

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICHE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة

التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان
Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Civil

Spécialité : Structures

Par : MEBARKI Yacine

BENBACHIR Sidi Mohammed

Sujet :

**Application des inhibiteurs de corrosion aqueux sur des échantillons en
béton armé : Etude théorique.**

Soutenu publiquement, le 26 / 06 / 2022 , devant le jury composé de :

Mr HOUMADI Youcef	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Mr BEZZAR Abdelillah	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur
Mme SAIL Latefa	Professeur	Université de Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions avant tout, Dieu tout puissant qui nous a donné la santé, le courage, la volonté et la patience pour mener à bien ce travail. Nous voudrions remercier chaleureusement notre encadrant Mme SAIL Latefa, Professeur à l'université de Tlemcen, pour sa disponibilité, son aide, son soutien et ses précieux conseils.

Nous remercions les membres de jury, Mr HOUMADI Youcef, Professeur à l'université de Tlemcen qui nous a fait l'honneur de présider ce jury, ainsi que Mr BEZZAR Abdelillah Professeur à l'université de Tlemcen d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail. Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à tous les enseignants du département Génie civil qui ont contribué à notre formation d'ingénieur.

Enfin, à tous ceux ou celles qui nous apportés leurs soutiens de loin ou de près, qu'ils trouvent ici, l'expression de nos vives et sincères reconnaissances.

Dédicaces MEBARKI

Je dédie ce modeste travail,

A mes chers parents, pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements.

A mes sœurs. A mes amies et mes camarades, sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.

MEBARKI WAOTME

Dédicaces Benbachir

Tous d'abord, je remercie le bon Dieu qui m'a donné le courage pour arriver à ce stade de fin d'étude.

Je dédie ce mémoire de fin d'études à :

Mes parents, mes sœurs, mes amis et toute ma famille.

Benbachir Sidi Mohammed

Résumé :

Etant un phénomène naturel complexe, la corrosion a toujours constitué un problème industriel majeur, malgré les recherches scientifiques et technologiques avancées au fil des décennies, la corrosion actuellement provoque des dégradations sévères et affecte les structures en béton armé.

Parmi les différentes méthodes permettant d'éviter ou de prévenir la destruction et la dégradation de la surface du métal, apparaît l'application des inhibiteurs de corrosion comme une des meilleures méthodes pratiques. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail de recherche bibliographique qui traite l'application des inhibiteurs aqueux comme moyen de lutte contre la corrosion des armatures.

On s'est intéressé aux différents modes d'intégration des inhibiteurs de corrosion aqueux soit comme traitement en mode préventif, agissant directement sur l'armature par phosphatation ou galvanisation, et aussi comme ajout en lotion à l'eau de gâchage du béton; ou bien, en mode réparateur par injection sur l'armature du béton contaminé.

En outre, on a abordé l'utilisation des extraits aqueux d'inhibiteurs verts qui constituent à leur tour une bonne alternative, ils ont prouvé des efficacités remarquables contre la corrosion. De ce fait, on a cité les différentes techniques de mesures fréquemment utilisées telles que les mesures gravimétriques, les mesures électrochimiques et l'analyse de surface pour étudier la nature du film adsorbé sur la surface de l'acier.

Mots clés : Béton, Corrosion, Inhibiteurs aqueux, Modes d'intégration, Techniques de mesure

Abstract:

Being a complex natural phenomenon, corrosion has always been a major industrial problem, despite advanced scientific and technological research over the decades, corrosion currently causes severe degradation and affects reinforced concrete structures.

Among the various methods to avoid or prevent the destruction and degradation of steel surface, the application of corrosion inhibitors appears as one of the best practical methods. It is in this context that our bibliographical research takes part, which deals with the application of aqueous inhibitors as a means to face the corrosion of reinforcements.

We were interested to the different modes of integration of aqueous corrosion inhibitors either as treatment in preventive mode, acting directly on the reinforcement by phosphating or galvanizing, and also as an addition in lotion to the concrete mixing water; or, in repair mode by injection on the reinforcement of the contaminated concrete.

In addition, the use of aqueous extracts of green inhibitors has been discussed, which in turn constitute a good alternative, they have proven remarkable efficiencies against corrosion. Therefore, we have cited the various measurement techniques frequently used such as gravimetric measurements, electrochemical measurements and surface analysis to study the nature of the adsorbed film on the steel surface.

Key words: Concrete, Corrosion, Aqueous inhibitors, Integration modes, Measurement techniques.

ملخص

نظرًا لكونه ظاهرة طبيعية معقدة، فقد كان التآكل دائمًا مشكلة صناعية رئيسية ، على الرغم من البحث العلمي والتكنولوجي المتقدم على مدى العقود، يتسبب التآكل حاليًا في تدهور شديد ويؤثر على الهياكل الخرسانية المسلحة .

من بين الطرق المختلفة التي تجعل من الممكن تجنب أو منع تدمير وتدهور سطح المعدن، يظهر استخدام مثبتات التآكل كأحد أفضل الطرق العملية. في هذا السياق، يتناسب عملنا في البحث الجيولوجي ، الذي يتعامل مع تطبيق المثبتات المائية كوسائل لمكافحة تآكل الهياكل .

كان اهتمامنا بالأنماط المختلفة لاستعمال مثبتات التآكل المائية إما كعلاج في الوضع الوقائي ، والعمل مباشرة على التعزيز بالفوسفات أو الجلفنة ، وأيضًا كإضافته كمحلول إلى ماء خلط الخرسانة؛ أو في وضعية الإصلاح عن طريق الحقن على حديد الخرسانة الملوثة. بالإضافة إلى ذلك، تمت مناقشة استخدام المستخلصات المائية للمثبتات الخضراء، والتي بدورها تشكل بديلاً جيداً، فقد أثبتت كفاءة ملحوظة ضد التآكل. لذلك ، فقد استخدمنا تقنيات قياس مختلفة مثل قياسات الجاذبية والقياسات الكهروكيميائية وتحليل السطح لدراسة طبيعة الفيلم المتمز على سطح الفولاذ.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة، التآكل، المثبتات المائية، طرق الاستخدام ، تقنيات القياس.

TABLE DES MATIERES

Remerciements.....	i
Dédicaces	ii
Résumé	iv
Table des matières.....	vii
Liste des Figures.....	ix
Liste des Tableaux.....	xii
Introduction générale :	1
Chapitre 1 : Généralités sur la corrosion des armatures dans le béton	3
1.1 Introduction :	1
1.2 La corrosion des armatures dans le béton	1
1.2.1 Définition de la corrosion :.....	2
1.2.2 La carbonatation :.....	4
1.2.3 Action des chlorures :.....	6
1.2.4 Effets de la corrosion :	7
1.2.5 Les formes de la corrosion :.....	8
1.2.6 Les étapes de la corrosion :.....	11
1.3 Moyens de lutte contre la corrosion des armatures dans le béton	12
1.3.1 Protection du béton :.....	12
1.3.2 Protection des armatures:	15
1.3.3 Utilisation des inhibiteurs de corrosion:.....	17
1.3.4 Application des inhibiteurs de corrosion dans le béton :	19
1.4 Les remèdes contre la corrosion des armatures dans le béton:	22
1.4.1 La Ré-alcalinisation :.....	22
1.4.2 La déchloruration:.....	23
1.5 Conclusion :	23
Chapitre 2 : Notions sur les inhibiteurs de corrosion.	25
2.1 Introduction :	26
2.2 Généralités sur les inhibiteurs de corrosion	266
2.2.1 Définition et historique :	266
2.2.2 Conditions d'utilisation :	28

2.2.3	Modes d'utilisation :	28
2.2.4	Les Types d'inhibiteurs de corrosion :	29
2.2.5	Classification des inhibiteurs de corrosion :	33
2.3	Utilisation des inhibiteurs de corrosion aqueux dans le béton : Etat de l'art :	39
2.3.1	Modes d'application des inhibiteurs de corrosion dans le béton :	39
2.3.2	Application des Monofluorophosphates (MFP) :	42
2.3.3	Evolution de la recherche sur les inhibiteurs de corrosion aqueux dans le béton :	43
2.4	Conclusion	45
Chapitre 3:	Méthodes d'intégration des d'inhibiteurs de corrosion aqueux dans le béton	46
3.1	Introduction :	47
3.2	Méthodes de mesures des efficacités inhibitrices :	47
3.2.1	Les mesures gravimétriques :	47
3.2.2	Les mesures électrochimiques :	49
3.2.3	Méthodes d'analyses de surface:	55
3.2.4	Les isothermes d'adsorption :	56
3.3	Méthodes d'intégration des inhibiteurs aqueux dans le béton :	57
3.3.1	Le prétraitement :	59
3.3.2	Les bains d'immersion :	60
3.3.3	Lotions :	663
3.3.4	Les extraits aqueux :	65
3.4	Conclusion :	67
Conclusion générale :		69
Références bibliographiques		70

Liste des Figures

Chapitre 1 :

Figure 1.1 : Etat d'un ouvrage dégradé par la corrosion des armatures [Taché, 2017].....	4
Figure 1.2: Représentation schématique des processus de base de la corrosion des aciers dans le béton (Bagneux, 2002).....	6
Figure 1.3: Progression de la carbonatation (Oxand, 2002).....	7
Figure 1.4 : Carbonatation du béton	8
Figure 1.5: Corrosion induite par les chlorures dans le béton (Holcim, 2019).....	9
Figure 1.6: L'accumulation des produits de corrosion et l'éclatement de l'enrobage [https://www.technichem.be/, consulté le 22 mai 2022].....	11
Figure 1.7: Formes de la corrosion (BADAOU, 2003).....	12
Figure 1.8: Représentation schématique du cas des piqûres comme cas intermédiaire (BADAOU, 2003).....	13
Figure 1.9: Illustration des trois phases de dégradation des armatures dans le béton par le processus de corrosion (TUTTI, 1982).....	14
Figure 1.10: application de l'hydrofuge (Alain, 2015).....	16
Figure 1.11: Application de lasure sur toiture en béton (Aurenti, 2016).....	17
Figure 1.12: Béton imperméable. [www.betonix.be/beton-hydrofuge consulté le 20 mai 2022].....	17
Figure 1.13: Revêtement époxy anticorrosion. (ERSIGROUP, 2017).....	18
Figure 1.14: Protection cathodique par anodes sacrificielles (CEFRACOR.com)....	19
Figure 1.15: Mécanisme de protection de l'acier à l'aide du zinc. (Benmostefa, 2021) (controle-et maintenance).....	20
Figure 1.16: Création d'une barrière contre la pénétration des ions chlorures. (protection-acier.com).....	20
Figure 1.17: Classement des inhibiteurs de corrosion. (Bellal, 2020).....	21
Figure 1.18: Traitement de ré-alkalinisation. (Bouteiller, 2019).....	25
Figure 1.19 : Traitement de déchloruration. (Bouteiller, 2019).....	26

Chapitre 2 :

Figure 2.1 : Organigramme rassemblant la classification des inhibiteurs de corrosion.....	38
Figure 2.2 : Formation de couches barrières : a) cathodiques, b) anodiques sur la surface du métal (Boukili, 2015).....	41
Figure 2.3 : Action de l'inhibiteur migrateur dans le béton (Matthieu, 2008).....	43

Chapitre 3 :

