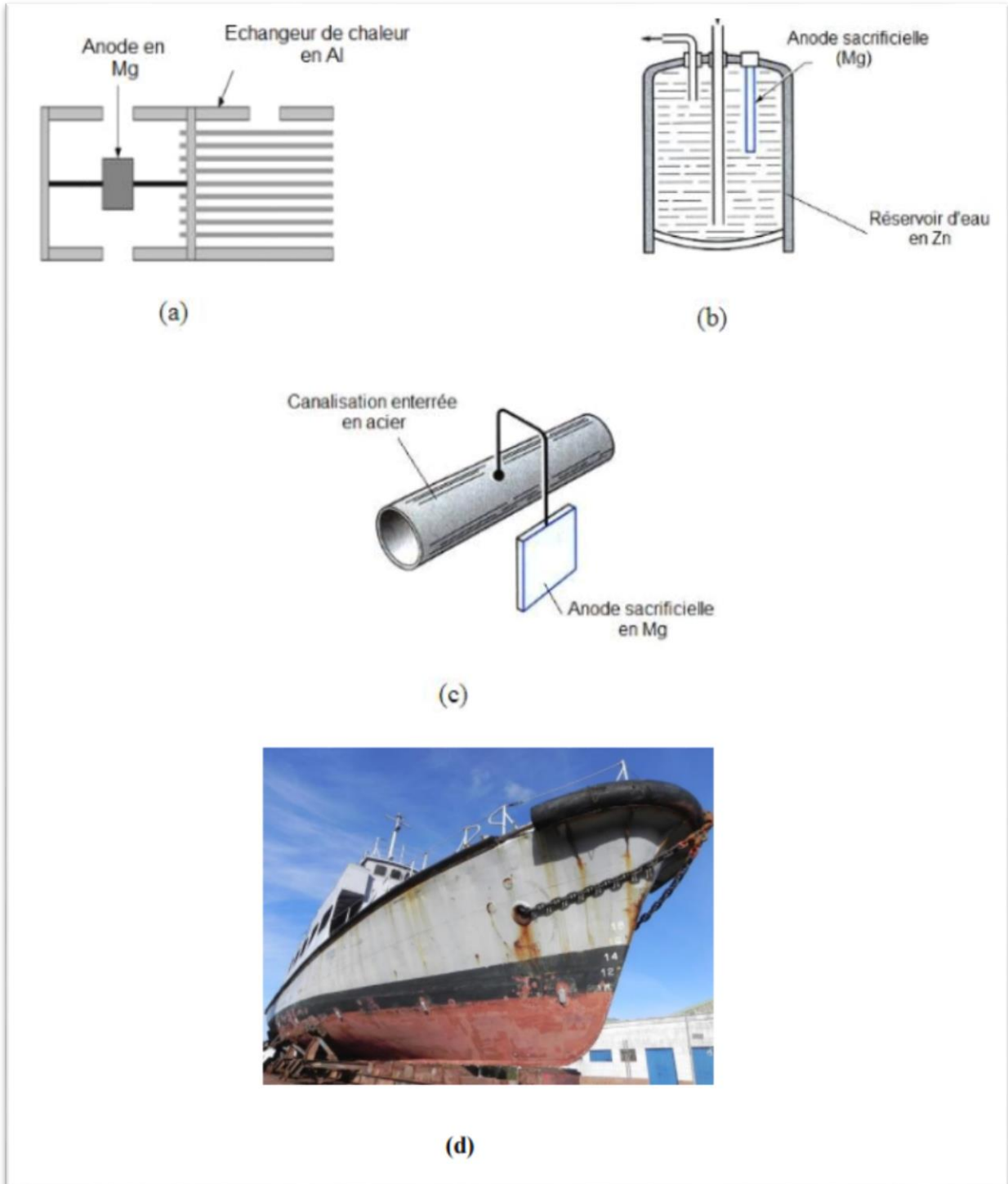
Le schéma ci-dessous montre le principe de la protection par anode sacrificielle. [26]



**Figure 2. 6** Principes de la protection par anode sacrificielle [26]

❖ Différents types d'anodes sacrificielles :

On utilise pour la protection cathodique de l'acier des anodes à base de zinc, d'aluminium ou de magnésium. Quelques exemples sont donnés sur la figure 3.7.



**Figure 2. 7** Protection cathodique par anode sacrificielle : (a) d'un échangeur de chaleur ; (b) réservoir d'eau ; (c) canalisation enterrée ; (d) bateau [26]

❖ Critères de choix des anodes sacrificielles :

Les critères de choix pour ces anodes sont les suivants :

- Ne pas être attaquées par le milieu corrosif.
- Avoir une bonne conductibilité, ainsi qu'une bonne résistance mécanique.
- Ne pas être trop onéreuses. [26]

❖ **Domaine d'application des anodes sacrificielles :**

***TAB 1.2. Domaines d'application des anodes sacrificielles à base de zinc, d'aluminium à l'indium et de magnésium. [26]***

<b>Anode à base de zinc</b>	<b>Anode à base d'aluminium à l'indium</b>	<b>Anode à base de magnésium</b>
- Conduites enterrées de faible longueur -Ouvrages immergés - Capacités métalliques (intérieur ou extérieur) -Réservoirs sous talus	- Plates formes offshore - Conduite offshore chaude - Capacité métalliques (intérieur)	- Conduites enterrées sur de faibles longueurs - Conduites offshore sur plusieurs Km à partir des plates-formes -Pré polarisation d'ouvrages offshore permettant de réduire la quantité d'anodes d'aluminium devant prendre le Relais -Réservoirs sous talus.

**b) Par courant imposé :**

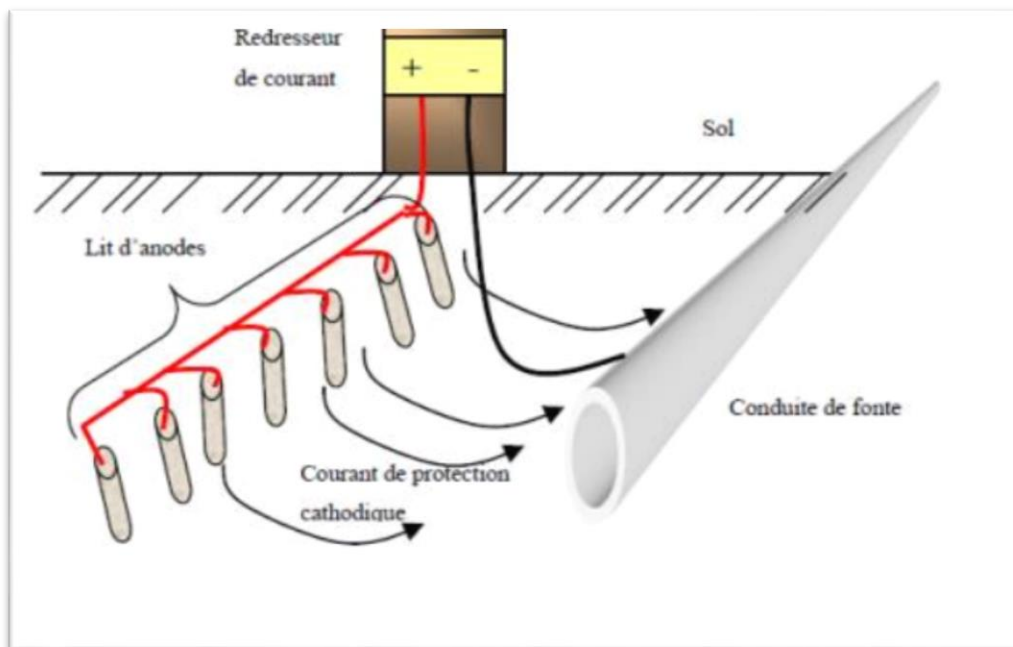
Dans certaines situations de protection, les anodes sacrificielles ne fournissent pas assez de courant pour une protection optimale. Cette situation est souvent rencontrée dans le cas de longues conduites de grand diamètre et de tuyaux présentant des problèmes d'isolation. De plus, certaines conditions de l'environnement peuvent parfois causer ce genre de problèmes. Dans de telles circonstances, les ingénieurs de design favorisent l'application de la protection par courant imposé. Cette méthode est aussi appelée protection cathodique par courant extérieur imposé. [26]

❖ **Principe :**

La protection par courant imposé (ou de soutirage) utilise une source d'énergie électrique à courant continu qui s'écoule dans un circuit comprenant.

- Masse anodique ou (un déversoir).
- L'électrolyte (sol ou eau).
- La structure à protéger.

Le pôle positif de la source est relié au déversoir tandis que le pôle négatif est relié à la structure à protéger. Le courant provenant du déversoir traverse l'électrolyte puis pénètre dans la structure, créant ainsi une baisse potentielle désirée correspondant à l'immunité du métal. Par exemple, pour l'acier présent dans un sol type, la différence de potentiel (d.d.p) entre l'électrode de référence du sulfate de cuivre saturé (ECS) est inférieure à  $-0,850$  V en tous points de la structure. En général, la valeur limite inférieure recherchée se situe autour de  $-1$  V. Le schéma suivant (figure 3.8) illustre le principe de la protection par courant imposé en utilisant un générateur de courant continu connecté entre la structure à protéger (cathode) et une ou plusieurs anodes auxiliaires (appelées déversoirs de courant) utilisant n'importe quel matériau conducteur (de préférence inattaquable). [26]



**Figure 2. 8** Principe de la protection par courant imposé [26]

### ❖ Comparaison entre un système à anode galvanique et un système à courant imposé :

Même si les deux systèmes se ressemblent, ils sont très différents. L'une des différences majeures dans le fonctionnement du système est que l'anode à courant imposé utilise une source de courant externe en contraste avec l'anode sacrificielle qui est autonome. A cause de ces différences, chaque système présente ses avantages. [26]

#### 5.4 Protection anodique :

Le principe de la protection anodique diffère de celui de la protection cathodique en ce sens qu'on fait augmenter le potentiel de corrosion de façon qu'il se situe dans la zone de passivation. En conséquence, cette méthode n'est applicable qu'aux métaux passivés. Le film d'oxyde qui se forme spontanément (de manière naturelle) sur la surface métallique est mince et protecteur. Son épaisseur peut être augmentée par anodisation, comme l'anodisation de l'aluminium ou du titane. Le principe est un procédé d'électrolyse (imposition d'un courant de passivation anodique) en solution d'acide sulfurique diluée à 15 %. Le film qui en résulte est dur, résistant à l'usure et à la corrosion. La protection anodique, d'origine plus récente, dépend de la passivation du matériau dans l'environnement concerné. Elle est basée sur la propriété de certains matériaux à passiver en environnement corrosif lorsque leur potentiel est maintenu à une valeur correcte. Le film passif est un conducteur électronique dont l'épaisseur est d'environ 10 nm. Sa formation ne nécessite pas plus de  $10^{-2}$  C.cm<sup>2</sup> d'électricité ; elle doit être relativement insoluble en acides. [26]

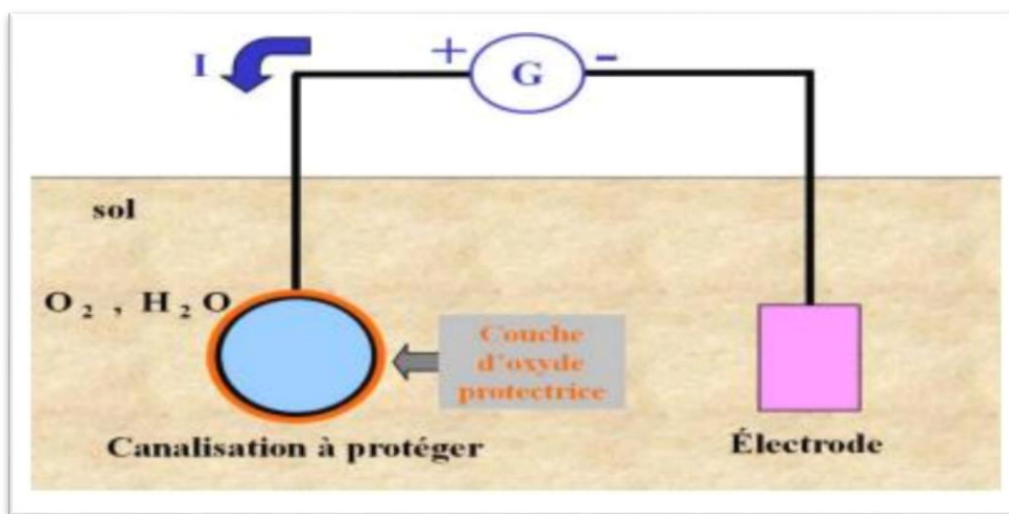


Figure 2. 9 Principe de protection anodique [26]

#### 6 Protection par inhibiteurs :

##### 6.1 Définition des inhibiteurs :

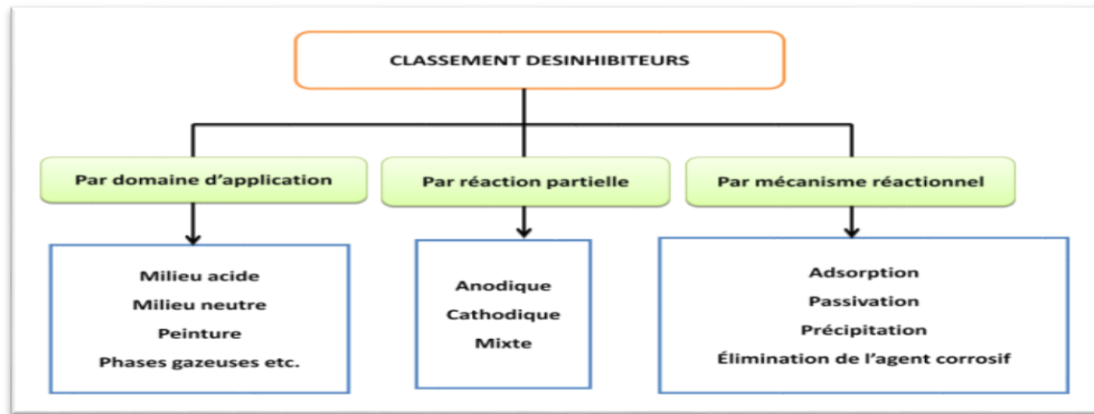
Les inhibiteurs de corrosion sont des substances chimiques qui sont ajoutées en petite quantité à un milieu corrosif pour réduire la vitesse de corrosion du matériau métallique. Ils agissent en interférant avec les réactions chimiques qui conduisent à la corrosion, ce qui ralentit le processus de détérioration du métal. Les inhibiteurs de corrosion sont utilisés dans une variété d'environnements où la corrosion peut se produire, tels que les milieux acides, les systèmes de vapeur, les eaux de refroidissement et d'autres applications industrielles. Ils peuvent être utilisés pour protéger différents types de métaux et alliages, en fonction des caractéristiques spécifiques du milieu corrosif et du matériau à protéger.