Figure 3.1: Etapes de mesures gravimétriques (Abdelli, 2020).....	51
Figure 3.2: Mesures électrochimiques (Abdelli, 2020).....	52
Figure 3.3: Courbes OCP par durée d'immersion dans 1M Na ₃ PO ₄ (Sail, 2013).....	53
Figure 3.4 : Courbes potentiostatiques (Larfaïlo, 2015).....	54
Figure 3.5: Schématisation du courant de corrosion (I _{corr}) par la technique de Tafel plots (Sail, 2013).....	55
Figure 3.6: Courbes de voltamétrie cyclique (Brunel,2020).....	56
Figure 3.7: Diagrammes de Nyquist obtenu pour l'acier au carbone immergé dans la solution à différentes concentration en DMEA (Hassoune, 2018)	57
Figure 3.8 : Organigramme décrivant les modes d'intégration les inhibiteurs aqueux.....	61

Liste des Tableaux

Chapitre 1 :

Tableau 1.1 : Résumé des travaux réalisés sur l'application des inhibiteurs de corrosion dans le béton ou les milieux simulant le béton par ordre chronologie.....23

Chapitre 2 :

Tableau 2.1 : Travaux de recherche sur les inhibiteurs aqueux dans le milieu béton.....46

Chapitre 3 :

Tableau 3.1 : Isothermes d'adsorption.....60

Tableau 3.2 : Application des inhibiteurs aqueux en mode de prétraitement.....62

Tableau 3.3 : Application des inhibiteurs aqueux en mode d'immersion.....65

Tableau 3.4 : Application des inhibiteurs aqueux en mode de lotion.....66

Tableau 3.5 : Application des inhibiteurs aqueux en mode d'extraits aqueux.....68

Introduction Générale

Introduction générale

Le matériau béton armé est l'élément clé dans la construction, son emploi large et intensif en Génie Civil soulève le problème de sa qualité et de sa durabilité. Le béton armé est composé à la fois de béton et d'armatures métalliques, il leur assure une protection chimique et physique contre les agents agressifs acheminés par l'environnement en raison de sa forte alcalinité (pH d'environ 12).

Cependant, beaucoup de ces ouvrages construits en béton armé souffrent de problèmes de corrosion des armatures. Cette pathologie constitue actuellement l'une des causes principales de l'endommagement ou de la ruine des ouvrages. Ces problèmes s'ils sont détectés trop tard, raccourcissent la durée de vie de l'ouvrage, et tant que la durabilité est un objectif pour tout ingénieur, la prévention devient alors essentielle.

Les armatures se corrodent lorsqu'elles sont exposées à l'air chargé en polluants par exemple; les chlorures existants en milieu marin et les sulfures en milieu industriel. Plus on s'éloigne de la mer, plus l'action corrosive diminue, car la concentration des sels marins décroît. Le vent et le soleil ont une action contradictoire sur la corrosion des armatures; le vent a une action activante quand il transforme l'eau de mer en brouillard salin, et il a au contraire une action retardante quand il dilue les polluants dans l'atmosphère, en réduisant la concentration ou bien quand il favorise l'évaporation de l'humidité de la surface exposée. Le soleil retarde le processus de corrosion puisqu'il provoque l'évaporation de l'humidité, mais il l'active avec l'augmentation de la température qui favorise par l'effet de la dilatation thermique le détachement des produits de corrosion.

Les connaissances sur les conditions et l'évolution de la corrosion des aciers à l'intérieur de la matrice cimentaire, en bon état ou dégradée et fissurée, ont beaucoup progressé. En effet, il existe des méthodes pour le diagnostic, sur l'état de conservation des matériaux et des techniques pour protéger ou réparer les structures dégradées qui sont prises en compte et décrites dans des textes conformes aux règles de l'art.

Durant ces dernières décennies, l'intégration des inhibiteurs de corrosion dans l'eau de gâchage du béton ou par traitement des armatures a constitué l'intérêt de plusieurs chercheurs, ces produits chimiques ou à base de plantes ont prouvé une efficacité remarquable du point de vue décalage de l'amorçage de la corrosion.

L'objectif de ce présent travail est d'exposer parmi les moyens de protection contre la corrosion des armatures, ceux les plus efficaces et économiques dont les inhibiteurs de corrosion constituent une large gamme. On a opté à l'étude des inhibiteurs de corrosion aqueux et leur utilisation dans les ouvrages en béton armé.

Alors pour quelles raisons, le choix des inhibiteurs de corrosion comme moyen de protection contre la corrosion des armatures ? et pourquoi a-t-on opté à l'étude des inhibiteurs aqueux particulièrement ? On va répondre à ces questionnements à travers ce modeste travail de recherche.

Ce mémoire de fin d'études est scindé sur trois chapitres :

Dans le 1^{er} chapitre, nous discuterons des généralités sur la corrosion des armatures, ses causes et ses conséquences ainsi que les procédés préventifs et réparatifs de lutte contre cette pathologie.

Dans le 2^{ème} chapitre, on présentera les inhibiteurs de corrosion et leur classification, tout en mettant l'accent sur l'utilisation des inhibiteurs de corrosion aqueux dans le béton à travers les recherches antérieures.

Le 3^{ème} chapitre sera consacré aux techniques d'application des inhibiteurs de corrosion aqueux dans le béton et les méthodes de mesure.

Notre travail sera clôturé par une conclusion générale avec des perspectives d'étude.

Chapitre 1 :
**Généralités sur la corrosion des
armatures dans le béton.**

1.1 Introduction :

A part les métaux nobles tel que l'or ou le platine que l'on peut trouver à l'état natif, et qui ne se corrodent pratiquement pas, les autres métaux sont dans la nature sous forme de minerais (oxyde, sulfure, carbonate...), la transformation d'un minerai en métal exige un apport extérieur d'énergie et l'on comprend implicitement que cette énergie sera libérée à nouveau dans le cas d'une transformation inverse du métal en son oxyde, son sulfure ou en son carbonate.

Les métaux ont donc tendance à retourner à l'état initial, état d'équilibre avec les milieux ambiants où ils se trouvaient. Un métal se corrode donc parce que la transformation chimique qui accompagne la corrosion dégage de l'énergie, c'est une réaction qui obéit à des lois thermodynamiques connus, et dont la vitesse obéit aux lois de la cinétique chimique.

Les éléments métalliques qui composent les ouvrages de génie civil sont au contact soit du béton ou d'un coulis d'injection à base de ciment, soit de l'atmosphère dont ils sont souvent séparés par un écran tel qu'une peinture, de l'eau, des sols, ils peuvent se dégrader sous l'action de ces milieux environnants suivant des processus divers, tel que l'enrouillement des aciers, lorsque certaines conditions sont réunies .

L'importance de cette dégradation des ouvrages est assez évidente puisqu'elle influe directement sur leurs durabilités comme le montre la figure1.1.



Figure 1: Etat d'un ouvrage dégradé par la corrosion des armatures (Taché,2017)

1.2 La corrosion des armatures dans le béton :

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 [<https://corrosioninstrument.com/gn/>, consulté le 24 Mai 2022].

1.2.1 Définition de la corrosion :

La corrosion est définie comme étant la destruction d'un matériau par réaction chimique ou électrochimique avec son milieu environnant. Cela signifie que la corrosion suppose un système matériaux-milieus environnant susceptible d'entrer en réaction.

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) (Amrani, 2012).

La Fig 1.2 montre une représentation schématique des processus de base de la corrosion des aciers dans le béton

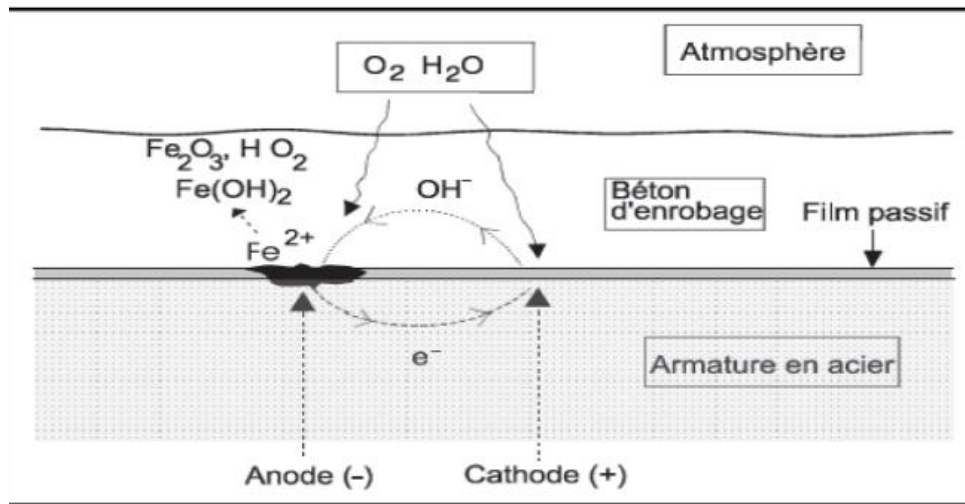


Figure1-2 : Représentation schématique des processus de base de la corrosion des aciers dans le béton (Bagneux, 2002)

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 (Ming et al, 2005).

La corrosion ne se forme qu'en présence d'oxygène et d'humidité relative comprise entre 60% et 80%. Lorsque l'atmosphère est très sèche (humidité relative $< 40\%$), ou lorsque le béton est totalement immergé dans l'eau désaérée (manque d'oxygène), la corrosion ne peut se produire (Pietro, 1996), (Shamsad, 2003).

Le développement de la corrosion de l'acier dépend aussi d'autres facteurs comme le rapport E/C, le type de ciment, la qualité de l'interface acier-béton, l'épaisseur d'enrobage, la température, le pH, le potentiel de l'acier, les hétérogénéités de la surface de l'acier, etc. (Pietro, 1996), (Shamsad, 2003).

1.2.2 La carbonatation :

La carbonatation du béton par le gaz carbonique de l'air (CO_2) est un phénomène naturel qui se produit lorsque plusieurs paramètres sont réunis à savoir l'humidité relative, présence du gaz carbonique et une structure en béton poreuse.

Au cours de la prise et du durcissement, les ciments se combinent avec l'eau pour former des produits hydratés de caractère basique. Certains de ces produits [KOH , NaOH et $\text{Ca}(\text{OH})_2$] restent dissous dans la solution aqueuse interstitielle du béton (dont le pH est compris entre 12 et 13). Le gaz carbonique contenu dans l'air a tendance à se combiner avec les produits hydratés, en commençant par les bases alcalines dissoutes dans la solution aqueuse interstitielle, en particulier le $\text{Ca}(\text{OH})_2$, selon une réaction produisant du carbonate de calcium CaCO_3 (Eq.1.1):



Le milieu basique (pH 12 à 13) se trouve progressivement modifié par la neutralisation de l'alcalinité du ciment pour atteindre un pH de l'ordre de 9, n'assurant plus la protection des armatures et entraînant une dépassivation de l'acier (destruction de la couche de passivation), ce qui développe une réaction d'oxydation à la surface des armatures. La progression de la carbonatation se fait de l'extérieur de l'ouvrage, en contact avec l'air ambiant, vers l'intérieur. (Guiraud, 2018) (Fig. 1.3). Ce qui provoque l'éclatement de l'enrobage du béton et la mise d'armatures à nu exposées à l'air libre et notamment aux agents agressifs de l'atmosphère (Fig. 1.4).