Les inhibiteurs de corrosion peuvent agir de différentes manières pour prévenir la corrosion. Certains inhibiteurs créent une couche protectrice sur la surface du métal, formant ainsi une barrière physique entre le métal et le milieu corrosif. D'autres inhibiteurs peuvent modifier les propriétés du milieu corrosif, rendant le milieu moins réactif envers le métal et ralentissant ainsi les réactions de corrosion. Certains inhibiteurs peuvent également agir en supprimant les réactions électrochimiques nécessaires à la corrosion. [28]

##### II .6.2. Les classes d'inhibiteurs :

Les inhibiteurs peuvent être classés selon différents critères :

- Par domaine d'application.
- Par réaction partielle.
- Par mécanisme réactionnel. [28]



**Figure 2. 10** Classements d'inhibiteur de corrosion [28]

### 6.1.1 Par domaine d'application :

Tout à fait, les inhibiteurs de corrosion peuvent être classés en fonction de leur utilisation dans des milieux aqueux, organiques ou gazeux. Dans le cas des inhibiteurs de corrosion utilisés dans les milieux aqueux, leur sélection est souvent basée sur le pH du milieu. En milieu acide, les inhibiteurs de corrosion sont utilisés pour protéger les surfaces métalliques contre les attaques chimiques lors de procédures de décapage ou de détartrage. Ils agissent en formant une couche protectrice sur la surface du métal, empêchant ainsi la réaction corrosive avec le milieu acide. En revanche, dans les milieux aqueux neutres ou alcalins, les inhibiteurs de corrosion sont couramment utilisés pour protéger les conduites des circuits de refroidissement, les systèmes de distribution d'eau ou d'autres équipements exposés à des milieux aqueux. Ces inhibiteurs fonctionnent généralement en formant une couche protectrice sur la surface métallique, empêchant la corrosion due à la réaction électrochimique entre le métal et le milieu. [28]

### 6.1.2 Par électrochimie réaction partielle :

Selon leur influence sur la vitesse des réactions électrochimiques partielles, on distingue trois types d'inhibiteurs :

#### 6.1.2.1 Les inhibiteurs anodiques :

Ces inhibiteurs agissent en diminuant le courant sur la partie anodique de la surface métallique. Cependant, si le blocage est seulement partiel, il peut entraîner localement une augmentation Fig.4.2 classements d'inhibiteur de corrosion de la densité de courant sur ces surfaces, ce qui peut conduire à une corrosion localisée plus intense qu'en l'absence d'inhibiteur. Il est donc important de maintenir une concentration adéquate de l'inhibiteur au niveau de la zone métallique à protéger. [28]

#### 6.1.2.2 Les inhibiteurs cathodiques :

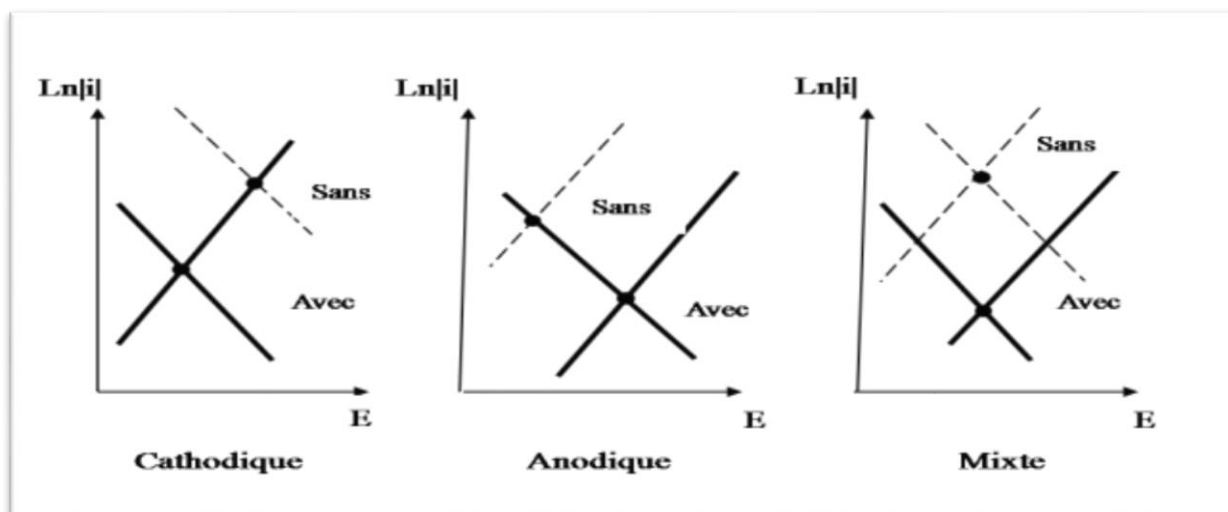
Ces inhibiteurs induisent une augmentation de la surtension cathodique, ce qui réduit le courant de corrosion. Bien que ces inhibiteurs ne stoppent jamais complètement la réaction de corrosion, ils



n'entraînent pas le risque de corrosion localisée. Ils ont souvent tendance à précipiter des sels ou des hydroxydes en raison de l'accumulation d'ions  $\text{OH}^-$  au niveau des cathodes. [28]

### 6.1.2.3 Les inhibiteurs mixtes :

Effectivement, un inhibiteur anodique agit en réduisant la densité de courant anodique partiel et en déplaçant le potentiel de corrosion dans le sens positif. Cela permet de diminuer la vitesse de la réaction d'oxydation anodique. De même, un inhibiteur cathodique diminue la densité de courant cathodique et déplace le potentiel de corrosion dans le sens négatif. Cela a pour effet de ralentir la réaction de réduction cathodique. Quant à un inhibiteur mixte, il a une influence sur les deux réactions électrochimiques, en diminuant la vitesse des deux réactions. Cependant, il a un impact limité sur le potentiel de corrosion global. La sélection du type d'inhibiteur dépendra de la nature de la corrosion à prévenir et des caractéristiques spécifiques de l'environnement corrosif. Chaque type d'inhibiteur a ses propres avantages et limitations, et il est important de choisir celui qui convient le mieux à la situation pour assurer une protection efficace contre la corrosion. Le choix de l'inhibiteur approprié dépendra du type de corrosion à prévenir, des caractéristiques du milieu corrosif et des propriétés du matériau métallique à protéger. Une compréhension approfondie des mécanismes de corrosion et des réactions électrochimiques est essentielle pour sélectionner efficacement l'inhibiteur le mieux adapté à chaque situation [28]



**Figure 2. 11** Diagramme d'Evans montrant le déplacement du potentielle de corrosion dû à la présence d'un inhibiteur anodique, cathodique ou mixte [28]

### 6.1.3 Par Mécanisme Réactionnel :

Effectivement, selon le mécanisme réactionnel, les inhibiteurs peuvent être classés en différentes catégories :

#### 6.1.3.1 Inhibition par adsorption et passivation :

Certains inhibiteurs se fixent à la surface métallique par adsorption, formant ainsi une couche protectrice qui limite l'accès des agents corrosifs. Cette adsorption peut être régie par une isotherme d'adsorption, qui décrit l'équilibre entre les espèces dissoutes et adsorbées. Certains inhibiteurs oxydants peuvent également induire une passivation spontanée du métal, formant une couche protectrice d'oxydes qui réduit la vitesse de corrosion. [28]

### **6.1.3.2 Inhibition par précipitation d'un film :**

Certains inhibiteurs provoquent la formation de films superficiels par précipitation de sels minéraux ou de complexes peu solubles. Ces films agissent en réduisant l'accessibilité de la surface métallique à l'oxygène et en bloquant partiellement la dissolution anodique, ce qui ralentit la corrosion. [28]

### **6.1.3.3 Inhibition par élimination de l'agent corrosif :**

Ce type d'inhibition est applicable principalement dans des systèmes fermés. Il consiste à éliminer l'agent corrosif du milieu, généralement par filtration ou traitement chimique, afin de réduire la vitesse de corrosion. Par exemple, dans les circuits d'eau chaude fermés des centrales thermiques, on peut pratiquer une inhibition par élimination de l'oxygène dissous. Chaque mécanisme réactionnel peut être utilisé en fonction de la nature de la corrosion et des caractéristiques de l'environnement corrosif. Le choix de l'inhibiteur et du mécanisme appropriés dépendra de l'application spécifique et des objectifs de protection contre la corrosion. [28]

## **6.2 Propriétés :**

En effet, les inhibiteurs de corrosion doivent présenter certaines propriétés essentielles pour être efficaces et adaptés à leur utilisation. Voici quelques-unes de ces propriétés :

### **6.2.1 Abaissement de la vitesse de corrosion :**

Un inhibiteur de corrosion doit réduire efficacement la vitesse de corrosion du métal protégé. Il doit empêcher ou ralentir les réactions chimiques responsables de la corrosion, ce qui permet de prolonger la durée de vie du matériau. [28]

### **6.2.2 Conservation des caractéristiques physico-chimiques :**

L'inhibiteur ne doit pas altérer les propriétés physiques et chimiques du métal à protéger. Il ne doit pas compromettre la résistance mécanique, la conductivité électrique, la ductilité ou toute autre caractéristique essentielle du matériau. [28]

### **6.2.3 Stabilité :**

L'inhibiteur doit être stable en présence des autres constituants du milieu corrosif. Il ne doit pas se décomposer, se désactiver ou réagir avec d'autres espèces chimiques présentes dans le milieu. Cela garantit une protection continue et fiable contre la corrosion. [28]

### **6.2.4 Compatibilité avec le milieu :**

L'inhibiteur ne doit pas perturber la stabilité des espèces chimiques présentes dans le milieu corrosif. Il ne doit pas induire de réactions indésirables ou d'interactions néfastes avec d'autres substances présentes dans le milieu. [28]

### **6.2.5 Stabilité thermique :**

L'inhibiteur doit être stable à la température d'utilisation prévue. Il doit conserver son efficacité même en présence de variations de température. [28]

### **6.2.6 Efficacité à faible concentration :**

L'inhibiteur doit être efficace même à des concentrations relativement faibles. Cela permet d'utiliser des quantités réduites d'inhibiteur, ce qui est économiquement avantageux et réduit les impacts environnementaux potentiels. [28]

## **II .6.3.7. Utilisation permanente ou temporaire :**

Les inhibiteurs peuvent être utilisés pour une protection permanente des matériaux, mais aussi pour une protection temporaire lors de situations spécifiques telles que le stockage, le décapage, le nettoyage ou lors d'usinages sévères. Ils peuvent être adaptés à différents scénarios d'application. En respectant ces propriétés, les inhibiteurs de corrosion peuvent jouer un rôle crucial dans la préservation et la durabilité des matériaux métalliques soumis à des environnements corrosifs. [28]

### **6.3 Mode d'action des inhibiteurs de corrosion :**

En ce qui concerne le mode d'action des inhibiteurs de corrosion, il n'existe pas de mécanisme unique qui s'applique à tous les systèmes de corrosion. Le mode d'action peut varier en fonction du type de métal, du milieu corrosif et de l'inhibiteur lui-même. Cependant, voici quelques modes d'action couramment observés :

#### **6.3.1 Interposition d'une barrière :**

Dans les milieux acides, l'inhibiteur peut former une couche adsorbée à la surface du métal, créant ainsi une barrière physique entre le métal et le milieu corrosif. Cette adsorption peut réduire la réactivité du métal en limitant son contact direct avec le milieu corrosif. [28]

#### **6.3.2 Renforcement d'une barrière préexistante :**

En milieu neutre ou alcalin, l'inhibiteur peut renforcer une couche d'oxyde ou d'hydroxyde déjà présente sur la surface du métal. Il peut favoriser l'extension de cette couche protectrice ou précipiter des sels pour renforcer les zones faibles de la couche d'oxyde. [28]

#### **6.3.3 Formation d'une barrière par interaction chimique :**

Dans certains cas, l'inhibiteur peut réagir chimiquement avec des espèces présentes dans le milieu corrosif pour former une barrière protectrice. Cette interaction chimique peut entraîner la formation de complexes insolubles ou de produits de précipitation qui empêchent la corrosion. [28]

#### **6.3.4 Stabilisation des films d'oxyde :**

Certains inhibiteurs peuvent stabiliser les films d'oxyde déjà présents sur la surface du métal. Ils peuvent favoriser la formation d'oxydes protecteurs et prévenir leur dissolution, contribuant ainsi à la protection contre la corrosion. [28]

#### **6.3.5 Participation aux réactions d'électrode :**

Certains inhibiteurs peuvent agir comme des catalyseurs, favorisant certaines réactions électrochimiques qui inhibent la corrosion. Ils peuvent faciliter la formation de produits de corrosion passivants ou diminuer la vitesse des réactions de corrosion. Il est important de noter que l'efficacité d'un inhibiteur de corrosion dépend de divers facteurs, tels que la température, le pH du milieu corrosif et la concentration en inhibiteur. Ces conditions peuvent influencer l'adsorption de l'inhibiteur sur la surface du métal et son interaction avec le milieu corrosif. [28]

### **6.4 Nature des inhibiteurs :**

#### **6.4.1 Inhibiteurs organiques :**

L'utilisation de molécules organiques est actuellement préférée à celle d'inhibiteurs inorganiques pour des raisons d'écotoxicité essentiellement. Les inhibiteurs organiques sont généralement constitués de sous-produits de l'industrie pétrolière. Ils possèdent au moins un centre actif susceptible d'échanger des électrons avec le métal, tel que l'azote, l'oxygène, le phosphore ou le soufre. Les groupes fonctionnels usuels, permettant leur fixation sur le métal, sont :

- Le radical amine (-NH<sub>2</sub>).
- Le radical mercapto (-SH).

- Le radical hydroxyle (- OH).
- Le radical carboxyle (-COOH). [29]

#### 6.4.2 Les inhibiteurs minéraux :

Les molécules minérales sont utilisées le plus souvent en milieu proche de la neutralité, voire en milieu alcalin, et plus rarement en milieu acide. Les produits se dissocient en solution assurant ainsi les phénomènes d'inhibition (anions ou cations). Les principaux anions inhibiteurs sont les oxo anions de type  $XO_4^{n-}$  tels les chromates, molybdates, phosphates, silicates....

Les cations sont essentiellement  $Ca^{2+}$  et  $Zn^{2+}$  et ceux qui forment des sels insolubles avec certains anions tels que l'hydroxyle  $OH^-$ . Le nombre de molécules en usage à l'heure actuelle va en se restreignant, car la plupart des produits efficaces présentent un côté néfaste pour l'environnement [29]

#### 6.4.3 Choix d'un inhibiteur :

Effectivement, le choix d'un inhibiteur de corrosion doit prendre en compte les normes et réglementations concernant la toxicité et l'impact sur l'environnement. Certains inhibiteurs, tels que les chromates de sodium et de potassium, ont été largement utilisés en raison de leur efficacité, mais ils posent des problèmes environnementaux et de santé en raison de leur toxicité. De même, l'utilisation d'inhibiteurs volatils peut présenter des risques pour la santé et l'environnement en raison de leur évaporation dans l'atmosphère. Au fil des années, des recherches ont été menées pour trouver des alternatives plus respectueuses de l'environnement et moins toxiques. Les sels minéraux tels que les vanadates, les molybdates, les silicates, etc., ont été étudiés comme des substituts potentiels aux chromates. Ces composés offrent des propriétés inhibitrices efficaces tout en étant moins préoccupants du point de vue de la toxicité et de l'impact environnemental. Ainsi, le choix d'un inhibiteur de corrosion doit prendre en compte non seulement son efficacité dans la protection contre la corrosion, mais aussi son innocuité pour la santé humaine et son impact sur l'environnement. Les normes et réglementations en vigueur visent à promouvoir l'utilisation d'inhibiteurs plus respectueux de l'environnement et moins toxiques, encourageant ainsi la recherche et le développement de nouvelles solutions de protection contre la corrosion. [28]

#### 6.5 Inhibiteurs utilisés pour le béton armé (état de l'art) :

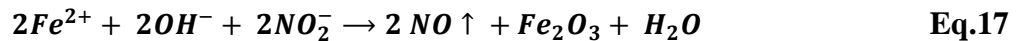
Les inhibiteurs de corrosion empêchent ou retardent la corrosion des armatures métalliques dans le béton. Ils sont utilisés soit par mesure préventive dans les nouvelles structures en béton armé (ajout dans l'eau de gâchage ou application à la surface de l'acier), soit par mesure curative (application à la surface du béton) afin de stopper l'évolution de la dégradation. Aujourd'hui, un certain nombre d'inhibiteurs sont disponibles sur le marché :

- Inhibiteurs inorganiques tels que les nitrites et le monofluorophosphate de sodium (MFP) utilisés comme inhibiteurs migrants sous forme de peinture liquide appliquée sur le béton durci.
- Composés organiques à base de mélanges d'alcanolamines, amines ou des acides aminés, ou sur la base d'une émulsion d'ester d'acide gras, utilisés à la fois en tant qu'inhibiteurs migrants (appliqués à la surface du béton) ou en tant qu'adjuvants (ajoutés en masse lors de la fabrication du béton).

Les premières molécules étudiées en tant qu'inhibiteur de corrosion furent les chromates, les phosphates, les hypophosphates, les nitrites et les fluorures. Dans ce qui suit, les inhibiteurs les plus utilisés dans le domaine des bétons armés sont présentés. [30]

### 6.5.1 Les nitrites :

Les nitrites de calcium et de sodium sont les plus anciens inhibiteurs utilisés en milieu béton. Ils sont utilisés par mesure préventive dans les nouvelles structures en béton armé (ajout dans l'eau de gâchage). Ces produits se retrouvent dans de nombreuses applications aux USA et au Japon, où ils ont prouvé leur efficacité. Les nitrites agissent comme agent de passivation en raison de leurs propriétés oxydantes. Ils se mettent en compétition avec les ions chlorure afin d'atteindre le substrat métallique, permettant ainsi de former (et/ou de maintenir) la couche d'oxydes passive selon les réactions suivantes :



Leur efficacité d'inhibition est liée au rapport  $[NO_2^{-}] / [Cl^{-}]$  qui doit être supérieur à 0,5. L'utilisation du nitrite de sodium fut abandonnée à cause des possibles alcali-réactions et de son influence négative sur les propriétés mécaniques du béton. En Europe, leur utilisation reste très restreinte du fait de leur toxicité. [30]

### 6.5.2 Monofluorophosphate (MFP) :

Restaurer un édifice en béton peut nécessiter des travaux considérables, voire le remplacement complet des armatures, ce qui risquerait de causer une détérioration du bâtiment concerné. Ce problème est d'autant plus préoccupant si l'édifice est classé, ancien, ou présente une architecture particulière.

Il est possible d'éviter une telle situation en utilisant un inhibiteur de corrosion MFP (MonoFluorophosphate de sodium), également connu sous le nom de phosphatation à froid. L'objectif ici est de stopper efficacement la corrosion.

Il est quasiment impossible de prévenir complètement ce phénomène. En effet, le béton se carbonate naturellement et des sulfates ou chlorures peuvent parfois être présents, ce qui fait partie du processus de vieillissement de l'édifice.

Cependant, il est envisageable de limiter les dégradations significatives en stoppant la corrosion avant qu'elle ne s'étende davantage. C'est précisément le rôle de l'inhibiteur de corrosion. [31]

#### 6.5.2.1 Comment fonctionne l'inhibiteur MFP :

Le fonctionnement de l'inhibiteur est en fait assez simple dans l'ensemble. Il consiste à appliquer sur les surfaces à traiter un gel, désigné comme gel porteur, qui est préalablement mélangé avec la molécule inhibitrice.

Ce gel doit rester humidifié pendant un certain temps afin que la molécule qu'il transporte puisse être absorbée par capillarité. Une fois à l'intérieur, cette molécule entre en contact avec les armatures et déclenche une réaction chimique avec l'acier. Cette réaction aboutit à la formation d'un film protecteur constitué de phosphates de fer et d'oxydes ferriques. [31]

### 6.5.3 Les inhibiteurs organiques :

Dans les années 50, les inhibiteurs organiques ont été développés pour leur utilisation dans l'industrie pétrolière et à partir de 1990 leur application s'est élargie au domaine du béton. Les alcanolamines et

amines ainsi que leurs sels et leurs acides organiques et inorganiques sont utilisées dans la formulation des mélanges complexes d'inhibiteurs de corrosion. L'application de ces inhibiteurs organiques est largement étudiée dans la littérature, aussi bien dans le béton que dans les solutions synthétiques représentatives de la solution interstitielle du béton. Toutefois, leur mécanisme d'action reste sujet à discussion. L'inhibiteur organique s'adsorbe sur la surface, empêchant ainsi la dissolution de l'acier. D'autres auteurs pensent que l'inhibiteur organique bloque les réactions cathodique et anodique se produisant à la surface de l'acier en contact avec la solution porale. L'efficacité des inhibiteurs organiques est directement liée à leur capacité d'adsorption qui est fonction de la nature et de l'état de surface du métal ainsi que du milieu corrosif. Le Tableau 1.3 présente un compte rendu des différents inhibiteurs utilisés au cours de ces vingt dernières années. [30]

**TAB 1.3. Différents inhibiteurs utilisés dans le béton armé en présence de chlorures et/ou de sulfates [30]**

<b>Inhibiteur</b>	<b>Méthodes d'analyse</b>	<b>Milieu</b>	<b>Mode d'action</b>
Imidazoline Quaternary Amonium Salt (IQS)	Mesures électrochimiques, analyse de surface par XPS	Solution interstitielle de béton + 3,5 % NaCl	Adsorption de la molécule à la surface conduisant à une diminution du potentiel et du courant de corrosion
Ethylenediaminetetraacetic acid disodium salt ( $C_{10}H_{18}N_2Na_2O_{10}$ )	Analyse statistique des résultats électrochimiques	Solution interstitielle de béton + NaCl ou $H_2SO_4$	Adsorption chimique ou chimisorption
Zinc gluconate (ZG)	DRX, SEM, mesures électrochimiques (EIS, courbes de polarisation)	Solution interstitielle de béton + 3,5 % NaCl	Influence la formation et la stabilité de la couche d'oxydes formée par les ions $Fe^{2+}$

$\omega$ -benzoyl alcanoic acids	XPS, mesures électrochimiques	NaOH+ $H_2SO_4$	Adsorbé à la surface
3-(4-((Z)-indolin-3-ylideneamino)phenylimino)indolin-2-one	Perte de masse, mesures électrochimiques (EIS, courbes de polarisation)	HCl 1M	Adsorption, isotherme de Langmuir Inhibiteur mixte
Ethanolamine ( $H_2NC_2H_4OH$ ) Methyldiethanolamine ( $CH_3N(C_2H_4OH)_2$ ) Triethanolamine ( $N(C_2H_4OH)_3$ )	Capillarité	Mélange avec différents rapports eau/ciment + NaCl	Bloque les pores du béton, induisant une diminution de la pénétration des ions chlorure.
D-sodium Gluconate	Mesures électrochimiques : EIS, courbes de polarisation	Solution interstitielle de béton + 0,1 M NaCl	Compétition entre l'adsorption des anions gluconate et des ions chlorure à la surface de l'armature
Aminoalcool	Mesures électrochimiques (EIS, analyses de surface)	Solution interstitielle de béton + NaCl	Inhibiteur mixte

#### 6.5.4 Les inhibiteurs verts :

La demande du marché en inhibiteurs verts ne cesse d'augmenter ; c'est la raison pour laquelle les études et la recherche de nouveaux inhibiteurs est en plein essor. Ces nouveaux inhibiteurs verts sont synthétisés ou extraits d'herbes aromatiques, de feuilles ou de graines, ou plus encore sécrétés par des bactéries. Le Tableau 1.4 regroupe différents inhibiteurs verts utilisés pour l'acier doux dans différents milieux. [30]

**TAB 1.4. Différents inhibiteurs verts utilisés pour l'acier doux [30]**

<b>Inhibiteur</b>	<b>Méthodes d'analyse</b>	<b>Milieu</b>	<b>Mode d'action</b>
Argemone mexicana	UV, Analyses de surface, mesures électrochimiques	HCl 1 M	Adsorption isotherme de Langmuir Inhibiteur mixte
Argane		HCl 1 M	Adsorption, isotherme de Langmuir
Mentha pulegium	Perte de masse, mesures électrochimiques (EIS, courbes de polarisation)	HCl 1 M	Inhibiteur cathodique, isotherme d'adsorption
Aloe vera	Spectrophotométrie infrarouge	$H_2SO_4$	Adsorption chimique isotherme
Justicia gendarussa	Perte de masse, AFM	HCl 1 M	Inhibiteur mixte Adsorption, isotherme de Langmuir
Acide caféique	Perte de masse, EIS, Raman	0,1 M $H_2SO_4$	Inhibiteur anodique
Phyllanthus niruri	Perte de masse	1 M HCl $H_2SO_4$	Isotherme de Temkin
Mangue, orange, fruit de la passion, écorces de noix de cajou	Perte de masse, mesures électrochimiques (EIS, courbes de polarisation)	1 M HCl	Adsorption, isotherme de Langmuir
Caféine	mesures électrochimiques (EIS, courbes de polarisation)	Ethanol	Inhibiteur mixte Isotherme de Langmuir et de Dubinin Radushkevich



Thym, coriandre, hibiscus, anis, cumin, et cresson	mesures électrochimiques (EIS, courbes de polarisation)	1 M HCl and 0,5 M $H_2SO_4$	Adsorption, isotherme de Langmuir
Safoutier	Gravimétrie et mesures électrochimiques	1 M HCl $H_2SO_4$	-
Thé vert et Riz	Perte de masse, mesures électrochimiques (courbes de polarisation)	0,1 M HCl	Inhibiteur cathodique
Acides extraits D'andrographis pani Culata	Perte de masse, mesures électrochimiques (EIS, courbes de polarisation)	HCl	Adsorption, isotherme de Langmuir
Combretum bracteosum	Gravimétrie	$H_2SO_4$	Adsorption, isotherme de Frumkin
Olive	Perte de masse, mesures électrochimiques (voltamétrie cyclique, courbes de polarisation)	2 M HCl	Adsorption, isotherme de Langmuir
Grenade	Gravimétrie et mesures électrochimiques	1 M HCl 0,5 $H_2SO_4$	Adsorption, isotherme de Langmuir Inhibiteur mixte
Piper guineense	Gravimétrie et mesures électrochimiques (EIS)	1 M HCl 0,5 $H_2SO_4$	Adsorption, isotherme de Langmuir Inhibiteur mixte

Nombreux sont les inhibiteurs verts utilisés pour l'acier doux, mais leur application dans le cas du béton armé reste très restreinte. Ont étudié l'effet inhibiteur de Vernonia amygdalina par des mesures électrochimiques et gravimétriques (perte de masse) et ont conclu l'effet inhibiteur à faible concentration même en présence d'une concentration élevée en chlorures dans le béton. L'utilisation d'extraits de noix de kola, de ses feuilles et de son écorce a aussi un effet inhibiteur de corrosion ; leur adsorption empêche les ions chlorure d'accéder à la surface de l'armature. Ont utilisé l'extrait de la plante Bambusa arundinacea comme inhibiteur de corrosion, cet extrait présente de bonne caractéristique d'adsorption, il stabilise les hydrates et les silicates de calcium (CSH), ce qui empêche la transformation de l'hydroxyde de calcium en calcite. Aussi, son effet bloqueur de pores, prévient l'aération différentielle du béton qui favorise la corrosion de l'acier. Ont utilisé des techniques électrochimiques afin d'étudier l'effet de différentes concentrations d'extraits de feuilles de Anthocleista djalensis sur la corrosion des armatures métalliques immergées dans un milieu agressif (3,5 % NaCl) simulant le milieu marin. Ils ont montré le pouvoir inhibiteur de cette plante et ont conclu son mécanisme d'action suit le modèle d'adsorption de Langmuir. Ont suivi la variation de masse d'un béton en présence de 0,5 M de NaCl et ont déduit une augmentation de masse en fonction du temps d'immersion due à la corrosion. En présence de liqueur extraite de la plante de banane, cette augmentation est d'autant moins importante que la concentration en liqueur ajoutée est élevée. De leur côté, Ont montré que l'ajout de 0,2 % d'extrait de banane permettait de diminuer le potentiel et le

courant de corrosion d'un acier doux immergé dans une solution représentative de la solution interstitielle de béton et contenant des chlorures. [30]

### **7 Conclusion :**

Dans ce chapitre On conclut que, les inhibiteurs aident à ralentir le processus de corrosion et à préserver l'intégrité des métaux. Leur utilisation est une méthode essentielle dans nombreux secteur industriels pour protéger les équipements, les structures et les infrastructures contre les effets destructeurs de la corrosion.

En investissant dans la lutte contre la corrosion par l'utilisation d'inhibiteurs, on peut non seulement prolonger la durée de vie des matériaux métalliques, mais aussi réduire les coûts de maintenance et améliorer la durabilité des installations.

**CHAPITRE III : PARTIE EXPERIMENTALE ET  
INTERPRETATION DES RESULTATS**

## 1 Introduction

La corrosion des armatures dans le béton armé est un problème significatif qui peut compromettre la stabilité et la durabilité des structures. Dans ce chapitre on traite la partie matériaux et méthodes de notre travail. Nous commençons par décrire les caractéristiques des matériaux utilisés, ensuite nous présentons la technique utilisée pour mesurer la corrosion des armatures dans le béton armé, ainsi que les stratégies de prévention et de réparation pour maintenir l'intégrité des structures.

## 2 Les composants de béton utilisé :

### 2.1 Type des granulats :

Le terme "granulat" désigne généralement un matériau solide inerte, tel que du sable, du gravier, de la pierre concassée ou des agrégats utilisé dans la fabrication du béton et d'autres matériaux de construction, Ces matériaux sont généralement de taille variable entre 0 et 125 mm, Nous avons utilisé des granulats proviennent de carrière de TARGA d'où un mélange de sable (0/4 et 0/2) et un gravier de dimension 3/8 et 8/16



**Figure 3. 1** Type des granulats (sec) utilisé (photo prise par les auteurs)

### 2.2 Les essais concernant les granulats :

#### 2.2.1 Analyse granulométrique des granulats :

L'analyse granulométrique est une méthode utilisée pour déterminer la distribution des tailles des particules dans un échantillon de granulats ou d'autres matériaux granulaires. Les dimensions sont comprises entre **0.063** et **125 mm**, On appelle :

- **REFUS** : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.
- **TAMISAT** : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

#### 2.2.2 Module de finesse NF EN 12620 :

Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat.

Le module de finesse est calculé de la même façon que la norme [NFP 18-540] sauf que la colonne de tamis utilisés est constituée de la série 0,125 - 0,250 - 0,5 - 1 - 2 - 4 mm.

$$M_F = \frac{1}{100} \sum \text{refus cumules en\% des tamis [0.125, 0.250, 0.500, 1, 2, 4 mm]} \text{ [voir ANNEXE A]}$$



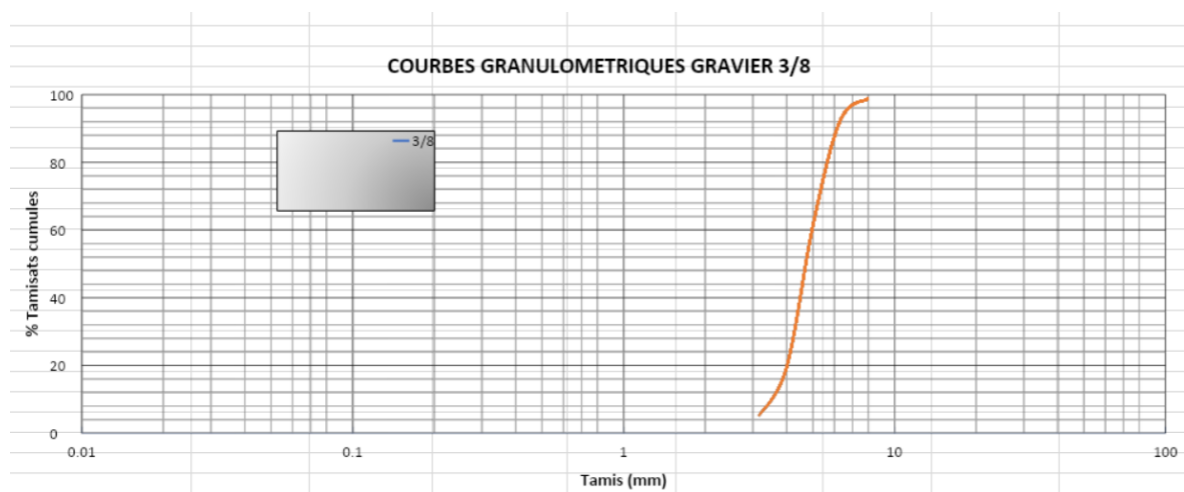
**Figure 3. 2** Tamiseuse d'analyse granulométrique (photo prise par les auteurs)

- Gravier 3/8 :

Poids initial d'échantillon Sec : 1000 g

**Tableau 3. 1** Résultats de l'analyse granulométrique de gravier (3/8)

Tamis	Refus partiel	Refus cumulé	% Refus	% Tamis
8	11.59	11.59	1.16	98.84
6.3	64.93	76.52	7.65	92.35
5	309.53	386.05	38.61	61.39
4	418.7	804.75	80.48	19.52
3.15	145.46	950.21	95.02	4.98
Le fond	49.79	1000	100	0