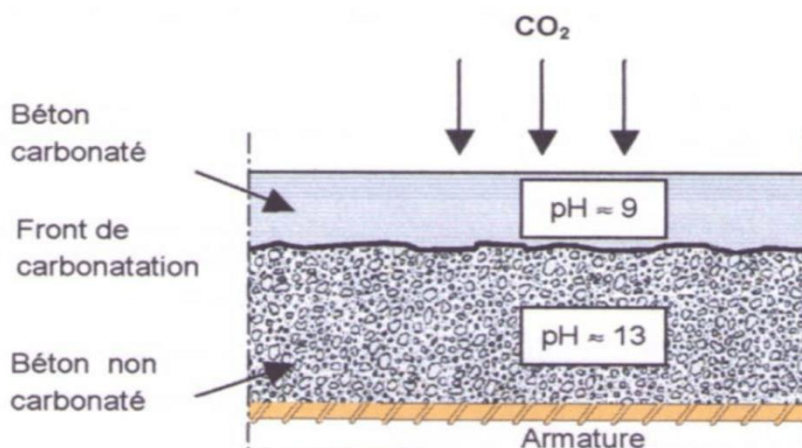


Figure 1-3 : Progression de la carbonatation (Oxand, 2002)



Figure 1.4: Carbonatation du béton (Carbonatation_du_béton, consulté le : 25 Mai 2022)

Dans un premier temps, la vitesse de propagation est ralentie par la formation des carbonates qui colmatent partiellement la porosité. Elle diminue donc avec la profondeur atteinte.

Dans un second temps, la carbonatation a pour conséquence une neutralisation (chute du pH de la solution interstitielle) du milieu de protection des armatures, qui peuvent alors s'oxyder.

L'humidité relative de l'air joue, en particulier un rôle important: la vitesse de carbonatation est maximale pour une humidité relative de l'ordre de 60%, pratiquement nulle en atmosphère sèche ou pour des bétons complètement saturés en eau. La cinétique et la profondeur de carbonatation d'un béton sont donc fonction de sa composition, de sa structure poreuse, de la classe d'exposition et de l'humidité relative dans laquelle est situé l'ouvrage. Elle dépend aussi de la concentration en dioxyde de carbone et de la température de l'atmosphère environnant. Ces paramètres hygrométriques déterminent l'évolution de la carbonatation au sein de la structure en béton armé et ainsi jouent sur la durabilité de l'ouvrage.

En outre, les paramètres intrinsèques du béton ont aussi une influence sur la résistance de ce dernier aux agents agressifs extérieurs. L'augmentation de la compacité du béton est obtenue en particulier en réduisant le rapport E/C. Ce rapport conditionne la perméabilité du béton donc l'interconnexion du réseau poreux et par conséquent la vitesse ainsi que la possibilité de diffusion des gaz et des ions dans le béton.

Une cure prolongée permet d'augmenter la résistance du béton à la pénétration du dioxyde de carbone en améliorant les propriétés de surface du béton, plusieurs études ont été menées dans ce contexte en étudiant l'influence de la durée de cure sur la durabilité du béton (Balayssac et al, 1997).

1.2.3 Action des chlorures :

L'action des chlorures est spécifique à certains environnements dans lesquels peut se trouver le béton comme les ouvrages soumis aux sels de déverglaçage ou situés en site maritime (zone de marnage, surfaces soumises aux embruns).

Les ions chlorures peuvent pénétrer par diffusion ou migrer par capillarité à l'intérieur du béton, franchir la zone d'enrobage, atteindre les armatures, et provoquer des corrosions (par mécanisme de dissolution du métal suivant une réaction d'oxydo-réduction), elle se manifeste par piqûres sur la surface de l'acier, ce qui provoque la fragilité et la perte de résistance du métal(voir Fig 1.5).

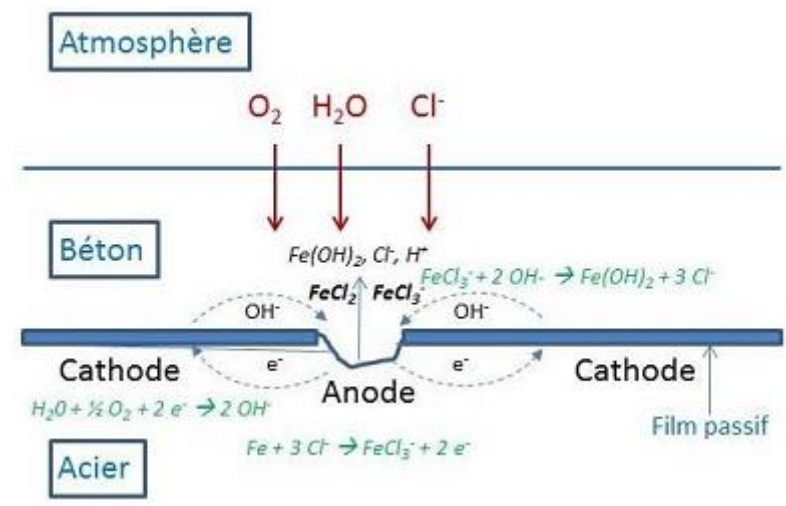
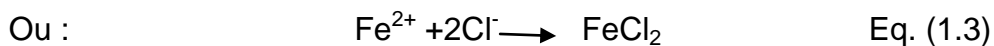
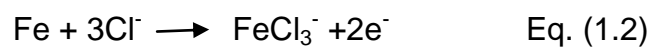
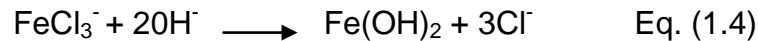


Figure 1.5: Corrosion induite par les chlorures dans le béton (Holcim, 2019)

La pénétration des ions chlorures contribue à la dépassivation de l'acier en modifiant la composition de la couche passive par la formation des ions $FeCl_3^-$ ou $FeCl_2$, à partir des réactions :



Ensuite, les ions formés consomment les hydroxydes présents, selon les réactions :



Ces réactions acidifient la solution, entraînant une diminution du pH et une régénération des ions chlorures.

La vitesse de pénétration des chlorures dépend aussi de la porosité du béton. Elle décroît lorsque le rapport eau/ciment diminue.

La corrosion s'amorce dès que la teneur en chlorures au niveau des armatures atteint un certain seuil de dépassivation. Ce qui est appelé généralement seuil critique, il est fonction du pH de la solution interstitielle et de la teneur en oxygène au niveau des armatures; il est de l'ordre de 0,4 à 0,5% par rapport au poids du ciment. Il peut aussi être exprimé par le rapport $[\text{CL}^-]/[\text{OH}^-]$, lorsqu'il est compris entre 0,6 et 1, l'amorçage de la corrosion est déclenché. Il est atteint plus rapidement si le béton est carbonaté (Holcim, 2019).

1.2.4 Effets de la corrosion :

Le développement de la corrosion des armatures peut provoquer par accumulation des produits de corrosion, des gonflement qui engendrent une poussée sur le béton d'enrobage (les oxydes de fer étant plus volumineux que l'acier, ils génèrent des contraintes internes dans le béton qui peuvent être supérieures à la résistance du béton) et donc une altération de l'aspect extérieur de l'ouvrage (éclatements localisés, formations de fissures, formations d'épaufrures, apparitions en surface de traces de rouille et éventuellement mise à nu des armatures) entraînant une réduction de la section efficace de l'armature et de son adhérence au béton(voir Fig1.6).



Figure 1.6: L'accumulation des produits de corrosion et l'éclatement de l'enrobage
[<https://www.technichem.be/>, consulté le 22 mai 2022]

En règle générale, dans des milieux peu agressifs, les enrobages et les caractéristiques des bétons (compacité, homogénéité, résistance) préconisés sont suffisants pour garantir la protection naturelle des aciers durant la durée de service escomptée de l'ouvrage. Toutefois, des défauts d'enrobage, des bétons mal vibrés et de ce fait trop poreux, ou des milieux très agressifs, risquent de conduire à une dégradation prématurée de l'armature en acier (Oxand, 2002).

L'optimisation des performances du béton et de l'enrobage des armatures constitue un facteur de progrès essentiel pour assurer la durabilité des ouvrages.

1.2.5 Les formes de la corrosion :

La dissolution d'un métal se produit dans des zones très variables et la localisation de celles-ci détermine l'aspect de la corrosion. Il en résulte que l'aspect d'un métal corrodé soit de différents types (Fig 1.7).

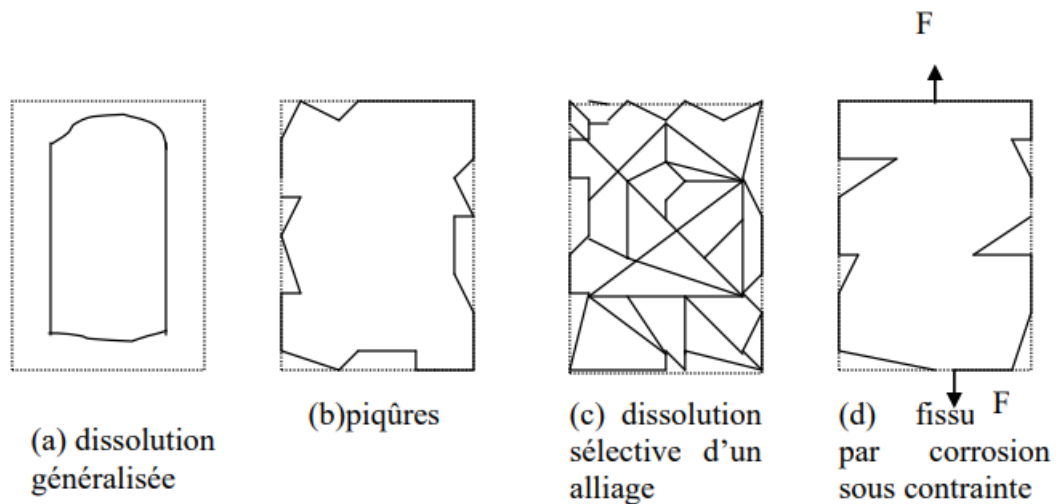


Figure1.7: Formes de la corrosion (BADAOU, 2003)

1.2.5.1 La Corrosion uniforme :

L'attaque uniforme est la plus courante en corrosion chimique. Elle se caractérise normalement par une réaction chimique ou électrochimique qui se poursuit uniformément sur toute la surface exposée, le métal devient plus mince et se détruit. Dans les liquides cette forme de corrosion comporte une réaction d'oxydoréduction; les surfaces anodiques et cathodiques se déplacent régulièrement sur la totalité de la surface du métal (BADAOU, 2003).

Cette forme de corrosion cependant n'est pas la plus importante du point de vue technique car la durée de vie des équipements peut être appréciée avec précision par comparaison aux autres formes de corrosion. La plupart de ces dernières sont par nature insidieuses et elles sont considérablement plus difficiles à prévoir, ce sont les formes de corrosion qui provoquent les accidents imprévus et prématurés, c'est le cas de la corrosion par piqûre.

1.2.5.2 La Corrosion localisée:

Si les zones anodiques sont petites et se trouvent dans des endroits fixes, il apparaît de petites cuvettes ou piqûres de corrosion.

La corrosion par piqûre est une corrosion localisée qui aboutit au percement du métal. Quant l'anode se limite en un seul point, la corrosion s'installe à cet

endroit et il en résulte une pénétration profonde de la corrosion. Ces trous peuvent avoir de petits ou de grands diamètres, les piqûres représentent les formes de corrosion les plus insidieuses et les plus destructrices. Elles provoquent la détérioration des équipements par perforation avec seulement un faible pourcentage de perte de poids de la construction totale.

Il est souvent difficile de déceler les piqûres en raison de leur faible dimension et par ce que les piqûres en sont souvent recouvertes par les produits résultant de la corrosion, il est difficile d'apprécier quantitativement l'étendue des piqûres à cause des profondeurs variées et du nombre de piqûres qui surviennent dans des conditions supposées identiques. Les piqûres sont particulièrement dangereuses car elles constituent une forme localisée et intense de corrosion.(BADAOUI, 2003)

La corrosion par piqûres peut être considérée comme une étape intermédiaire entre la corrosion généralisée et la complète résistance à la corrosion cela est schématiquement représenté dans la figure 1.8.

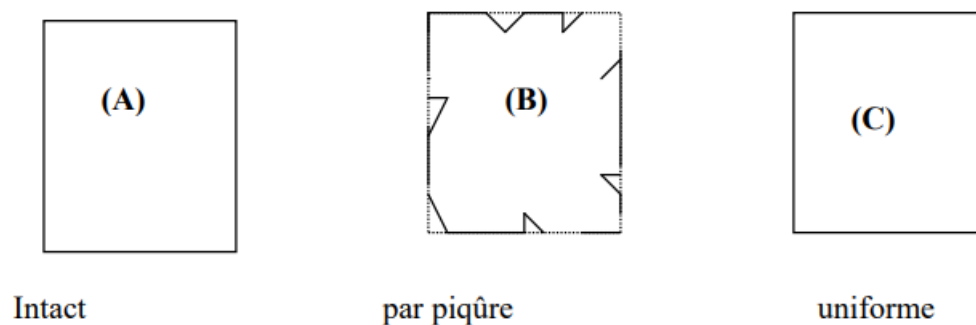


Figure 1.8: Représentation schématique du cas des piqûres comme cas intermédiaire (BADAOUI, 2003)

1.2.5.3 La Corrosion sous contrainte:

Une dernière forme de corrosion est induite par l'action simultanée de la corrosion et d'une sollicitation mécanique. Si cette sollicitation est constante dans le temps, il s'agit de corrosion sous contrainte. Dans ce cas, une fissure peut se former, se développer au cours du temps et éventuellement provoquer la rupture du métal tendu.

Si la sollicitation fluctue, il s'agit de la fatigue-corrosion. Dans ce cas aussi, des fissures peuvent apparaître et se développer jusqu'à provoquer la rupture de l'élément sollicité mécaniquement. La fatigue-corrosion concerne des éléments, tels que les câbles des ponts à haubans, dont les sollicitations mécaniques (vent, etc.) fluctuent beaucoup et qui sont au contact d'une forte humidité.

1.2.6 Les étapes de la corrosion :

Le processus de corrosion des armatures dans le béton passe par trois phases : incubation, amorçage et propagation, suivant le modèle de TUTTI (1982) illustré sur la figure 1.9

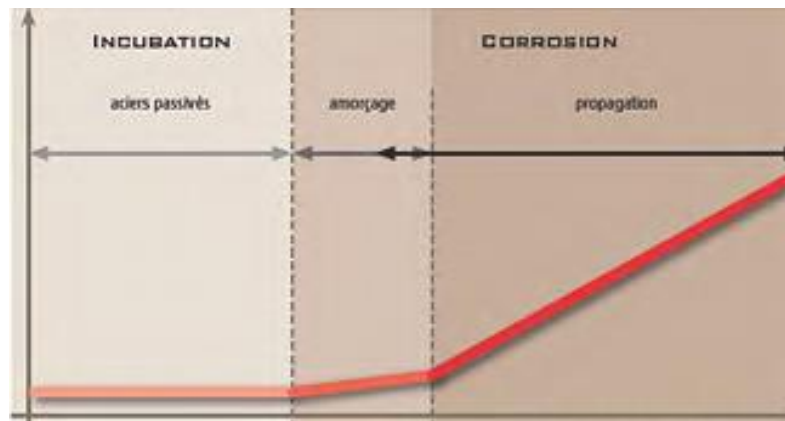


Figure 1.9: Illustration des trois phases de dégradation des armatures dans le béton par le processus de corrosion (TUTTI, 1982).

1^{ère} étape : Phase de passivation des armatures

Dans cette phase, les aciers sont en état de passivation, les réactions chimiques se produisent sans causer de dégâts visibles sur la structure.

2^{ème} étape : Phase d'amorçage de la corrosion

Dans cette phase, les éléments agressifs, tels que le dioxyde de carbone (CO_2) ou les chlorures (Cl^-), présents dans le milieu environnant, sont en quantités suffisantes pour détruire le film passif. C'est le stade d'amorçage de la corrosion des armatures.

3^{ème} étape : Phase de propagation de la corrosion

La phase de propagation commence lorsque les corps agressifs dépassent le seuil d'initiation au niveau de la surface des armatures. Elle correspond à la

croissance de la rouille, qui peut ensuite faire éclater le béton d'enrobage. Elle s'appelle aussi, la phase de développement où les dégradations sont visibles. A ce stade, les réparations deviennent lourdes et coûteuses.

1.3 Moyens de lutte contre la corrosion des armatures dans le béton :

Depuis la fin des années 1960, lorsque la corrosion de l'acier dans les structures en béton armé a été reconnue pour la première fois comme un problème dans les zones côtières, de nombreuses méthodes ont été développées dans le but d'empêcher la corrosion de se produire. La protection contre la corrosion des armatures peut être divisée en deux éléments principaux:

1.3.1 Protection du béton :

L'application de produits ou systèmes de protection sur la surface des structures en béton est l'une des méthodes susceptibles d'augmenter la durabilité de ces ouvrages. Plusieurs principes sont définis :

- Gardez le béton toujours sec, afin qu'il n'y ait pas d'humidité pour former de la rouille.
- Utilisation des additions dans le béton pour diminuer le facteur de perméabilité d'agents nocifs. Et ceci par l'utilisation de béton composé de (cendres volantes, fumées de silice, laitier de haut fourneau). À faible perméabilité qui retarderait l'arrivée de la carbonatation et des chlorures au niveau des armatures. Ils forment un silicate de calcium hydraté (CSH) qui, au fil du temps, efficacement réduit la diffusivité des agents tels que: l'oxygène, le dioxyde de carbone, l'eau et les ions chlorures (Benmostefa, 2021).

Le revêtement du parement du béton est assuré par l'application:

1.3.1.1 Des hydrofuges :

L'hydrofuge est un produit de traitement conçu pour protéger les matériaux de l'humidité. Le produit hydrofuge est appliqué en plusieurs couches de peinture, qui peuvent pénétrer profondément dans les pores du substrat et empêcher la pénétration de l'eau.

Il existe différents types d'agents imperméabilisants pour les murs intérieurs et extérieurs, les surfaces horizontales et même sur le toit, de sorte que le revêtement puisse être imperméabilisé tout en rendant le revêtement respirant. Non filmogène, l'hydrofuge ne forme pas de pellicule en surface, mais il tend à éliminer l'eau et les impuretés de la surface, ce qui est bénéfique pour maintenir la surface traitée (Fig1.10).

Le traitement hydrofuge possède également des propriétés antibactériennes, anti-algues et antifongiques, permettant de résoudre de nombreux défauts liés à des problèmes d'humidité, comme la croissance de mousse ou d'algues sur le toit ou les murs d'une construction (Alain, 2015).

Il existe deux types d'hydrofuges:

- a-** la phase à base de solvant peut être utilisée pour les méthodes de traitement plus anciennes, mais elle n'est pas recommandée pour une utilisation sur des supports alcalins et s'avère nocive.
- b-** la phase à base d'eau, peut être utilisée sur un revêtement humide et sur un ciment frais. Cependant, il est impossible de l'utiliser sur un substrat qui a été préalablement traité avec un produit hydrofuge (Alain, 2015).

Les hydrofuges sont généralement utilisés pour traiter les problèmes d'humidité ou à titre préventif pour protéger la surface des agressions extérieures. Avant d'utiliser le produit hydrofuge, les fissures et les trous du parement doivent être obstrués.



Figure 1.10: application de l'hydrofuge (Alain, 2015)

1.3.1.2 Les peintures :

Elles ont deux rôles d'un côté décoratif et d'un autre coté pour limiter la perméabilité du béton.

1.3.1.3 Les lasures :

Elles ont pour but d'empêcher la pénétration de l'eau et des substances nocives dissoutes dans l'eau. D'une très bonne adhérence, elles augmentent la résistance électrique et garantissent une bonne étanchéité au gaz carbonique (Fig 1.11). La figure 1.12 montre l'état d'une surface de béton étanche.



Figure 1.11: Application de lasure sur toiture en béton (Aurenti, 2016)



Figure 1.12: Béton imperméable. [www.betonix.be/beton-hydrofuge consulté le 20 mai 2022]

1.3.2 Protection des armatures:

Il existe plusieurs méthodes qui ont la capacité d'arrêter la corrosion dans le béton contaminé par les chlorures et sont le plus souvent utilisées comme méthodes de réhabilitation. Plusieurs principes sont définis:

1.3.2.1 L'utilisation d'un Revêtement époxy :

Cette technique consiste à appliquer un revêtement époxy sur les barres d'armatures pour les protéger de l'humidité et des agents agressifs. Le revêtement époxy intégré sur les barres d'acier offre un certain degré de protection des barres d'acier et retarde ainsi l'initiation de corrosion.

Ces revêtements empêchent le mouvement de l'humidité vers la surface de l'acier mais limitent la pénétration d'oxygène (Fig.1.13).



Figure 1.13: Revêtement époxy anticorrosion. (ERSIGROUP, 2017)

1.3.2.2 La protection cathodique :

a- Définition : La protection cathodique consiste à placer un matériau métallique à un potentiel assez bas pour que la corrosion soit négligeable, Ce potentiel correspond à l'immunité (impossibilité de corrosion) ou à une passivation efficace.

c- Les différents types de protection cathodique: il existe deux types de protection cathodique.

1. La Protection cathodique par anodes sacrificielles :

Dans les systèmes d'anode sacrificielle, le matériau de l'anode est plus réactif que le métal de la structure, par ex. zinc ou magnésium; ainsi les réactions électrochimiques se produisent dans l'anode. La surface métallique est protégée contre la corrosion (Fig 1.14).

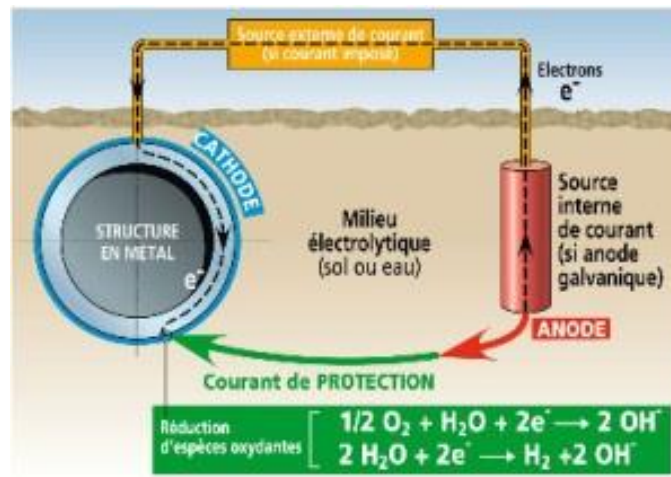


Figure 1.14: Protection cathodique par anodes sacrificielles (CEFRACOR.com, consulté le 24 Mai 2022)

2. La Protection cathodique par courant imposé :

- Le matériau de l'anode lui même peut être inerte mais il est maintenu dans un état anodique par rapport à la structure en étant connecté au pôle correct d'une alimentation en courant continu (Benmostefa, 2021). Un aperçu du processus est présenté sur la figure 1.15. L'anode est répartie sur la surface (soit un treillis métallique inerte soit un revêtement conducteur) ou de nombreuses anodes discrètes sont fixées dans des trous percés dans le béton.