**Figure 3. 3** Analyse granulométrique de gravier (3/8)

- **Sable 0/4 :**

Poids initial d'échantillon Sec : **1000 g**

**Tableau 3. 2** Résultats de l'analyse granulométrique de sable (0/4)

Tamis	Refus partiel	Refus cumulé	% Refus	% Tamis
<b>4</b>	2.73	2.73	0.275	99.03
<b>2</b>	341.73	344.46	34.45	65.55
<b>1</b>	251.34	595.8	59.58	40.42
<b>0.5</b>	133.21	729.01	72.90	27.10
<b>0.25</b>	91.81	820.82	82.08	17.92
<b>0.125</b>	47.66	868.46	86.85	13.15
<b>Le fond</b>	131.40	999.86	99.98	0.02

- **Sable 0/4 corrigé : (tamisée à tamis 2mm)**

Poids initial d'échantillon Sec : **1000 g**

**Tableau 3. 3** Résultats de l'analyse granulométrique de sable (0/4) corrigé

Tamis	Refus partiel	Refus cumulé	% Refus	% Tamis
<b>4</b>	0	0	0	100
<b>2</b>	8.6	8.6	0.86	99.14
<b>1</b>	360.3	368.9	36.89	63.11
<b>0.5</b>	210.2	579.1	57.91	42.09
<b>0.25</b>	159.1	738.2	73.82	26.18
<b>0.125</b>	66.9	805.4	80.5	19.5
<b>Le fond</b>	194.7	999.8	99.98	0.02

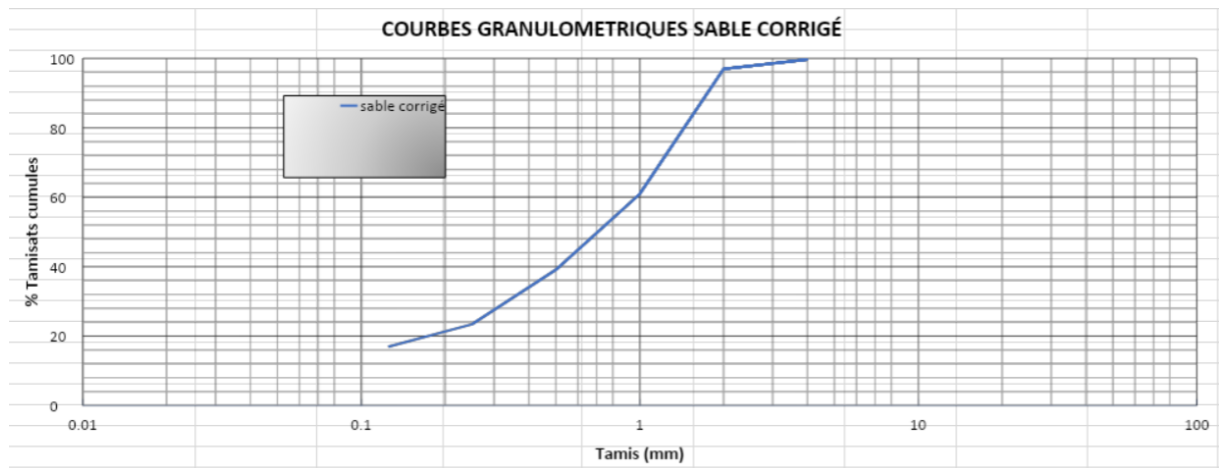


Figure 3. 4 Analyse granulométrique de sable corrigé

- Gravier 8/16 :

Poids initial d'échantillon Sec : 1000 g

Tableau 3. 4 Résultats de l'analyse granulométrique de gravier (8/16)

Tamis	Refus partiel	Refus cumulé	% Refus	% Tamis
16	3.40	3.4	0.34	99.66
12.5	47.57	50.97	5.09	94.91
10	349.34	400.31	40.03	59.97
8	399.03	799.34	79.93	20.07
Le fond	200.65	1000	100	0

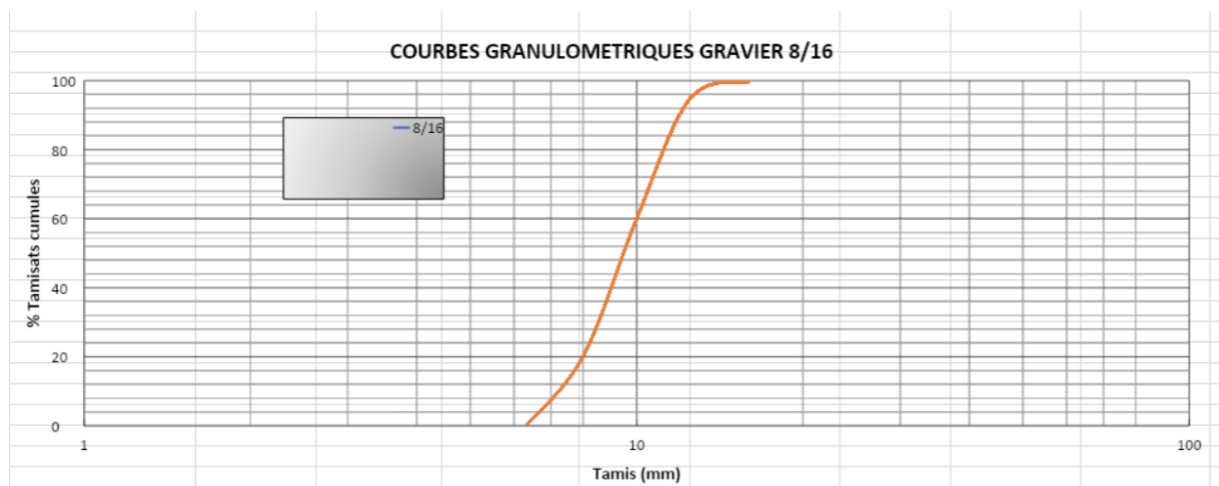


Figure 3. 5 Analyse granulométrique de gravier (8/16)

## 2.2.3 Masse volumique :

### 2.2.3.1 Masse volumique apparente ( $\rho_{app}$ ) :

La masse volumique est la masse de l'unité de volume du matériau à l'état naturel (pores et vides compris), en général, plus au moins poreux.

$$\rho_{app} = \frac{M_1 + M_2}{2V} \text{ avec } V = 1L$$

Après la manipulation [voir ANNEXE A] nous avons trouvé la masse volumique apparente

**Tableau 3. 5** Résultats de masse volumique apparente des granulats utilisés

Sable 0/4	Sable corrigé	Gravier 3/8	Gravier 8/16
$\rho = 1.725 \text{ g/l}$	$\rho = 1.69 \text{ g/l}$	$\rho = 1.342 \text{ g/l}$	$\rho = 1.360 \text{ g/l}$



**Figure 3. 6** Essai de la masse volumique apparente (photo prise par les auteurs)

### 2.2.3.2 Masse volumique absolue ( $\rho_{abs}$ ) :

La masse spécifique est la masse de l'unité de volume de la substance entièrement compacte (sans pores).

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_1 + V_2}$$

Pour la détermination de la masse volumique absolue des granulats on à utiliser la méthode de l'éprouvette graduée [voir ANNEXE A]

**Tableau 3. 6** Résultats de masse volumique absolue des granulats utilisé

Sable 0/4	Sable corrigé	Gravier 3/8	Gravier 8/16
$\rho = 2.727 \text{ g/ml}$	$\rho = 2.61 \text{ g/ml}$	$\rho = 2.5 \text{ g/ml}$	$\rho = 2.5 \text{ g/ml}$





Figure 3. 7 L'essai de la masse volumique absolue (photo prise par les auteurs)

### 2.2.4 Essais d'équivalent de sable NA455 (NF P 18-589) :

Cet essai, est utilisé de manière courante pour évaluer la propreté d'un sable utilisé pour la composition du béton, est effectuée sur la fraction d'un granulat passant au tamis à maille de 5 mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, qui flocculent.

La valeur de l'équivalent de sable (ES) est le rapport, multiplié par cent de la hauteur de la partie sableuse sédimentée à la hauteur totale du flocculat et de la partie sableuse sédimentée.

Ensuite, préparez une quantité de solution lavante (100 ml) que vous versez dans un cylindre gradué, puis ajoutez la sable tamisé (120 g). Utilisez un agitateur pur mélanger le sable et la solution lavante.

Après 30s de mélange, laissez la suspension reposer pendant 30 minutes, puis mesurez les éléments suivants :

a) Sable 0/4 :

$$h_1 = 4.2$$

$$h_2 = 3.4$$

$$\frac{h_2}{h_1} \times 100 = \frac{3.4}{4.2} \times 100 = 80.95\%$$

b) Sable 0/4 corrigé :

$$h_1 = 4.2$$

$$h_2 = 3.5$$

$$\frac{h_2}{h_1} \times 100 = \frac{3.5}{4.2} \times 100 = 83.33\%$$

Donc les granulats fins sont propres et conviennent à la fabrication de béton de haute qualité.

### 2.3 Ciment :

Le ciment utilisé, Le ciment Portland au calcaire GICA (NA 442/2013) CEM II A-L 42.5 N & R est un ciment gris contenant :

- 80 à 94 % de clinker ordinaire avec  $C3S \geq 55 \%$ ,
- 6 à 20 % de calcaire pur,
- 0 à 5 % de gypse en tant que régulateur de prise.

### 2.3.1 Domaines d'utilisation :

- Béton courant et armé ou faiblement armé.
- Produits préfabriqués en béton non armé (blocs, hourdis ...).
- Maçonnerie.
- Stabilisation des sols.
- Travaux en grande masse (barrages etc).

COMPOSITION		
Clinker (80 à 94) %	Ajout calcaire Catégorie A (06 à 20) %	Constituant secondaire (De 0 à 5) %
CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES		
	Temps de prise	Stabilité
VALEUR	$\geq 60$ minutes	$\leq 10$ MINUTES
CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES		
	Résistance à la compression à 02 j	Résistance à la compression à 28 j
42.5 N	$\geq 10.0$ N / mm <sup>2</sup>	$\geq 42.5$ (N / mm <sup>2</sup> )
42.5 R	$\geq 20.0$ N / mm <sup>2</sup>	$\leq 42.5$ (N / mm <sup>2</sup> )
CARACTÉRISTIQUES CHIMIQUE S		
	Teneur en sulfates (SO3)	Teneur en chlorures (Cl)
	$\leq 4.0$ %	$\leq 0.10$ %
PACKAGING		
Sacs 50 kg / Disponible en sac & Vrac		

Figure 3. 8 Fiche technique de ciment GICA CEM II /A-L 42.5 N

### 2.3.2 La masse volumique de ciment :

Nous avons utilisé la méthode de pycnomètre pour déterminer la masse volumique du ciment.

Tableau 3. 7 LA MASSE VOLUMIQUE ABSOLU DU CIMENT

La masse		La masse volumique Absolue
M1=344,14	M2=403,47	

<b>Le volume</b>		$\gamma = 3,01 \text{g/cm}^3$
V1=0,1	V2=20,2	

## 2.4 Eau :

L'eau de gâchage est l'eau utilisée pour mélanger les composants secs d'un mortier ou d'un béton afin de former une pâte homogène.

CA	MG	NA	K	CL	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	PH	T(°C)
37.7	23.7	145.05	11.06	203.85	25.50	1.29	8.4	24.30

**TAB III.9. LES CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DE L'EAU DE GACHAGE (ADE AIN T'EMOUCHENT)**

## 2.5 Acier :

Nous avons utilisé des barres métalliques solides de 10 cm de large et de bonne qualité. Nous avons nettoyé les barres avec une brosse spéciale métallique. Nous voulions nous assurer que les bars étaient tous propres et lisses. Nous avons coupé les barres en petits morceaux de 15 cm de long afin de pouvoir les utiliser pour la construction. (Voir FIG III.9).



a) avant le nettoyage



b) après le nettoyage

**Figure 3. 9 NETTOYAGE DES ACIERS (PRISE PAR LES AUTEURS)**

## 3 La formulation du béton ordinaire :

On a travaillé avec la méthode de ( **Dreux Gorisse** )

### 3.1 Résistance moyenne à 28 jours :

$$f_{cm} = f_{c28} \times 1.15 = 28.75 = 29 \text{MPa}$$

### 3.2 Rapport C/E :

#### 1.1.1 Détermination de G :

**Tableau 3. 8 Détermination de G**

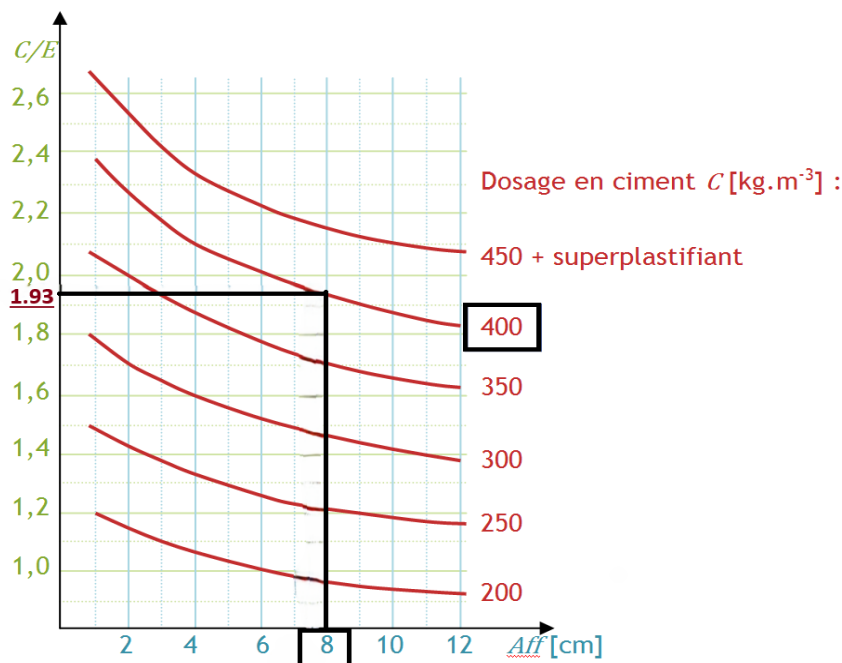
Qualité du granulats	Granulats fins D <sub>max</sub> ≤ 16mm	Granulats moyens 25mm < D <sub>max</sub> < 40mm	Granulats gros D <sub>max</sub> > 63mm
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, Courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.40	0.40	0.45

On a D<sub>max</sub> = 16mm et qualité du granulats bonne et courante, d'après le tableau III.10 on trouve que **G = 0.45**.

➤ Formule de Dreux Gorisse donne :

$$\frac{C}{E} = \frac{f_{cm}}{G \times \sigma_{28}} + 0.5 = \frac{29}{0.45 \times 45} + 0.5 = 1.93$$

### 3.3 Dosage en ciment :



**Figure 3. 10 GRAPHE POUR TROUVER LE DOSAGE DU CIMENT**

Aff=8cm

C/E=1.93

### 3.4 Calcul de E :

D'après (figure III.10), on a trouvé que **C = 400 kg/m<sup>3</sup>**, car on prend affaissement 8cm et C/E = 1.932

### 1.1.2 Correction sur E :

Tableau 3. 9 Correction sur E

Dimension maximale des granulats D en mm	5	10	16	25	40	63	100
Correction sur le dosage en eau	+15	+5	+4	0	-4	-8	-12

On a  $C/E = 1.932 \Rightarrow E = 400/1.932$  donc  $E = 207 \text{ L/m}^3$

- $E_C = E + 4\% \rightarrow E_C = 207 + 4\% = 215.32 \text{ L/m}^3$

### 3.5 Optimisation du squelette granulaire :

#### 3.5.1 Validation du sable :

Proportion du sable  $S_1 = \frac{MF_{opt} - MF_2}{MF_1 - MF_2}$  et proportion du sable  $S_2 = \frac{MF_1 - MF_{opt}}{MF_1 - MF_2}$  (\*)

Les équations (\*) viennent de deux équations traduisant que la somme des deux quantités de sable représente la quantité le sable utilisé, et que le module de finesse optimal est proportionnel à la quantité de chaque sable :

- Sable 1  $\Rightarrow MF = 3.36$  (sable grossier)
- Sable 2  $\Rightarrow MF = 2.52$  (sable fin)

$$S_1 + S_2 = 1 \quad \text{Et} \quad S_1 \cdot MF_1 + S_2 \cdot MF_2 = (S_1 + S_2) \cdot MF_{opt}$$

$$S_1 \cdot (MF_1 - MF_{opt}) + S_2 \cdot (MF_2 - MF_{opt}) = 0$$

$$S_1 = S_2 \cdot \frac{(MF_{opt} - MF_2)}{(MF_1 - MF_{opt})}$$

$$S_2 \cdot \left[ \frac{(MF_{opt} - MF_2)}{(MF_1 - MF_{opt})} + 1 \right] = 1$$

$$S_2 = \frac{(MF_1 - MF_{opt})}{(MF_1 - MF_2)}$$

Soit  $S_2 = \frac{(3.36 - 2.53)}{(3.36 - 2.52)} = 0.98$ , donc 98% de sable fin et 10% de sable grossier.