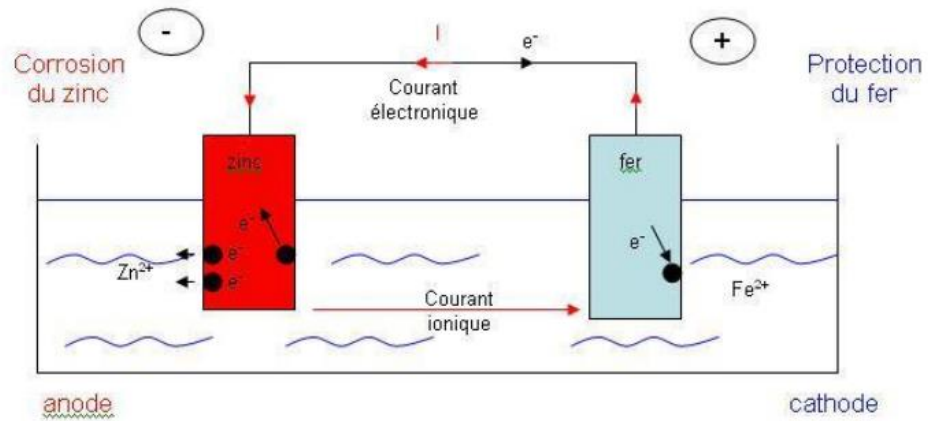


Figure 1.15: Mécanisme de protection de l'acier à l'aide du zinc.
(Benmostefa, 2021).

1.3.2.3 Le traitement alternatif des armatures:

Il comprend des matériaux qui isolent électriquement l'acier du béton et créent une barrière contre la pénétration des ions chlorures, ce sont des matériaux qui protègent l'acier galvaniquement, ils ont des seuils de corrosion nettement plus élevés que les aciers d'armature conventionnels (Fig 1.16).

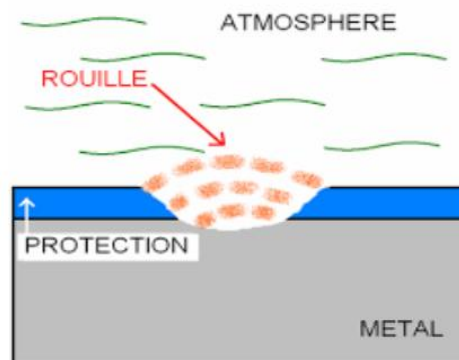


Figure 1.16: Création d'une barrière contre la pénétration des ions chlorures.
(protection-acier.com)

1.3.3 Utilisation des inhibiteurs de corrosion:

1.3.3.1 Définition:

Les inhibiteurs de corrosion sont des produits chimiques ou verts qui, lorsqu'ils sont présents en quantités appropriées, sont capables de favoriser une réduction

de la vitesse de corrosion sans modifier de manière significative la concentration de tout agent corrosif. (Rivetti et al, 2017)

1.3.3.2 Classes des inhibiteurs de corrosion:

Les inhibiteurs de corrosion peuvent être classifiés suivant plusieurs critères (Fig 1.17):

- a) Type de produit chimique : (distinction entre les substances inorganiques et organiques).
- b) Mode d'action électrochimique (anodique ou cathodique, ou mixte) .
- c) La façon dont l'inhibiteur est appliqué; soit mélangé dans le béton frais «inhibiteurs adjuvants», soit appliqué à la surface du béton durci «inhibiteurs migrants».
- d) le mécanisme réactionnel : adsorption, formation de films tridimensionnels.
- e) le domaine d'application: milieux acides, neutres, béton, phase gazeuse, etc. (Han-Seung et al, 2017).

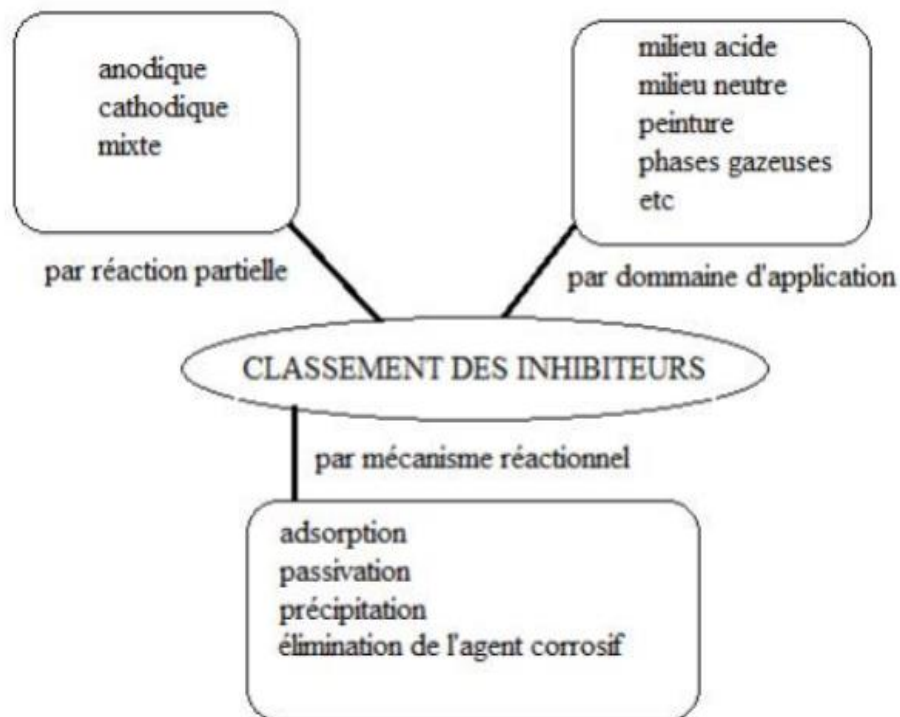


Figure 1.17: Classement des inhibiteurs de corrosion. (Bellal, 2020)

1.3.4 Application des inhibiteurs de corrosion dans le béton:

L'utilisation d'inhibiteurs de corrosion peut retarder le début de la corrosion induite par les chlorures, prolonger le délai avant le début de la corrosion et ainsi réduire la vitesse de corrosion. Les inhibiteurs de corrosion des armatures peuvent être utilisés de deux manières :

1.3.4.1 Les inhibiteurs migrateurs :

Les inhibiteurs migrateurs sont des inhibiteurs de corrosion appliqués sur la surface du béton durci, ils sont conçus pour migrer à l'intérieur des structures en béton et atteindre les armatures en acier.

Les inhibiteurs migrateurs ont la capacité de pénétrer à travers une épaisseur considérable de béton pour assurer sa protection. Ils diffusent à travers les pores du béton et minimisent les réactions électrochimiques, ce qui permet de renforcer l'acier et prolonger la durée de vie de la structure.

1.3.4.2 Les inhibiteurs adjuvantés:

L'inhibiteur de corrosion adjuvanté est un produit soit chimique sous forme de poudre ou lotion soit un produit vert ajouté en extrait à l'eau de gâchage du béton en concentration étudiée. Il inhibe chimiquement l'action corrosive des ions chlorures sur les aciers d'armature. De plus, il ne doit pas influencer les propriétés mécaniques surtout les résistances à la compression du béton à court et long terme.

Le Tableau 1.1 résume des travaux réalisés sur l'application des inhibiteurs de corrosion dans le béton ou les milieux simulant le béton par ordre chronologie.

Tableau 1.1 : l'application des inhibiteurs de corrosion dans le béton: Etat de l'art

(Auteur, date)	Titre de l'article	Inhibiteur utilisé	Milieu d'étude
(Dillard et al, 1996)	Action des Monofluorophosphates sur la corrosion des armatures dans le béton	Monofluorophosphates	Béton
(Elsener et al, 1999)	Migrating Corrosion Inhibitor Blend for Reinforced Concrete: Part 2—Inhibitor as Repair Strategy	hydroxyalkylamines	Solution saturé en (Ca[OH ₂]) et mortier
(Dhouibi et al, 2002)	The application of electrochemical impedance spectroscopy to determine the long-term effectiveness of corrosion inhibitors for steel in concrete	Nitrate de calcium et alcanolamine	Béton
(Dhouibi et al, 2003)	Studies on corrosion inhibition of steel reinforcement by phosphate and nitrite	Phosphate et nitrite	Solutions alcalines béton armé
(Girèienė et al, 2005)	Efficiency of steel corrosion inhibitor calcium nitrite in alkaline solutions and concrete structures	Nitrite de calcium	Solutions alcalines béton armé
(Kashyap, 2008)	Effects of water chemistry, temperature, gaseous cavitation & phosphate inhibitors on concrete corrosion	Orthophosphate de zinc, polyphosphate	Béton
(Simescu et al, 2009)	Corrosion behaviour in alkaline medium of zinc phosphate coated steel obtained by cathodic electrochemical treatment	phosphate de zinc	Milieu alcalin
(Sail et al, 2013)	The effect of phosphate corrosion inhibitor on steel in synthetic concrete solutions	Phosphate de sodium	Milieu simulant les pores du béton
(Rakanta et al, 2013)	Corrosion protection of steel with DMEA-based organic inhibitor	N,N-diméthylaminoéthanol (DMEA)	-Solution artificielle des pores du béton et mortier de ciment
(Salawu Abdul rahman Asipita et al, 2014)	Green Bambusa Arundinacea leaves extract as a sustainable corrosion inhibitor in steel reinforced concrete	Extrait de feuilles d'Arundinacea Bambusa : Inhibiteur vert	Béton
(Nahali et al, 2014)	Effect of phosphate based inhibitor on the threshold chloride to initiate steel corrosion in saturated hydroxide solution	Phosphate de sodium	Solution saturé en (Ca[OH ₂])
(Sail et al, 2014)	Properties evolution of phosphate film inhibitor as function of immersion time	Na ₃ PO ₄ , K ₂ HPO ₄ , Na ₂ PO ₃ F	Solution synthétique du béton
(Olusegun Okeniyi et al, 2014)	Morinda lucida effects on steel-reinforced concrete in 3.5% NaCl: Implications for corrosion-protection of wind-energy structures in saline/marine environments	<i>Morinda lucida</i>	Béton avec 3,5% de NaCl
(Joshua Olusegun Okeniyi et al, 2017)	Corrosion-inhibition and compressive-strength performance of Phyllanthus muellerianus and triethanolamine on steel-reinforced concrete immersed in saline/marine simulating-environment	Phyllanthus muellerianus triethanolamine	Béton armé en milieu marin

(Auteur, date)	Titre de l'article	Inhibiteur utilisé	Milieu d'étude
(Hassoune et al, 2017)	Corrosion inhibition of carbon steel by N,N'-Dimethylaminoethanol in simulated concrete poresolution contaminated with NaCl	N,N'-Dimethylaminoethanol	Solution stimulant les pores du béton avec 0.5M NaCl
(Talipov-Velichko, 2018)	Effect of polycarboxylate and polyarylate surfactants on corrosion of the steel reinforcement embedded in the concrete	Polycarboxylate et polyarylate	Béton
(Vinod-alJune, 2018)	Efficacies of sodium nitrite and sodium citrate-zinc acetate mixture to inhibit steel rebar corrosion in simulated concrete interstitial solution contaminated with NaCl	nitrite de sodium et mélange de citrate de sodium-acétate de zinc	Solution du béton simulée contaminée par NaCl
(Yuli Panca Asmara et al, 2018)	Application of Plants Extracts as Green Corrosion Inhibitors for Steel in Concrete - A review	Extraits d'inhibiteurs de corrosion verts	Béton
(Bellal et al, 2018)	A New Inhibitor for Steel Rebar Corrosion in Concrete: Electrochemical and Theoretical Studies	3-amino-2-naphthol, Dehydroacetic Acid (DHA),	Béton avec 0.5M NaCl
(BahgatRadwan et al, 2019)	Enhancing the corrosion resistance of reinforcing steel under aggressive operational conditions using behentrimonium chloride	behentrimonium chloride $C_{25}H_{54}ClN$	Solution du béton simulée contaminée par NaCl
(Shalabi et al, 2019)	Ethoxylates nonionic surfactants as promising environmentally safe inhibitors for corrosion protection of reinforcing steel in 3.5 % NaCl saturated with Ca(OH) ₂ solution	Éthoxylate non ioniques	Solution saturée en Ca(OH) ₂ avec 3,5 % NaCl
(Hwa Sung Ryu et al, 2019)	Evaluation of Corrosion Resistance of Corrosion Inhibitors for Concrete Structures by Electrochemical Testing in Saturated Ca(OH) ₂ Solutions with NaCl and Na ₂ SO ₄	lithium nitrite diethanolamine, methyl diethanolamine, 4-aminobutyric	Solution saturée en Ca(OH) ₂ avec 0.98g/INaCl
(OlusegunOke niyi et al, 2019)	Anticorrosion Behaviour of Rhizophora mangle L.Bark-Extract on Concrete Steel-Rebar in Saline/Marine Simulating-Environment	Extrait de Rhizophora mangle L.Bark	Béton dans un Milieu simulant le milieu marin
(Sanaei et al, 2019)	Application of green molecules from Chicory aqueous extract for steel corrosion mitigation against chloride ions attack; the experimental examinations and electronic/atomic level computational studies	Extrait de Chicory aqueux	Milieu saturé en NaCl
(Fouda et al, 2019)	Extrait végétal écologique de Medicagosativa (Alfalfa) comme inhibiteur de corrosion pour l'acier au carbone en milieu marin	Extrait végétal de Medicago sativa (Alfalfa)	Milieu marin
(Ben Harb et al, 2020)	Olive leaf extract as a green corrosion inhibitor of reinforced concrete contaminated with seawater	Extrait de feuill'olivier	béton armé contaminé par l'eau de mer
(Brixi et al, 2021)	Effectiveness of henna leaves extract and its derivatives as green corrosion inhibitors of reinforcement steel exposed to chlorides	Extrait de feuilles de henné et dérivés	Solution stimulant les pores du béton avec 0.5M NaCl

1.4 Les remèdes contre la corrosion des armatures dans le béton:

Lorsque la dégradation du béton par la corrosion est assez sévère, et qui peut provoquer un endommagement visible du parement du béton, il faut agir directement par :

- l'enlèvement de tout béton contaminé,
- nettoyage de l'armature par décapage abrasif ou remplacement des armatures en cas de dégradations sévères.
- dépôt d'un béton ou mortier projeté qui adhère avec le béton support.

Deux procédés peuvent être appliqués.

1.4.1 La Ré-alkalinisation:

Le traitement par ré-alkalinisation est basé sur une méthode électrochimique qui consiste à traiter la corrosion des armatures causée par la carbonatation du béton. Cette technique augmente l'alcalinité autour des aciers pour permettre la formation d'un film protecteur.

- Ce procédé présente l'avantage de ne pas affecter l'aspect d'origine du parement de la structure. Il est particulièrement adapté à la rénovation de béton sur des structures anciennes et de type Monument Historique (Benmostefa, 2021)
- Le but de ce traitement électrochimique est de restaurer la capacité du béton d'enrobage à protéger les armatures, grâce à son pH. L'aspect du béton traité est ainsi respecté(Fig.1.18).

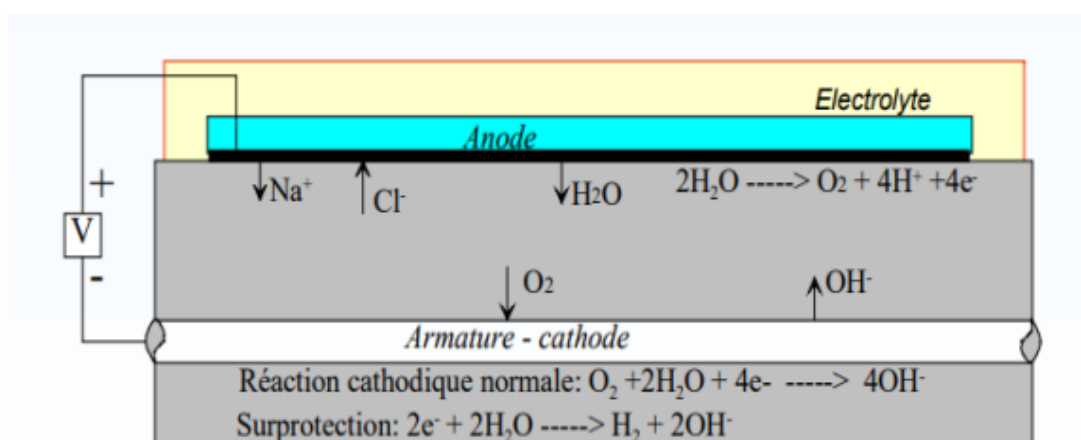


Figure 1.18: Traitement de ré-alkalinisation. (Bouteiller, 2019).

1.4.2 La déchloruration:

C'est une méthode dérivée du processus de ré-alkalinisation. Elle est basée sur l'extraction des ions chlorures qui ont pénétré le revêtement de béton au fil du temps.

Elle consiste à faire migrer les ions chlorures vers l'extérieur du parement pour retrouver un environnement sain.

- Pour cela, cette méthode électrochimique, consiste à appliquer un courant électrique entre les armatures en acier (cathode) et un treillis en titane (anode). Ce treillis est apposé à la surface du béton, mais pas en contact, grâce à une couche préalablement appliquée de cellulose ou de laine de roche (pour améliorer la conductivité).(Bellal, 2020).
- L'une des bornes du générateur est connectée au cadre en acier (à l'aide d'ouvertures actionnées) et l'autre au treillis en titane. Une fois la connexion établie, les ions chlorure migrent vers l'extérieur à travers les pores du béton. (Fig.1.19)

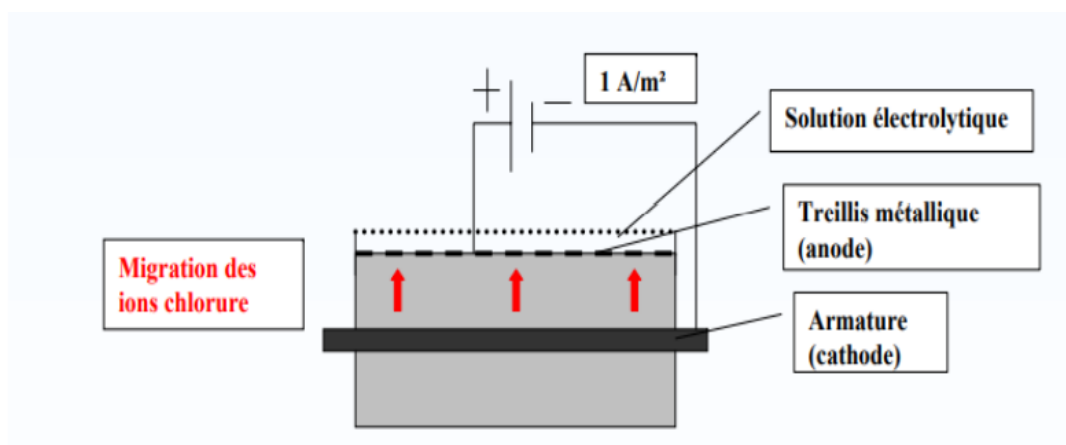


Figure 1.19: Traitement de déchloruration. [Bouteiller, 2019]

1.5 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les causes les plus courantes de la corrosion des armatures qui sont la pénétration des ions chlorures et la carbonatation par le dioxyde de carbone atmosphérique.

Dans les climats humides et froids, le béton armé pour routes, ponts, structures de stationnement et autres structures peut être exposé au sel de déverglaçage, d'où l'utilisation de revêtement époxy, barres d'armature galvanisées à chaud ou en acier inoxydable est nécessaire.

Une bonne conception structurelle, ainsi que le bon choix des matériaux de construction rend le béton durable et peut fournir une protection suffisante pour de nombreuses applications. Par ailleurs le traitement des armatures en appliquant une couche galvanique permet sa protection contre la corrosion due à la pénétration des ions chlorures. Cette alternative est très efficace bien qu'elle s'avère coûteuse, d'où le recours à l'utilisation des inhibiteurs de corrosion comme moyen de protection des armatures dans le béton.

Dans le chapitre suivant on s'intéressera à l'application des inhibiteurs de corrosion aqueux dans le béton.

Chapitre 2 :
**Notions sur les inhibiteurs de
corrosion.**

2.1 Introduction :

La corrosion étant un processus essentiellement électrochimique, l'action inhibitrice ne peut faire qu'au niveau d'une des étapes des réactions élémentaires (transport d'espèces en solution, adsorption des espèces à la surface des phases solides et transfert de charge électronique).

Les inhibiteurs de corrosion présentent la meilleure alternative, facile, rapide et efficace contre la corrosion en comparant avec les autres méthodes qui nécessitent un entretien permanent et un suivi quotidien qui rend le cout de réparation très élevé.

2.2 Généralités sur les inhibiteurs de corrosion

2.2.1 Définition et historique :

a- Définition :

Un inhibiteur de corrosion est un composé chimique ou vert, prêt à l'emploi (organique ou inorganique) qui, ajouté en faible concentration au milieu corrosif, diminue sensiblement ou stoppe le processus de corrosion d'un métal placé dans ce milieu (Iso, 1986).

National Association of Corrosion Engineers (NACE) définit les inhibiteurs comme: «Une substance chimique qui, diminue le taux de corrosion en présence dans un système de corrosion à concentration convenable, sans changer considérablement la concentration de tout autre agent de corrosion » Cité par (Sail, 2013).

Ses fonctions essentielles sont les suivantes :

- De pénétrer à travers la couche de béton,
- De diminuer la vitesse de corrosion du métal, sans affecter ses propriétés (ni celles du milieu environnant),
- D'être stable dans le milieu considéré et compatible avec celui-ci, à la température d'utilisation,
- De ne pas être toxique. L'imprégnation en phase aqueuse à base d'inhibiteurs de corrosion migre dans les bétons et se fixe à la surface des aciers tout en

assurant un effet curatif ou préventif et prolonge la durée de vie des ouvrages en béton [Morris et al, 2003].

b- Historique :

En effet, il est difficile de déterminer l'origine exact de l'inhibition considérée comme une technologie à part. Néanmoins, il y a quelques décennies, il a été observé que le dépôt calcaire formé à l'intérieur des conduites transportant certaines eaux naturelles protégeait cette conduite; plutôt que d'améliorer sans cesse la résistance à la corrosion des conduites en agissant directement sur ces dernières, il s'avère plus pratique d'ajuster les concentrations minérales des solutions transportées, qui sont à l'origine des dépôts calcaires << protecteurs >>.