### 3.6 Calcul de YA :

Sable préférable :  $2.2 < MF < 2.8$

$MF = 2.62$  (sable corrigé)

Vibration	Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (sable en particulier)	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
<b>Dosage en Ciment</b>						
400 + Fluidité	-2	0	-4	-2	-6	-4
400	0	+2	-2	0	-4	-2
350	+2	+4	0	+2	-2	0
300	+4	+6	+2	+4	0	+2
250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

**Note 1 :** Correction supplémentaire  $K_s$  : Si le module de finesse du sable est fort (sable grossier), une correction supplémentaire sera apportée de façon à relever le point A, ce qui correspond à majorer le dosage en sable et vice versa. La correction supplémentaire sur K peut être effectuée en ajoutant la valeur  $K_s = 6 Mf - 15$  ( $Mf$  étant le module de finesse du sable qui peut varier de 2 à 3 avec une valeur optimale de l'ordre de 2.5).

**Note 2 :** Correction supplémentaire  $K_p$  : Si la qualité du béton est précisée pompable, il conviendra de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton de qualité courante. On pourra pour cela majorer le terme correcteur K de la valeur  $K_p = +5$  à  $+10$  selon le degré de plasticité désiré.

Valeure de terme correcteur k :

- $K=0$
- $K_s = 6MF - 15 = 6 * 2.62 - 15 = 0.72$
- $K_p = 0$

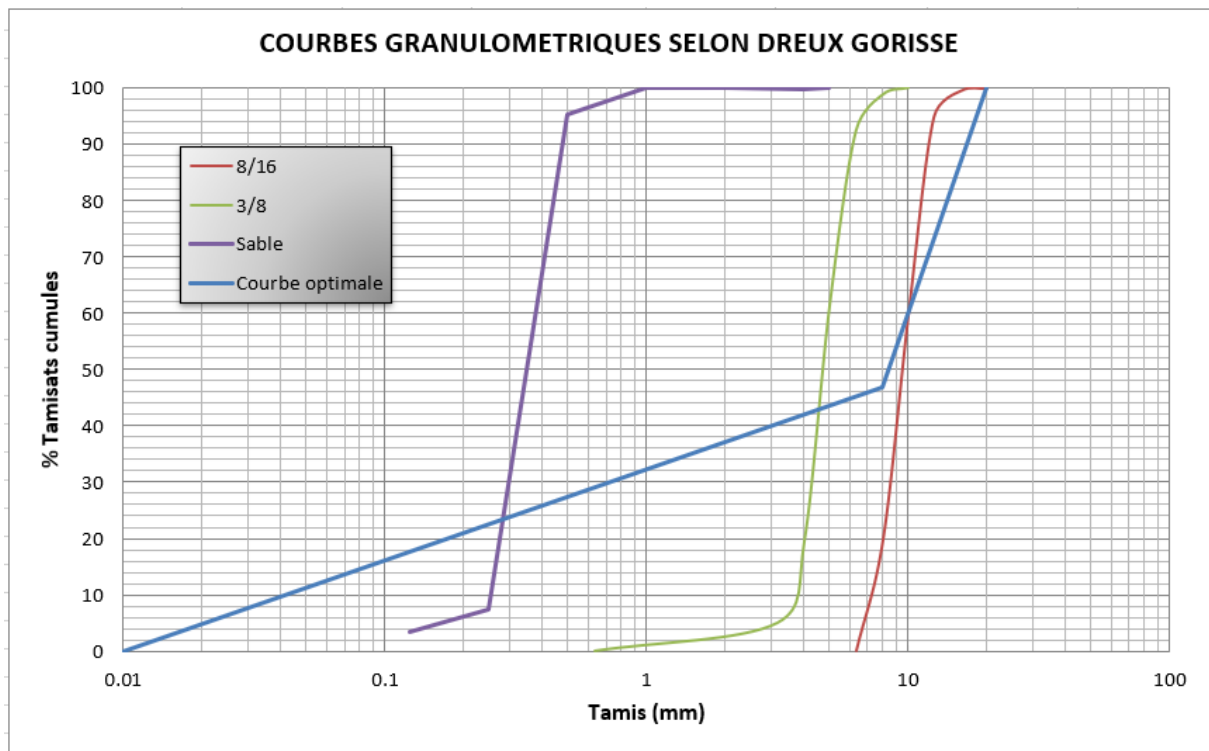
$$\Rightarrow y_A = 50 + \sqrt{16} + 0 + 0.72 + 0$$

$$y_A = 46.72$$

### 3.7 Calcul XA :

$$XA = \frac{D_{max}}{2} = \frac{16}{2} = 8\text{mm}$$

### 3.8 Pourcentage de sable et de gravier :



**Figure 3. 11** Courbes granulométriques selon Dreux Gorisse

Après l'analyse on a trouvé pourcentage de sable et de gravier comme suite :

- Pourcentage de gravier (8/16) : 53%
- Pourcentage de gravier (3/8) : 9%
- Pourcentage de sable : 38%

### 3.9 Coefficient de compacité g :

**Tableau 3. 10** EVALUATION DE L'OUVRABILITE PAR RAPPORT A L'AFFAISSEMENT AU cône d'Abrams

Plasticité	Serrage	Affaissement A (cm)
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5
Béton plastique	vibration courante	6 à 9
Béton mou	Piquage	10 à 13
Béton très mou	Piquage léger	13 à 15
Béton liquide (fluide)		≥ 16

Aff=6 béton plastique

**Tableau 3. 11 TABLEAUX POUR DETERMINER LA COEFFICIENT DE COMPACTITE**

Consistance	Serrage	$\gamma$ coefficient de compacité						
		D = 4	D = 8	D = 12.5	D = 20	D = 31.5	D = 50	D = 80
Molle	Piquage.....	0.750	0.780	0.795	0.805	0.810	0.815	0.820
	Vibration faible.....	0.755	0.785	0.800	0.810	0.815	0.820	0.825
	Vibration normale.....	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
Plastique	Piquage.....	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
	Vibration faible.....	0.765	0.795	0.810	0.820	0.825	0.830	0.835
	Vibration normale.....	0.770	0.800	0.815	0.825	0.830	0.835	0.840
	Vibration puissante....	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
Ferme	Vibration faible.....	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
	Vibration normale.....	0.780	0.810	0.825	0.835	0.840	0.845	0.850
	Vibration puissante....	0.785	0.815	0.830	0.840	0.845	0.850	0.855

**NOTA ( simplifié ) :**  
 Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés, sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :  
 Sable roulé et gravier concassé = - 0.01  
 Sable et gravier concassés = - 0.03  
 Pour des granulats légers on pourra diminuer de 0.03 les valeurs de  $\gamma$  qui correspondent dans ce tableau à des granulats denses ordinaires.

Après l'interpolation on a trouvé que  $g = 0.82$

$g$  corrigé =  $0.82 - 0.03 = 0.79$

### 3.10 Volume absolu des constituants :

#### 1.1.3 Volume absolu du ciment :

$$C = \frac{C}{3.01} \rightarrow \frac{400}{3.01} = 132.89 \text{ L/m}^3$$

#### 1.1.4 Volume absolu des granulats V (sable +gravier) :

$$V = 1000 * \gamma - c = 1000 * 0.79 - 132.89 = 657.11 \text{ L/m}^3$$

#### 3.10.1 Volume absolu du sable (V1=V%) :

$$\text{Volume de sable 1 (sable gros)} \rightarrow V_{S1} = 657.11 * 0.10 * 0.38$$

- $V_{S1} = 24.97 \text{ L/m}^3$

$$\text{Volume de sable 2 (sable fin)} \rightarrow V_{S2} = 657.11 * 0.9 * 0.38$$

- $V_{S2} = 224.73 \text{ L/m}^3$

#### 3.10.2 Volume absolu du gravier (V2=V%) :

- $V_g(8/16) = 657.11 * 0.53 = 348.27 \text{ L/m}^3$

- $V_g(3/8) = 657.11 * 0.09 = 59.14 \text{ L/m}^3$

### 3.11 Dosage des différents constituants pour 1 m<sup>3</sup> de béton :

Ciment		400
--------	--	-----



<b>Gravier (3/8)</b>	$G = v_1 \times \gamma_g = 59.14 \times 2.5$	<b>147.85</b>
<b>Gravier (8/16)</b>	$G = v_2 \times \gamma_g = 348.27 \times 2.5$	<b>870.675</b>
<b>Sable gros</b>	$S_1 = v_1 \times \gamma_g = 24.97 \times 2.722$	<b>67.96</b>
<b>Sable fin</b>	$S_2 = v_2 \times \gamma_g = 224.73 \times 2.61$	<b>586.55</b>
<b>Eau</b>		<b>215.32</b>

**TAB III.14. DOSAGE DES DIFFERENTS CONSTITUANTS POUR 1M<sup>3</sup> DE BETON**

### 3.12 Essai d'affaissement au cône d'Abrams :

**Tableau 3. 12 LES RESULTATS DE ESSAI D'AFFAISSEMENT**

La pâte	Affaissement
<b>01</b>	<b>60mm</b>
<b>02</b>	<b>50mm</b>



**Figure 3. 12 ESSAI D'AFFAISSEMENT DE CONE D'ABRAMES**

## 4 Préparation des échantillons :

### 4.1 Première étape :

Au chapitre 02, lors de l'attaque par les chlorures, il a été découvert que les chlorures s'infiltraient dans le béton pendant le coulage. Par exemple, lors du mélange de l'eau avec le béton, il est possible que de l'eau de mer se mélange, surtout dans les zones proches de la mer. En tenant compte de cela, nous avons essayé de reproduire ces conditions dans notre éprouvette. Dans notre cas d'étude nous n'avons rien ajouté, le laissant dans son état normal.



**Figure 3. 13** *LES MATERIAUX UTILISES PRISE PAR LES AUTEURS*

#### **4.2 Deuxième étape :**

Nous avons utilisé deux types d'éprouvettes de béton cylindriques, l'une mesurant 80 Centimètres de large et l'autre mesurant 110 centimètres de large, toutes deux ayant une hauteur de 15 centimètres. Nous avons appliqué une armature HA 10 sur les deux éprouvettes afin d'obtenir un enrobage de 3,5 centimètres pour la première et de 5 centimètres pour la deuxième. Cet enrobage joue un rôle essentiel dans la protection du béton contre les éléments indésirables extérieurs. Conformément à la norme NF EN206-1, il est recommandé d'avoir un enrobage d'une épaisseur comprise entre 1,5 et 3 centimètres pour empêcher la pénétration de substances nocives à l'intérieur du béton. Il s'agit de la meilleure protection nécessaire pour les ouvrages en béton armé.



**Figure 3. 14** *Démoulage DES EPROUVETTES PRISE PAR LES AUTEURS*

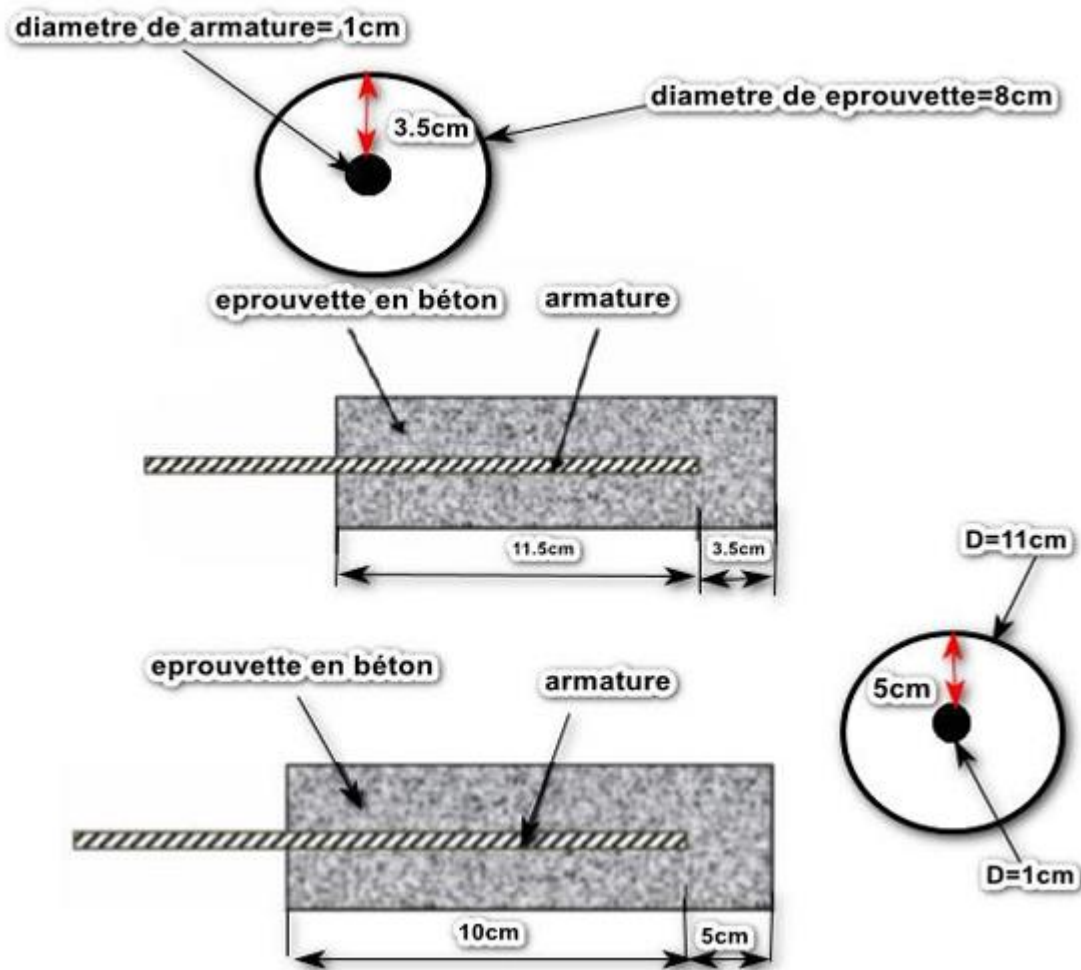


Figure 3. 15 SCHEMA D'UNE EPROUVETTE CYLINDRIQUE EN BETON ARME

#### 4.3 Les milieux utiliser :

On a utilisé diffèrent type de milieux dans notre confection pour une simulation réel de nos éprouvettes et les résultats soient logique :



Figure 3. 16 Diffèrent type des milieux utiliser pour les éprouvettes (photo prise par les auteurs)

- **Milieu 01 : CA(OH)<sub>2</sub>**

C'est un milieu simulant le béton, L'utilisation de CA(OH)<sub>2</sub> Portlandite pour assurer les même condition environnemental d'une structure en béton armé.

- **Milieu 02 : 3% NaCl**

C'est un milieu simulant l'environnement Agressive, On à ajouter 3% de NaCl à base de la concentration de chlorure dans le Méditerranée, donc les même conditions chimique et environnementale sont appliqué sur les éprouvettes.

- **Milieu 03 : 3% NaCl + inhibiteur sur armatures**

C'est un milieu qui contient un agent agressive (3% NaCl), On à ajouter un **inhibiteur** sur la surface **d'armature** pour avoir une protection contre la corrosion dans le milieu agressive, et comparer les résultats entre les deux.