En 1945, on comptait moins de 30 papiers traitant de l'inhibition. Dans un article de 1948 (Gomma, 1998), Waldrip se référait à un rapport datant de 1943 au sujet de sa discussion concernant la protection contre la corrosion des puits de pétrole. De nombreux articles concernant l'inhibition ont été rédigés durant la période allant de 1945 à 1954: ceux-ci traitaient entre autres de l'inhibition dans les domaines de l'aviation, des chaudières, des circuits de refroidissement, des moteurs diesel, des sels de déneigement, des raffineries de pétrole, des pétroliers.... Les articles publiés durant cette période témoignent d'un grand développement technologique en matière d'inhibition.

Durant les quarante dernières années, un nombre croissant de résumés, d'articles et autres ouvrages évoquant ce sujet a été recensé : au total, en 1970, 647 articles traitant de l'inhibition sont dénombrés (Popova et al, 2003).

Parmi les inhibiteurs de corrosion les plus connus qui ont été largement utilisés, on distingue, le nitrite de sodium $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ qui a été commercialisé en 1958 par l'Union Soviétique comme un inhibiteur de corrosion de l'acier pour les produits de l'autoclave. Cette innovation d'usage du $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ devient une stratégie de protection contre la corrosion causée par les sels de déverglaçage (Sail, 2013).

Au Japon et aux Etats-Unis, le $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ a été utilisée pendant plusieurs année Le premier brevet a été accordé à une compagnie en 1977 pour application commerciale d'inhibiteur à base de nitrite (Soylev et al, 2008).

2.2.2 Conditions d'utilisation :

Un inhibiteur (ou un mélange d'inhibiteurs) peut être utilisé comme unique moyen de protection :

- 1- Soit comme protection permanente; l'inhibiteur permet alors l'utilisation de matériaux métalliques (ferreux non alliés, par exemple) dans des conditions satisfaisantes de résistance à la corrosion; une surveillance de l'installation s'impose.
- 2- Soit comme protection temporaire pendant une période où la pièce ou l'installation est particulièrement sensible à la corrosion (stockage, décapage, nettoyage); dans ce cas, le contrôle du système est a priori plus simple, la prévision du comportement de l'inhibiteur dans le temps étant plus facile à réaliser.
- 3- Un inhibiteur (ou un mélange d'inhibiteurs) peut être combiné à un autre moyen de protection: protection supplémentaire d'un alliage à haute résistance à la corrosion, addition à un revêtement de surface tel que peinture, graisse, huile, etc.

2.2.3 Modes d'utilisation :

L'inhibiteur est utilisé pour revêtir une surface métallique en formant un film protecteur étanche ou encore sur le parement de béton durci.

Les produits chimiques inhibiteurs peuvent être utilisés sous deux formes. Soit, mélangés avec un solvant approprié, puis la solution résultante est appliquée, Ou, en utilisant des techniques de dispersion courantes, le résultat reste le même qui est la formation d'une couche protectrice.

Concernant la corrosion des armatures dans le béton, les inhibiteurs de corrosion peuvent être intégrés directement à l'eau de gâchage du béton ou par prétraitement préalable des armatures.

Le processus d'application des inhibiteurs de corrosion conduit à un état de passivation des armatures.

2.2.4 Les Types d'inhibiteurs de corrosion :

Pour remédier l'effet de la corrosion des armatures dans les structures en béton armé, l'application des inhibiteurs de corrosion a donné des effets remarquables ce qui a suscité les chercheurs à creuser dans ce domaine en testant plusieurs types de produits inoxidants.

Dans le cadre de la protection de l'environnement, la recherche de produits écologiques, amis à la nature à pousser les chercheurs à trouver des produits naturels qui contiennent des substances inhibant la corrosion.

On peut diviser les inhibiteurs de corrosion en deux types distincts ;

a- Inhibiteurs type produits chimiques:

Les premiers inhibiteurs de corrosion utilisés étant les produits chimiques, ajoutés à faible concentration ralentissent efficacement la vitesse de corrosion.

Ces produits chimiques réagissent avec les surfaces métalliques ou avec les gaz environnants pour «inhiber» les réactions chimiques qui provoquent la corrosion en formant une couche sur la surface métallique.

Les facteurs qui affectent la formation de cette couche comprennent la température ambiante, le pH du milieu environnant et la composition chimique de l'atmosphère environnante.

Les inhibiteurs produits chimiques peuvent se trouver en deux formes :

- Soit sous forme de poudre ajoutée en concentration molaire à l'eau de gâchage du béton, ils peuvent être synthétisés comme les polymères et copolymères.
- Soit sous forme liquide, qui constitue l'objectif de notre travail de recherche, celles-ci sont intégrés en dosage bien précis à la solution d'étude.

En effet, parmi les inhibiteurs chimiques diminuant la corrosion en s'adsorbant à la surface du métal (ou métalloïde) en y formant une fine couche protectrice compacte, on distingue deux types:

- **Les inhibiteurs organiques:**

Les inhibiteurs les plus fréquemment utilisés sont des molécules organiques; ces inhibiteurs agissent tout d'abord par adsorption à la surface des métaux avant même d'intervenir dans processus réactionnel de corrosion pour en diminuer la vitesse. Lors de l'incorporation de l'inhibiteur dans la double couche électrique existant à la surface du métal, la molécule polarisée ou l'ion inhibiteur va modifier la distribution de charge donc le potentiel (Vololonirina, 2011).

Les inhibiteurs organiques représentent un groupe très important d'inhibiteurs de corrosion. L'efficacité des inhibiteurs organiques est liée à la structure, à la concentration et aux propriétés chimiques de la couche formée sur les conditions précisées.

Ils ont une double action ralentissant simultanément les processus anodique et cathodique. La plupart de ces inhibiteurs ont dans leur structure principalement des atomes d'azote, de soufre ou d'oxygène.

Les inhibiteurs qui contiennent du soufre sont plus efficaces que ceux qui contiennent l'azote, parce que le soufre est un meilleur donneur d'électrons que l'azote. La principale caractéristique de ces inhibiteurs est leur efficacité élevée, même à faible concentration. L'effet inhibiteur augmente souvent avec le poids moléculaire de l'inhibiteur. L'utilisation d'inhibiteurs organiques est préférée pour des raisons d'écotoxicité.

Les groupes fonctionnels usuels, permettant leur fixation sur le métal, sont les radicales amines (-NH₂), mercapto (-SH), hydroxyle (-OH), carboxyle (-COOH). Les inhibiteurs organiques les plus utilisés sont des sous-produits de l'industrie pétrolière qui sont moins onéreux (Vololonirina, 2011).

- **Les inhibiteurs inorganiques (minéraux) :**

Ces inhibiteurs minéraux sont utilisés en milieux alcalins et presque jamais en milieux acides. Les molécules minérales se dissocient en solution et les anions et cations assurent en fait l'inhibition. Les chromates, les molybdates, les silicates, les phosphates sont les plus importants inhibiteurs minéraux (Constantin, 2011).

Deux mécanismes expliquent fondamentalement leurs actions: le mécanisme par lequel les inhibiteurs aident à former une couche protectrice (généralement une couche d'oxyde), et le mécanisme par lequel les inhibiteurs forment des composés insolubles qui colmatent les zones vulnérables de la couche superficielle préexistante.

b- Les Inhibiteurs verts :

- Définition :

Les inhibiteurs verts de corrosion présentent un intérêt particulier, car la prise de conscience environnementale a augmenté et une modification de la réglementation limitant les inhibiteurs de corrosion habituels en raison de leur toxicité est appliquée actuellement.

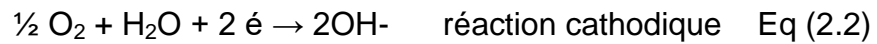
Les produits naturels sont une bonne source d'inhibiteurs de corrosion écologiques, la plupart de leurs extraits contiennent des éléments essentiels, tels que : O, C, N et S. Ces éléments sont actifs dans les composés organiques et aident à l'adsorption de ces composés sur les métaux ou les alliages en formant un film qui protège la surface et empêche la corrosion.

- Mode de fonctionnement :

Le développement de la chimie verte et la technologie de la chimie verte fournissent de nouvelles méthodes synthèses de différentes substances (polymères, extraits de plantes, acides aminés, liquides ion ...), considérés comme inhibiteurs de corrosion.

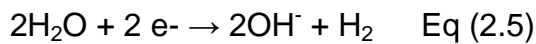
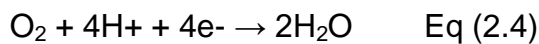
L'inhibiteur vert fonctionne lorsqu'il est ajouté à de très faibles concentrations utilisé pour traiter la surface du métal ou de l'alliage dans un environnement corrosif. Les extraits de plantes sont riches en composés naturels qui, lorsqu'ils sont ajoutés à de nombreux systèmes industriels, affecteront l'adsorption et la vitesse de corrosion des substances efficaces sur les surfaces métalliques.

Au cours du processus de corrosion, les ions métalliques se déplacent dans la solution au niveau des zones actives (anode) (Eq 2.1); et transmettent les électrons du métal vers le récepteur des zones moins actives (cathode) (Eq 2.2); le processus cathodique doit exister, accepteur d'électrons, tel que l'oxygène, l'oxydant ou l'ion hydrogène.



On peut diminuer la corrosion en retardant ou en arrêtant complètement les réactions anodiques et cathodiques, ou les deux. Pour réduire l'oxydation et / ou la réduction des réactions corrosives, les inhibiteurs sont adsorbés sur la surface métallique en formant une barrière protectrice, et interagissent avec les sites de réaction anodiques et / ou cathodiques.

Il existe plusieurs réactions cathodiques courantes dans les milieux corrosifs:



De nombreux inhibiteurs de corrosion écologiques ont été développés, allant des terres rares aux composés organiques.

Jusqu'à présent, plus de 4000 articles ont traité des extraits naturels de différentes parties de plantes (tiges, feuilles et graines) comme inhibiteurs de corrosion pour les métaux et leurs alliages dans différents milieux corrosifs. (Oulabbas, 2019)

- La biodégradabilité des inhibiteurs verts :

La biodégradation se traduit chimiquement par un processus de simplification progressive de la structure chimique d'un composé organique avec la minéralisation du carbone (sous forme de dioxyde de carbone) et l'obtention de métabolites de plus faible poids moléculaire.

Pour les produits verts, une feuille de plante est biodégradable à 100% en quelques semaines alors qu'une bouteille plastique nécessite environ 4 mille ans (Oulabbas, 2019)

- Utilisation des inhibiteurs verts dans des milieux acides :

La demande du marché en inhibiteurs verts n'arrête jamais d'augmenter; c'est la raison pour laquelle les études et les recherches de nouveaux inhibiteurs est en plein essor.

Ces derniers sont synthétisés ou extraits d'herbes aromatiques, de feuilles ou de graines, ou plus encore sécrétés par des bactéries.

- Utilisation des inhibiteurs verts dans des milieux alcalins:

L'intégration des extraits d'inhibiteurs verts dans les milieux alcalins a progressé durant ces dernières années, bien qu'elle reste tout à fait restreinte par rapport aux études réalisées dans les milieux acides.