- **Milieu 04 : 3% NaCl + inhibiteur sur surface d'éprouvette**

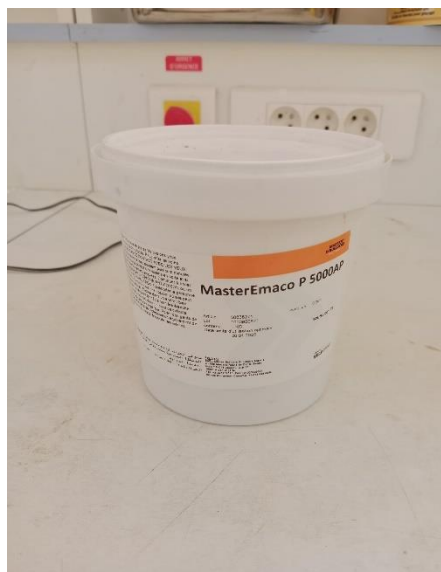
C'est un milieu qui contient un agent agressive (3% NaCl), On à ajouter un **inhibiteur** sur la surface **d'éprouvette** pour avoir une protection contre la corrosion dans le milieu agressive, et comparer les résultats entre les deux.

- **Milieu 05 : l'air**

Dans ce milieu on laisse les éprouvettes en l'air pour voir l'effet de CO<sub>2</sub> sur le béton.

#### 4.4 Inhibiteur :

La définition d'un inhibiteur de corrosion peut varier, mais celle adoptée par la National Association of Corrosion Engineers (NACE) est la suivante : un inhibiteur est « une substance qui, lorsqu'ajoutée en faible concentration à un environnement, ralentit la corrosion », Pour notre confection on a utilisé un type d'inhibiteur (figure III.17), et pour la fiche technique [voir ANNEXE B].



**Figure 3. 17** Inhibiteur utilisé (photo prise par les auteurs)

## 4.5 Interprétation des résultats :

### 4.5.1 Influence du milieu :

La figure III.18 et figure III.19 représente les mesures de potentiels de corrosion (mv) pour un enrobage d'éprouvette (3.5cm et 5cm) en fonction de temps (0 jour à 41 jour).

On remarque que le milieu 05 et le milieu 01 ils sont toujours supérieur aux autres milieux ce qui est logique car les deux milieux ne contient pas le NaCl qui est un agent agressive.

Par contre pour les milieux 02 et 03 et 04 les potentiels en tendance à varie dans des potentiels corrosifs ils donne 90% entre 50% à 90% de potentiels de corrosion (selon la norme ASTM C-876-91) [32].

On passe au milieu 05 (l'air) il est toujours dans des potentiels qui tendant vers probabilité 10% de corrosion (selon la norme ASTM C-876-91) [32], la corrosion par le  $CO_2$  est lente par apport NaCl donc les armatures ont reste pareil.

Et pour le milieu 01 ( $Ca(OH)_2$ ) il déjà protéger et pour le milieu 02 (3% NaCl), On remarque que tend toujours vers des potentiels plus négative qu'une probabilité de corrosion entre 50 à 90% (selon la norme ASTM C-876-91) [32], et pour le milieu 03(3% NaCl + inhibiteur sur armature) et milieu 04(3% NaCl + inhibiteur sur surface). On a utilisons un inhibiteur ( MasterEmaco P5000 AP) pour la protection contre la corrosion et on voit que le potentiels est toujours vers des probabilité de corrosion 50% à 90% (selon la norme ASTM C-876-91) [32], Par contre il est moins négatif que le milieu 02 alors la différence entre le milieu 03 et milieu 04 : pour milieu 03 on a appliqué l'inhibiteur sur l'armature les potentiels sont moins important pour l'inhibiteur sur la surface et on peut dire que l'application sur la surface est moins efficace pour l'application sur l'armature, le milieu 04 plus négatif ça veut dire l'inhibiteur sur surface n'a pas fonctionné il joue pas son rôle pour un enrobage 5cm.

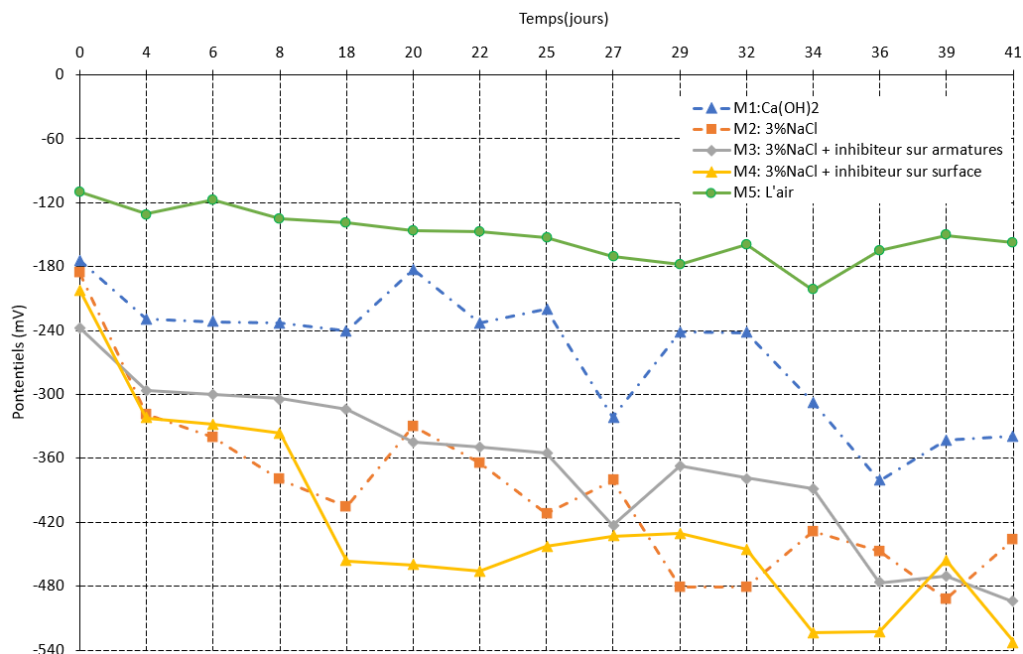
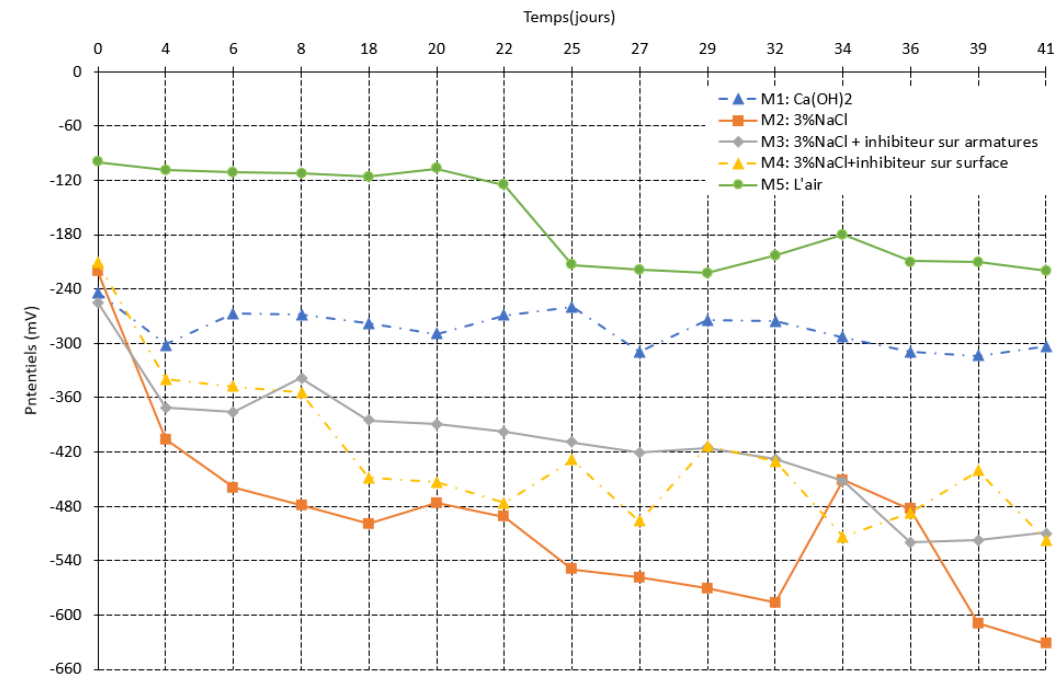


Figure 3. 18 Suivi du potentiel des éprouvettes  $e = 3.5cm$  pour béton ordinaire dans les cinq milieux



**Figure 3. 19** Suivi du potentiel des éprouvettes  $e = 5\text{cm}$  pour béton ordinaire dans les cinq milieux

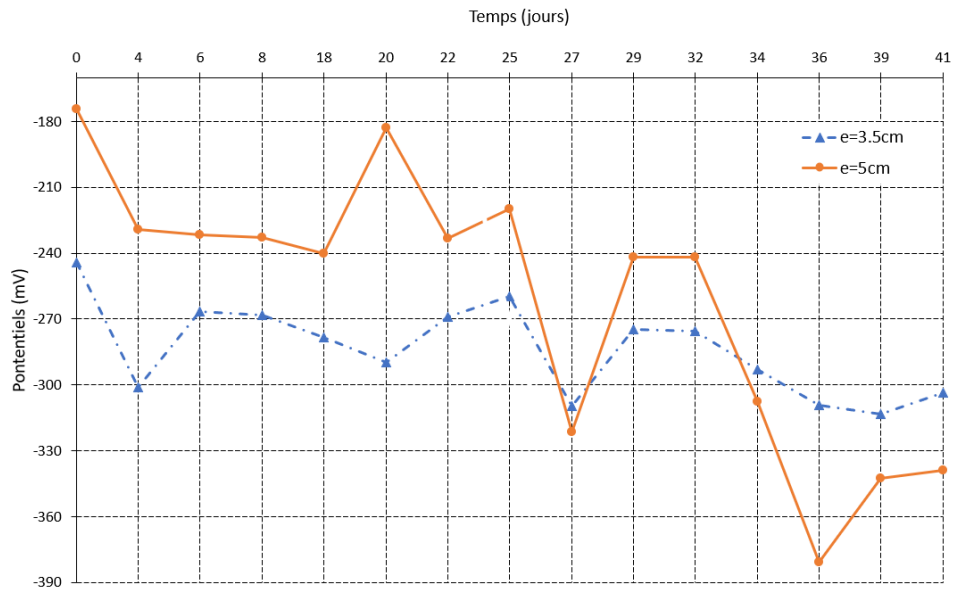
#### 4.5.2 Influence d'enrobage :

Les figures (III.20, III.21, III.22, III.23, III.24) représente les mesures de potentiels de corrosion (mv) pour un enrobage d'éprouvette (3.5cm et 5cm) en fonction de temps (0jour à 41 jour).

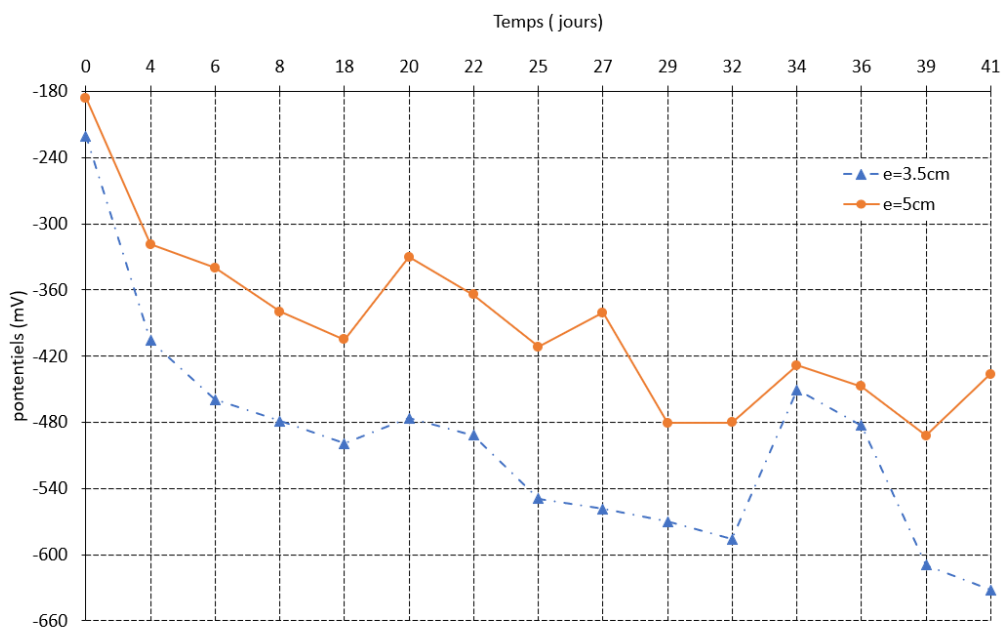
On remarque que le milieu 01 et 02, 03 et 05 ils sont la même tendance des potentiels et l'enrobage 5cm est toujours supérieur de l'enrobage 3.5cm.

Et pour le milieu 04 les enrobages 3.5cm et 5cm ils donne les même potentiels de corrosion, pour le milieu 02 (figure III.21) l'enrobage le plus important c'est le 5cm la norme [EN 206] dite que pour un milieu agressive l'enrobage doit toujours être supérieure à 40mm donc l'enrobage de 3.5cm c'est pas suffisant pour protéger les armatures.





**Figure 3. 20** Suivi du potentiel des éprouvettes  $e=3.5\text{cm}$  et  $e=5\text{cm}$  pour béton ordinaire dans milieu 1



**Figure 3. 21** Suivi du potentiel des éprouvettes  $e=3.5\text{cm}$  et  $e=5\text{cm}$  pour béton ordinaire dans milieu 2

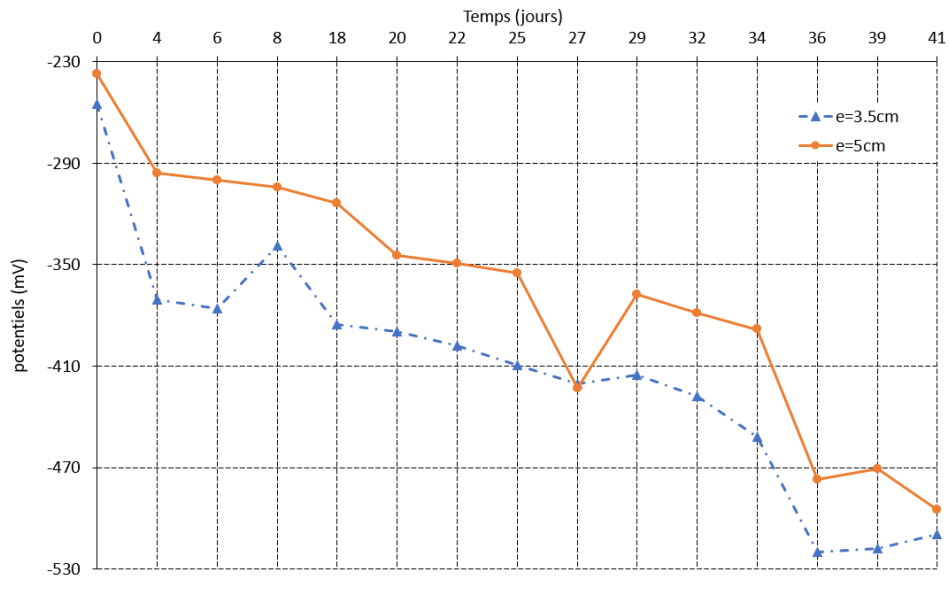


Figure 3. 22 Suivi du potentiel des éprouvettes  $e=3.5\text{cm}$  et  $e=5\text{cm}$  pour béton ordinaire dans milieu 3

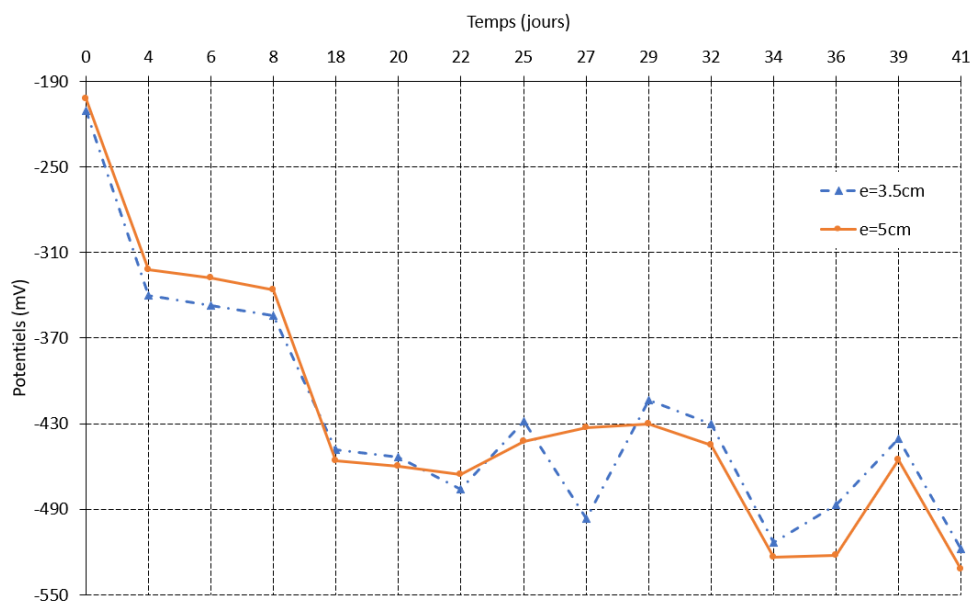
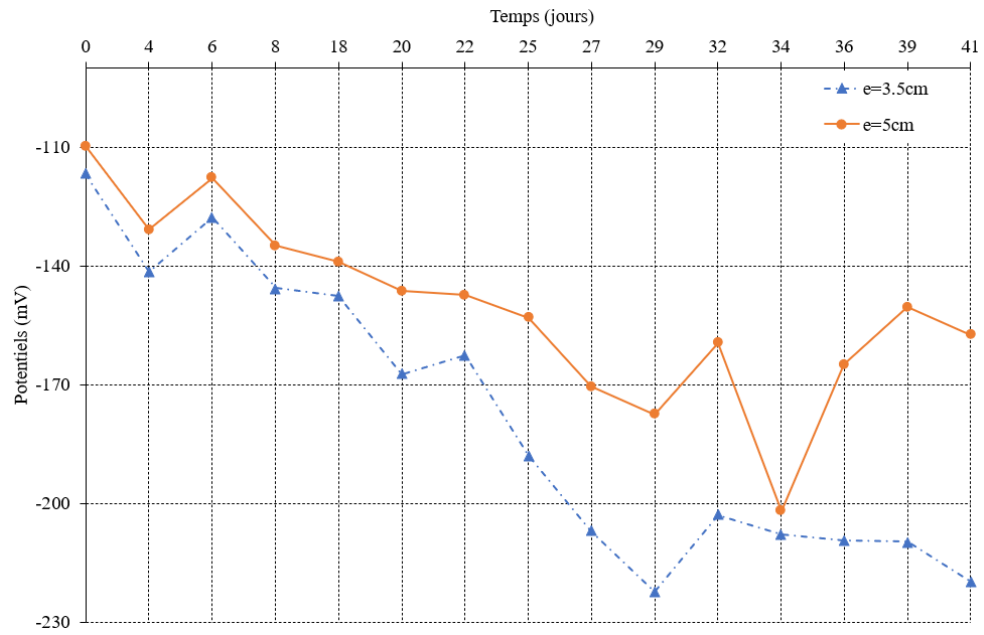


Figure 3. 23 Suivi du potentiel des éprouvettes  $e=3.5\text{cm}$  et  $e=5\text{cm}$  pour béton ordinaire dans milieu 4





**Figure 3. 24** Suivi du potentiel des éprouvettes  $e=3.5\text{cm}$  et  $e=5\text{cm}$  pour béton ordinaire dans milieu 5

## **CONCLUSION GENERALE**

La corrosion est un phénomène complexe et parfois difficile à expliquer, la résistance à la corrosion d'un métal ou d'un alliage dépend de nombreux facteurs inhérents au métal lui-même, à l'environnement de placement et aux conditions d'utilisation.

Dans ce mémoire, nous avons étudiée les techniques d'application des inhibiteurs de corrosion dans le béton armé. Les deux mécanismes les plus courants pour promouvoir le développement de la corrosion est la pénétration des chlorures et la carbonisation du béton. L'inhibiteur de corrosion est l'un des moyens de prévenir la corrosion électrochimique, il couvre une large gamme d'applications et de courants avantages facile à utiliser.

L'application des inhibiteurs de corrosion est l'une des technologies utilisées pour réduire le taux de corrosion en bloquant l'anode, la cathode ou les deux à la fois. Bien que de nombreuses études aient traité de l'impact de la protection pour prévenir la corrosion en ajoutant des inhibiteurs au béton frais pour une construction neuve, les comportements à long terme de ces bétons adjuvantés reste à étudier.

L'inhibiteur doit non seulement pénétrer dans les pores du béton, mais aussi réussir à atteindre une concentration suffisante pour inhiber la corrosion. L'inhibiteur de corrosion est une méthode mature de protection contre la corrosion des métaux. Ils ont l'ingéniosité d'être la seule intervention en milieu corrosif, ce qui en fait une méthode de contrôle de la corrosion facile à mettre en œuvre et peu coûteuse, pour autant que les produits utilisés soient adaptés avec un coût modéré.

Des recherches approfondies sur ces composés au cours des 50 dernières années ont conduit à des produits ou mélanges de produits spécifiques correspondant à un système de corrosion donné (couple métal-milieu corrosif). Cependant, chaque cas de corrosion étant encore un cas particulier, il est nécessaire de comprendre les données de fonctionnement de base de ces inhibiteurs, leurs restrictions d'utilisation et leur toxicité spécifique afin de pouvoir les utiliser dans une marge de sécurité suffisante. D'autre part, les inhibiteurs verts amis de l'environnement sont devenus importants en tant que sources d'énergie renouvelables, facilement accessibles et acceptables pour l'environnement pour divers milieux. C'est une riche source d'ingrédients avec des effets inhibiteurs très élevés. Les inhibiteurs verts peuvent être extraits de plantes, polymères, acides aminés, médicaments... Ces composés peuvent être utilisés comme inhibiteurs de métaux car ils s'adsorbent à la surface du métal et bloquent les sites actifs, réduisant ainsi la vitesse de corrosion en formant un film protecteur autour de la

barre d'acier, ils contrôlent la corrosion et agissent sur la surface de l'acier. Les voies de recherche récentes utilisant les inhibiteurs verts comme inhibiteurs de corrosion doivent synthétiser de nouveaux composés à haute efficacité d'inhibition de la corrosion.

Aussi, l'ajout des inhibiteurs minéraux au béton frais ou au mortier de réparation c'est une méthode très efficace pour protéger les barres d'acier de la corrosion elles sont convient également pour le traitement des murs extérieurs sur des surfaces en béton durci Et pour finir on a exposé les méthodes classiques d'évaluation de la corrosion :

la méthode de détection potentiel par l'utilisation d'appareil canin+ et les méthodes électrochimiques. L'étude des phénomènes liés à la corrosion ne se limite pas à l'analyse électrochimique ou gravimétrique. En effet, la mise en œuvre la plus proche des conditions réelles d'utilisation du matériau à protéger, ou d'autres technologies pouvant éclairer l'occurrence d'informations plus précises, afin de compléter les recherches électrochimiques. Le but c'est de décrire brièvement certaines des techniques conventionnelles utilisées dans la recherche sur la corrosion. Fondamentalement, nous pouvons utiliser la technique électrochimique, la technique gravimétrique ou la technique de la physique hétérotopique (telle que la technologie de chimie quantique).

Ainsi, des méthodes d'analyse de surface permettent d'identifier la morphologie de la surface métallique en présence d'inhibiteurs de corrosion en analysant le film protecteur formé en surface, la structure du film et l'identification des éléments chimiques présents et leur le pourcentage peut également être détecté par ces méthodes. Le domaine de la recherche relatif à l'inhibition de la corrosion ne cesse d'évoluer, de même les méthodes d'évaluation de la corrosion sont en évolution abondante pour une meilleure compréhension du processus de corrosion.

## **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] A. CHAFEI, Février 2009. [Online]. Available: [https://central.bac-lac.gc.ca/.item?id=MR53150&op=pdf&app=Library&oclc\\_number=667804763](https://central.bac-lac.gc.ca/.item?id=MR53150&op=pdf&app=Library&oclc_number=667804763).
- [2] V. T. NGUYEN, "Comportement des bétons ordinaire et à hautes performances," 19 Juillet 2013. [Online]. Available: [file:///C:/Users/dz%20laptops/Downloads/37237\\_NGUYEN\\_2013\\_archivage.pdf](file:///C:/Users/dz%20laptops/Downloads/37237_NGUYEN_2013_archivage.pdf).
- [3] t. béton. [Online]. Available: <https://travauxbeton.fr/dosage-beton/>.
- [4] D. abdelmohcene, "durabilité d'un béton exposé à un milieu agressive(acide sulfurique), influence de la forme des granulats (concassé-roulées)," 2015/2016. [Online]. Available: <file:///C:/Users/dz%20laptops/Downloads/165.pdf>.
- [5] P. Souchu, "La durabilité du béton," 27 MAI 2014. [Online]. Available: <http://doc.lerm.fr/retour-durabilite/>.
- [6] "MéTalTop.fr". france Patent 0470289300.
- [7] infociments, "Prévention des phénomènes de corrosion des armatures en acier dans le béton," Avril 2018. [Online]. Available: <https://www.infociments.fr/betons/prevention-des-phenomenes-de-corrosion-des-armatures-en-acier-dans-le-beton>.
- [8] " AquaPortail". FRANCE 2006.
- [9] "résistance de béton aux ambiances hivernales," [Online]. Available: <http://artoisgc.free.fr/wp-content/uploads/Gel-Degel.pdf>.
- [1 La Maison Saint Gobain, 2020. [Online]. Available: [https://www.lamaisonsaintgobain.fr/jardin-0\] terrasse/conseils/amenager-espace-exterieur/pourquoi-une-terrasse-fissure-raisons-solutions](https://www.lamaisonsaintgobain.fr/jardin-0] terrasse/conseils/amenager-espace-exterieur/pourquoi-une-terrasse-fissure-raisons-solutions).
- [1 G. HQE, "l'information Haute Qualité Environnementale," 05 25 2020. [Online]. Available: 1] <https://www.hqe.guidenr.fr/cible-2-hqe/index.php>.
- [1 F. CATHALA and P. TOULZA, *L'Agance*, no. WWW.fichieramepi.fr. 2]
- [1 "LaboratoireMde laATIÈRE," p. 2, JUILLET/AOUT 2007. 3]
- [1 Perkons, "PIXABAY," [Online]. Available: [https://pixabay.com/fr/photos/ciment-mur-la-4\] lixiviation-béton-2729625/](https://pixabay.com/fr/photos/ciment-mur-la-4] lixiviation-béton-2729625/).
- [1 Dr.Germain and c. O. R. Alpes, "RSI dans le béton," 16 mai 2008. [Online]. Available: 5] [https://piles.cerema.fr/IMG/pdf/6\\_presentation\\_rsi\\_phenomene\\_guide\\_cle522f93.pdf](https://piles.cerema.fr/IMG/pdf/6_presentation_rsi_phenomene_guide_cle522f93.pdf).
- [1 M. Benchikh. [Online]. Available: 6] [https://www.researchgate.net/?\\_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Ii9kaXJlY3QiLCJwYVdlIjojX2RpcmVjdCJ9fQ](https://www.researchgate.net/?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Ii9kaXJlY3QiLCJwYVdlIjojX2RpcmVjdCJ9fQ).

- [1 M. B. Fatima, "mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état de chimie," 7] 22 novembre 2006. [Online]. Available: file:///C:/Users/dz%20laptops/Downloads/Essais-sur-linhibition-de-corrosion-de-lacier%20xc-38-en-milieu-acide-HClO4-1M.pdf.
- [1 F. PARADIS, "INFLUENCE DE LA FISSURATION DU BÉTON SUR LQ CORROSION DES ARMATURES," 8] MARS 2009. [Online]. Available: file:///C:/Users/dz%20laptops/Downloads/26061.pdf.
- [1 M. Yacine and B. S. Mohammed, "mémoire de master génie civil," 26 06 2022. [Online]. 9] Available: file:///C:/Users/dz%20laptops/Downloads/Ms.Gc.Mebarki+Benbachir.pdf.
- [2 B. E. S.A., "BASA LAB," 20 7 2020. [Online]. Available: 0] <https://www.bernardoecenarro.com/fr/besa-lab/>.
- [2 B. T. Ikram and B. C. Chikhia, "Techniques d'Application des inhibiteurs de corrosion dans le 1] béton : Analyse et perspectives," juillet 2021. [Online]. Available: file:///C:/Users/dz%20laptops/Downloads/Ms.Gc.Benyahia+Benmansour.pdf.
- [2 F. VIDAL. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/20-Schema-dune-experience-2\] de-voltametrie-cyclique-L-electrode-de-reference-est\\_fig35\\_287490036](https://www.researchgate.net/figure/20-Schema-dune-experience-2] de-voltametrie-cyclique-L-electrode-de-reference-est_fig35_287490036).
- [2 "méthodes des corrosion," [Online]. Available: 3] <https://www.mcours.net/fra20/ibbsrapfra20aan419.pdf>.
- [2 "Fiche produit PCQ/CANIN," [Online]. Available: [http://test.sols-mesures.com/wp- 4\] content/uploads/2015/09/fiche-canin.pdf](http://test.sols-mesures.com/wp-content/uploads/2015/09/fiche-canin.pdf).
- [2 M. M. Abdelfattah, "Etude de L'effet inhibiteur d'un compose Amide," 09 juin 2019 . [Online]. 5] Available: <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/14375/1/Etude-de-Leffet-inhibiteur-dun-compose-Amide-vis-a-vis.pdf>.
- [2 K. Zoulikha and M. Lahouari, "Corrosion et protection des métaux," 2022-2023. [Online]. 6] Available: file:///C:/Users/dz%20laptops/Downloads/CPM\_ZK.pdf.
- [2 G. Kheira, "Etude de corrosion et protection des équipements de production du gaz brut à HASSI 7] R'mel," 27 05 2015. [Online]. Available: <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/28445/1/GHARBI%20kheira.pdf>.
- [2 K. M. Rahmen, "Etude de la corrosion et la protection cathodique par anodes sacrificielles," 06 8] 2023 . [Online]. Available: [http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/20853/1/Etude\\_de\\_la\\_corrosion\\_et\\_la\\_protection\\_cathodique\\_par\\_a\\_nodes\\_sacrificielles.pdf](http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/20853/1/Etude_de_la_corrosion_et_la_protection_cathodique_par_a_nodes_sacrificielles.pdf).
- [2 M. S. Latéfa, "ETUDE DE LA PERFORMANCE D'INHIBITEURS DE CORROSION A BASE DE 9] PHOSPHATE POUR LES CONSTRUCTIONS EN BETON ARME," 2013. [Online]. Available: file:///C:/Users/dz%20laptops/Downloads/Doctorat.Gc.SAIL.pdf.
- [3 S. Chakri, "Compréhension des mécanismes d'inhibition de la corrosion des armatures 0] métalliques des bétons par des molécules d'origine biologique," 5 avril 2016. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-01298039/document>.
- [3 NOVBÉTON, "restauration et traitement de béton". 183, Boulevard Jean Mermoz Patent 01 49 73

1] 83 67.

[3 Cherifi and wafa, "ESSAI SEMI DESTRUCTIFS SUR BETON DURCI," 2023/2024. [Online]. Available:

2] <https://mail.google.com/mail/u/0/?pli=1#inbox?projector=1Cherifi.wafa@outlook.fr>.



## **ANNEXES**

## Annexe A

Masse volumique apparent :

Les matériaux	M1	M2	M3	Mt
Gravier (8/16)	2762.5 g	2760.5 g	2758.2 g	2760.4 g
Gravier (3/8)	2734 g	2744 g	2749 g	2742.33 g
Sable (0/4)	3129.1 g	3119.8 g	3127.9 g	3125.6 g
Sable modifie	3092 g	3089 g	3096 g	3092.33 g
Ciment	2620.5 g	2631.4 g	2635.2 g	2629.1 g

Masse volumique absolue :

Les granulats	m	V1	V2
Gravier (8/16)	300 g	200 ml	320 ml
Gravier (3/8)	300 g	200 ml	320 ml
Sable (0/4)	300 g	150 ml	260 ml
Sable modifie	300 g	150 ml	265 ml

Module de finesse :

Les granulats	Mf
Gravier (8/16)	1.25
Gravier (3/8)	2.22
Sable (0/4)	3.36
Sable modifie	2.52

# Annexe B



## MasterEmaco P 5000AP

### Apprêt de protection, mono-composant à base de ciment à usage multiple

#### DESCRIPTION

Le **MasterEmaco P 5000AP** est un matériau prêt à l'emploi à base de ciment hydraulique, des charges sélectionnées, de résine redispersable et des additifs spéciaux. Destiné à la protection des armatures et structure en béton.

#### DOMAINE APPLICATION

- Lorsque l'acier est visible et que la profondeur de recouvrement disponible est inférieure à 10 mm
- Lorsque le béton est contaminé par des chlorures
- Dans les environnements critiques où une protection supplémentaire est spécifiée
- Lorsque les conditions sur le chantier ne permettent pas d'appliquer les mortiers de réparation immédiatement après le nettoyage de l'acier
- **MasterEmaco P 5000AP** peut également être utilisé pour améliorer les propriétés de liaison et d'application des mortiers de réparation appliqués à la main dans des épaisseurs et conditions extrêmes

#### AVANTAGE & PROPRIÉTÉS

- Excellentes propriétés anticorrosion, car il rétablit un environnement à pH élevé
- Contient des inhibiteurs de corrosion actifs pour mieux protéger l'acier
- Polymère modifié pour un collage supplémentaire sur l'acier
- N'affecte pas la résistance à la traction de l'acier d'armature
- Compatibilité parfaite avec les armatures en acier et les mortiers de béton ou de réparation
- A usage Multiple : peut également être utilisé comme primaire de liaison pour améliorer l'adhérence
- Faible teneur en chromate (Cr [VI] <2 ppm)

#### CARCTÉRISTIQUES

Aspect	Poudre
Couleur	Grise / Blanc cassé
Masse volumique	Approx. 1,8 g/cm <sup>3</sup>
Test de conformité ZTV-Sib90	
• Teneur totale en halogène • Stimulation de la corrosion • Résistance à la corrosion • Vieillessement accéléré 10 cycles DIN 50017 10 cycles DIN 50018 120 heures DIN 50021	< 0.05 < 10 < 1 (migration de la rouille sous le revêtement à partir du bord non revêtu)

	Pas de corrosion / Pas de délaminage / Max. largeur de fissure <0,1 mm
DPU	Approx. 60 minutes (Climat Froid) Approx. 20 minutes (Climat Chaud)
Température d'application (support et matériel)	min. 05 °C max. 35 °C
Force d'arrachement de la barre d'armature enduite par rapport à celle non-enduites	>80%

#### DOSAGE EN EAU

Quantité d'eau de mélange Approx. 0.22 à 0.26 litre/ Kg

#### CONSOMMATION MOYENNE

Environ. 1,5 kg de poudre sèche par m<sup>2</sup> et par mm d'épaisseur. Cette consommation est théorique et dépend de la rugosité du substrat. Il devrait être vérifié pour chaque travail particulier au moyen de tests «in situ ».

#### MODE D'EMPLOI

##### (a) Préparation du support

###### Béton et mortier :

- Toutes les surfaces doivent être propres, saines et exemptes de toutes traces d'huiles, de graisses, agent de démoulage et de produit de cure
- Enlevez le béton ou le mortier détérioré ou contaminé, par ex. par : grenailage ou par jet d'eau à haute pression.
- Saturer la surface de béton avec de l'eau tout réduisant l'excédent avant l'application

###### Armature et structure métallique :

- Toute les parties et couches corrodées doivent être éliminer avec des outils et méthodes appropriées avant l'application de **MasterEmaco P 5000AP**

##### (b) Préparation du mélange

- Dans un récipient propre et approprié, verser la quantité d'eau nécessaire puis ajouter progressivement **MasterEmaco P 5000AP** tout en

# MasterEmaco P 5000AP

## Apprêt de protection, mono-composant à base de ciment à usage multiple

- mélangé avec un malaxeur à faible vitesse jusqu'à obtention d'une consistance épaisse et homogène
- Utilisez uniquement de l'eau propre et non contaminée.
- Contactez le service technique de votre bureau MASTER BUILDERS SOLUTIONS pour connaître toute information requise non mentionnée.

### (c) Application

- La température du substrat doit être au minimum de +5°C et au maximum de + 35°C. Les températures minimales doivent être maintenues pendant l'application et pendant au moins 24 heures pour un durcissement optimal du produit
- Ne pas appliquer par temps pluvieux
- Appliquer le matériau mélangé en une couche uniforme d'au moins 1 mm d'épaisseur (environ 1,5 kg / m<sup>2</sup>) sur toute la circonférence du renforcement préparé à l'aide d'un pinceau.
- Lorsque la première couche a suffisamment durci (environ 30 à 90 minutes), appliquer une deuxième couche de 1 mm d'épaisseur. Il est important que cette deuxième couche ait suffisamment durci avant que le mortier de réparation ne soit appliqué.
- Lorsque vous appliquez le mortier de réparation par projection ou autre méthode mécanique, laisser la couche d'apprêt sécher 8 heures à 20°C

### NETOYAGE DES OUTILS

Le nettoyage des outils se fait avec de l'eau avant séchage

### REMARQUES

- Ne pas appliquer à des températures inférieures à + 5°C ni supérieures à + 35°C
- N'ajoutez pas de ciment, de sable ou d'autres substances pouvant affecter les propriétés du matériau.
- N'ajoutez jamais d'eau ou de mortier frais à un mélange de mortier qui a déjà commencé à prendre

### CONDITIONNEMENT

MasterEmaco P 5000AP est disponible en unité de 5Kg et de 1kg

### CONDITION DE STOCKAGE

Le produit MasterEmaco P 5000AP doit être stocké dans un endroit sec à l'abri de l'humidité et du gel, dans son emballage origine bien fermé.

Eviter le tassement excessif des sacs. Ne pas empiler plus de 10 sacs

### DURÉE DE VIE

MasterEmaco P 5000AP se conserve 12 mois dans son emballage à compter de la date de fabrication.

Pour les conseils spécifiques de stockage, consulter le service technique de BASF.

### PRÉCAUTION D'EMPLOI

Comme tous les produits contenant du Ciment portland, le MasterEmaco P 5000 AP peut provoquer des irritations. Eviter le contact avec les yeux et un contact prolongé avec la peau. En cas de contact avec les yeux, laver à grande eau pendant au moins 15 minutes et consulter un médecin. En cas de contact avec la peau, rincer soigneusement à l'eau courante. Si le produit est accidentellement ingéré consulter immédiatement un médecin. Se référer à la fiche de données de sécurité pour de plus amples informations

### CONTACT

Pour plus d'informations ou de questions, Contacter votre représentant local.

BASF Construction Chemicals Algeria  
Zone Industrielle Sidi Moussa, Route de Dar El Beïda,  
District 13 Ilot N° 15 Alger, Algérie  
Tel. +213 (0) 23 909 590  
Fax +213 (0) 21 909 591

Les informations données sont réelles, représentent notre savoir actuel et sont basées non seulement sur des essais en laboratoire mais également sur les expériences du terrain. Cependant, du fait de nombreux facteurs affectant les résultats, nous offrons ces informations sans garantie et aucune responsabilité ne pourra nous être imputée.

Nos fiches techniques ont pour objectif de vous conseiller d'après nos connaissances les plus récentes, nous nous réservons donc le droit de modifier à tout moment le contenu de celles-ci. L'emploi des produits doit être adapté aux conditions spécifiques à chaque situation. Pour toute précision complémentaire, nous vous conseillons de prendre contact avec notre département technique.

® = registered trademark of MBCC group in many countries

## Annexe C

### Les potentiels pour Milieu 01 :

Date	Jour	Ep1	Ep2	Ep3	Ep4	Ep5	Ep6
28-03-2024	0 jour	-256,5	-287,1667	-189,5	-145	-193,5	-184,167
31-03-2024	4 jour	-291,5	-293,1667	-319,167	-167,66667	-223,3333	-296,167
02-04-2024	6 jour	-293,16667	-322,5	-184	-170,66667	-226	-298
04-04-2024	8 jour	-294,66667	-324	-185,5	-172,16667	-227,6667	-299,167
14-04-2024	18 jour	-305	-333,3333	-196,833	-179	-233,1667	-308,333
16-04-2024	20 jour	-260,5	-372,3333	-236	-135,16667	-212,8333	-200,167
18-04-2024	22 jour	-295,83333	-316,3333	-194,5	-161,33333	-234,3333	-303,667
21-04-2024	25 jour	-289,16667	-306,5	-183,333	-155,16667	-218,1667	-286,167
23-04-2024	27 jour	-334,83333	-357,5	-236,833	-282	-338,3333	-344
25-04-2024	29 jour	-301,33333	-320,8333	-201,667	-174,66667	-240	-310,333
28-04-2024	32 jour	-301,83333	-321,3333	-203,5	-174,5	-240,5	-311
30-04-2024	34 jour	-315,83333	-324,8333	-238,833	-313,83333	-310,5	-298,167
02-05-2024	36 jour	-350,83333	-332,1667	-245,167	-345,16667	-458	-339,333
05-05-2024	39 jour	-350,16667	-333,3333	-257	-328,33333	-359,5	-339,667
07-05-2024	41 jour	-303,66667	-337,6667	-269,833	-342,83333	-336,6667	-337,667

### Les potentiels pour Milieu 02 :

Date	Jour	Ep1	Ep2	Ep3	Ep4	Ep5	Ep6
28-03-2024	0 jour	-241,667	-197,333	-222,5	-190,833	-187	-180
31-03-2024	4 jour	-343,333	-347,5	-526,5	-321,5	-311,167	-323,667
02-04-2024	6 jour	-387,667	-378,833	-612,333	-365,167	-326,167	-329
04-04-2024	8 jour	-401,667	-405,667	-628,833	-388,5	-340,833	-410,167
14-04-2024	18 jour	-417,333	-432,667	-647,667	-414	-374,333	-426,333
16-04-2024	20 jour	-358,333	-603,5	-467,167	-397	-284,333	-309,167
18-04-2024	22 jour	-374,833	-615,333	-484,5	-484,5	-296,333	-311,667
21-04-2024	25 jour	-507,667	-589	-551,333	-552,5	-301,667	-380,333
23-04-2024	27 jour	-517,667	-594	-563,833	-563,333	-309	-269,833
25-04-2024	29 jour	-528	-610,667	-572,167	-572,833	-321	-547,5
28-04-2024	32 jour	-538	-631,5	-588	-583,167	-337,833	-520,167
30-04-2024	34 jour	-493,167	-503	-356	-505,5	-316,833	-462,333
02-05-2024	36 jour	-550,167	-533,833	-364,833	-522,5	-322,667	-497,333
05-05-2024	39 jour	-552,833	-669,167	-606	-598,667	-351,333	-526,5
07-05-2024	41 jour	-567,667	-686,5	-641,833	-463,833	-352,333	-492,667

### Les potentiels pour Milieu 03 :

Date	Jour	Ep1	Ep2	Ep3	Ep4	Ep5	Ep6
28-03-2024	0 jour	-220,833	-296,833	-247,333	-200,167	-276	-236
31-03-2024	4 jour	-355	-381,5	-376,333	-279,167	-305,5	-303,833
02-04-2024	6 jour	-359,833	-386,333	-381,167	-283,5	-308,5	-308,667
04-04-2024	8 jour	-365,167	-390	-261	-288,5	-311,833	-311,833
14-04-2024	18 jour	-367,833	-394,5	-393,333	-292,667	-331	-317,667
16-04-2024	20 jour	-405	-400,167	-362,833	-329,833	-381	-323
18-04-2024	22 jour	-417,167	-423,5	-353,167	-333	-386,833	-328
21-04-2024	25 jour	-423,667	-430,5	-374,333	-338,667	-391,5	-335,333
23-04-2024	27 jour	-429,333	-383,167	-449,5	-350,167	-461,333	-458,333
25-04-2024	29 jour	-434,833	-443	-367,833	-351,333	-401,833	-349
28-04-2024	32 jour	-446,333	-455,167	-382,333	-363,333	-413	-359,667
30-04-2024	34 jour	-443,167	-461,167	-450,833	-369,833	-341,5	-453,5
02-05-2024	36 jour	-451,833	-562,333	-546,167	-551,167	-318	-561,667
05-05-2024	39 jour	-522,5	-489,167	-541,333	-463,5	-483	-465,333
07-05-2024	41 jour	-488,167	-487,5	-552,167	-446,833	-465,667	-571,333

### Les potentiels pour Milieu 04 :

Date	Jour	Ep1	Ep2	Ep3	Ep4	Ep5	Ep6
28-03-2024	0 jour	-199,667	-210	-222,833	-189,667	-197,833	-219,833
31-03-2024	4 jour	-295,5	-297,833	-426,5	-361,5	-321,167	-284,167
02-04-2024	6 jour	-303,667	-306	-432,333	-366,667	-328,167	-289,167
04-04-2024	8 jour	-310,833	-314,333	-437,667	-372,5	-336,5	-300,5
14-04-2024	18 jour	-320,167	-477	-547,833	-480,167	-441	-447,167
16-04-2024	20 jour	-324,5	-483,5	-553,167	-484,333	-445,333	-450,667
18-04-2024	22 jour	-379	-490	-558,333	-491,167	-450	-456,833
21-04-2024	25 jour	-310,333	-453	-522	-451	-440,667	-436,5
23-04-2024	27 jour	-378,5	-574	-537	-365,333	-346,667	-586,333
25-04-2024	29 jour	-306,667	-438,833	-495,667	-444,167	-416,833	-430,5
28-04-2024	32 jour	-312	-490,667	-487,667	-462,833	-424,5	-447,833
30-04-2024	34 jour	-345,5	-597,833	-597	-558,833	-457,5	-555,333
02-05-2024	36 jour	-353,667	-560,667	-547	-508	-517,667	-542,667
05-05-2024	39 jour	-323,833	-499,167	-498,333	-473,5	-435	-458,667
07-05-2024	41 jour	-450	-557	-546,167	-546,833	-518	-532,333

## Les potentiels pour Milieu 05 :

Date	Jour	Ep1	Ep2	Ep3	Ep4	Ep5	Ep6
28-03-2024	0 jour	-60,3333	-106,5	-132,833	-40,3333	-103,167	-185,833
31-03-2024	4 jour	-64,5	-113,667	-148,667	-44	-139,5	-209
02-04-2024	6 jour	-66,8333	-115,667	-149,667	-45,6667	-96,5	-211,167
04-04-2024	8 jour	-68,3333	-117,5	-151,167	-48,6667	-144	-212
14-04-2024	18 jour	-71,5	-122,833	-153,667	-54,8333	-143,5	-218,5
16-04-2024	20 jour	-82,8333	-85,3333	-152	-65	-146,667	-227,5
18-04-2024	22 jour	-78,1667	-133,333	-163,833	-63,1667	-149	-230
21-04-2024	25 jour	-288,167	-216,833	-134,667	-240,167	-72,1667	-147
23-04-2024	27 jour	-295	-221	-140,833	-247	-109,833	-154,833
25-04-2024	29 jour	-299	-227	-141	-250,5	-120	-162
28-04-2024	32 jour	-215,167	-237,833	-155,833	-129,833	-144,667	-203,833
30-04-2024	34 jour	-229,333	-186	-124,667	-294,667	-120,5	-190,667
02-05-2024	36 jour	-222,833	-244,167	-161,167	-135,667	-149,167	-210
05-05-2024	39 jour	-246	-243,667	-139,5	-160	-133,5	-157,833
07-05-2024	41 jour	-248,667	-263	-147,667	-174,167	-137,167	-161