2.2.5 Classification des inhibiteurs de corrosion :

Les inhibiteurs de corrosion sont généralement classés en fonction de leurs domaines d'application; les inhibiteurs de milieu neutre sont principalement utilisés pour protéger des circuits d'eau de refroidissement; la corrosion en milieu neutre est généralement causée par l'oxygène dissous. Si l'oxygène est empêché d'atteindre la surface (inhibition cathodique), le risque sera considérablement réduit, ou une partie de la vitesse de réaction peut être réduite en passivant le métal (inhibition anodique).

La plupart des inhibiteurs capables d'agir en milieu neutre ou basique sont des composés du type inorganique mais certains composés organiques peuvent également être efficaces.

La figure 2.1 résume les classes des inhibiteurs de corrosion suivant divers critères.

Outre la composition chimique, les substances présentant une action inhibitrice, peuvent se distinguer aussi:

- ***selon leur mode d'action:***

- inhibiteurs d'adsorption ;

- inhibiteurs passivants (ils forment des films de passivation)

• ***selon la nature électrochimique du processus :***

- inhibiteurs anodiques ;
- inhibiteurs cathodiques ;
- inhibiteurs mixtes [Hamer,1973], [Zamfir,1994].

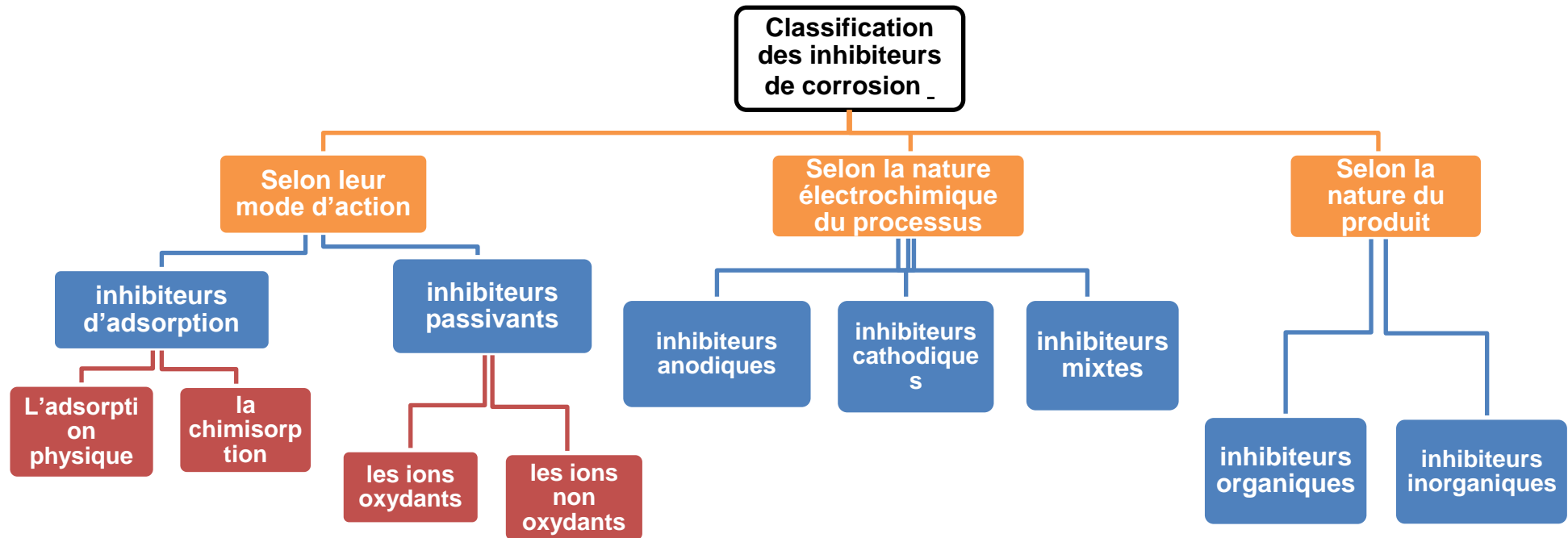


Figure 2.1 : Organigramme rassemblant la classification des inhibiteurs de corrosion

a- Selon leur mode d'action :

Suivant le mode d'action de l'inhibiteur, il peut être classé en deux catégories :

1) Les inhibiteurs d'adsorption :

Entre l'espèce adsorbée et la surface métallique existent deux types de liaisons: liaison électrostatique et liaison chimique, donc deux types distincts d'adsorption: la physisorption et la chimisorption.

- **L'adsorption physique** conserve l'identité aux molécules adsorbées. On distingue ici trois types des liaisons: les liaisons de Van der Waals (toujours présentes), les liaisons polaires (dépendant des charges de surface et de l'inhibiteur) et les liaisons hydrogène (s'établissant entre un donneur de liaison hydrogène et un accepteur, uniquement N, O, P porteur de doublets libres [Khaled,2009]).

- Par contre, **la chimisorption** résulte de la mise en commun des électrons entre la surface métallique et la molécule d'inhibiteur (un centre actif comme les atomes N, S, P, O) et ainsi se forment des liaisons chimiques covalentes très fortes. L'inhibiteur a le comportement d'un donneur d'électrons vis-à-vis de l'atome métallique de la surface.

2) Les inhibiteurs passivants :

Ces inhibiteurs forment des films de passivation tridimensionnels entre la surface corrodée et les molécules d'inhibiteur. L'inhibition s'appelle aussi inhibition «d'interphase». Ils sont également incorporés dans les couches barrières et ainsi ces molécules inhibitrices conduisent à des réseaux homogènes et denses présentant de fait une faible porosité et une bonne stabilité (Bommersbach, 2005).

Il existe deux catégories d'inhibiteurs passivants:

- les ions oxydants comme CrO_4^{2-} qui peuvent passiver l'acier en absence d'oxygène,
- les ions non oxydants (MoO_4^{2-} , WO_4^{2-} , PO_7^{3-} , $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$, $\text{C}_6\text{H}_5\text{COO}^-$) qui nécessitent la présence d'oxygène et déplacent la réaction cathodique de réduction de ce dernier en favorisant son adsorption à la surface du métal.

Tous ces ions se consomment lentement et il est donc nécessaire de contrôler périodiquement la concentration du circuit lors d'utilisation de tels inhibiteurs (Constantin, 2011).

b- Selon la nature électrochimique du processus :

Les inhibiteurs de corrosion, peuvent être classifiés suivant leur action électrochimique en trois types :

1) Les inhibiteurs anodiques :

Les inhibiteurs anodiques sont très nombreux. Ce sont des substances inorganiques comme les orthophosphates, silicates, chromates, ... Leur mode d'action consiste à élever la valeur du potentiel de corrosion du matériau afin de l'amener à une valeur pour laquelle il y'a formation d'un film passif protecteur sur l'anode (Fiaud, 1990).

Même si les inhibiteurs anodiques sont très efficaces et souvent utilisés, ils ont généralement une propriété indésirable : si la teneur en inhibiteur est/ou devient progressivement abaissée, la surface métallique n'est plus entièrement couverte, et elle fonctionne comme anode, obtenant ainsi une combinaison dangereuse, une petite anode et une grande cathode, conduisant à la corrosion par piqûres. Dans ce cas, l'inhibiteur fait plus de mal que de bien. C'est pour ça que les inhibiteurs anodiques sont souvent désignés comme dangereux. L'ion benzoate semble être une exception, parce qu'une très faible concentration d'inhibiteur entraîne seulement la corrosion généralisée.

Par absorption de l'inhibiteur, il n'y a pas un simple blocage des sites préférentiels de dissolution du métal, il y a aussi une intervention de l'inhibiteur au niveau des intermédiaires réactionnels accompagnants les différentes étapes de la dissolution d'un métal (Fiaud, 1990).

La Figure 2.2 montre l'action chimique des inhibiteurs anodiques et cathodiques.

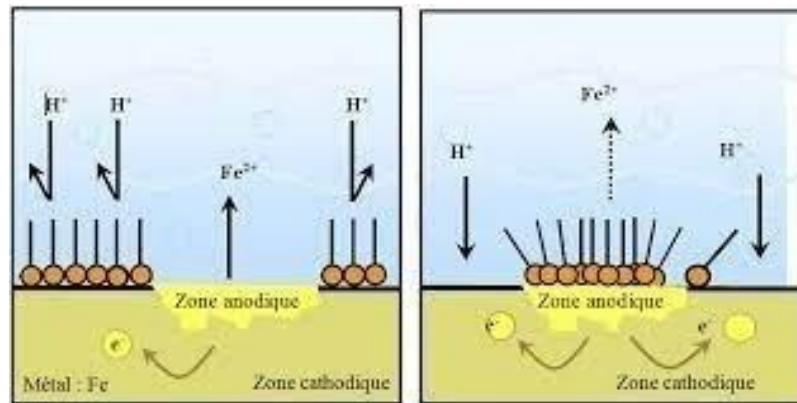


Figure 2.2: Formation de couches barrières : a) cathodiques, b) anodiques sur la surface du métal (Boukili, 2015)

2) Les inhibiteurs cathodiques :

L'action de ces inhibiteurs se traduit par une diminution de la vitesse de la réaction cathodique et donc par un déplacement du potentiel de corrosion vers des valeurs moins nobles. Ce sont généralement des cations qui peuvent migrer vers la surface cathodique, où ils précipitent sous formes de sels basiques ou d'hydroxydes, formant des films adhérents et compacts. Les inhibiteurs cathodiques incluent des combinaisons de zinc, de nickel, de magnésium, des phosphates alcalins, des combinaisons d'arsenic....

D'après leur mode d'action on observe qu'ils sont très efficaces dans les environnements très acides. (Millet, 2008)

3) Les inhibiteurs mixtes :

Ce sont des inhibiteurs qui agissent à la fois en bloquant les sites de réactions anodiques et cathodiques.

L'ajout simultané de deux types d'inhibiteurs de corrosion «effet de synergie» peut améliorer l'effet d'inhibition et peut également éliminer le risque de corrosion par piqûres à de faibles concentrations. Cet inhibiteur consiste généralement en une combinaison d'un oxydant tel que le nitrate ou le chromate et d'un non oxydé, mais précipitera sous forme d'orthophosphate ou de silicate.

Des exemples de tels inhibiteurs sont : le mélange nitrate + benzoate, qui est l'inhibiteur le plus courant et le plus efficace pour les radiateurs de voiture, un autre exemple est l'orthophosphate + chromate, qui est très efficace même dans l'eau salée. Dans d'autres cas, l'inhibiteur mixte est un mélange d'inhibiteur de cathode et d'inhibiteur d'anode, tel que polyphosphate + chromate (Marmi, 2017).

2.3 Utilisation des inhibiteurs de corrosion aqueux dans le béton : **Etat de l'art :**

Les inhibiteurs de corrosion peuvent empêcher ou retarder la corrosion des barres d'acier dans le béton. Ils peuvent être utilisés comme mesures préventives dans les nouvelles structures en béton armé (ajoutées à l'eau de gâchage ou appliquées sur des surfaces en acier), ou comme mesures thérapeutiques (appliquées sur des surfaces en béton) pour empêcher le développement de la dégradation.

Actuellement, un certain nombre d'inhibiteurs aqueux ont prouvé leur pouvoir protecteur contre la corrosion des armatures on distingue:

- Les inhibiteurs inorganiques, tels que les nitrites et le monofluorophosphate de sodium (MFP), qui ont été utilisés comme inhibiteurs de migration sous forme de revêtements liquides sur béton durci en phase de réparation.
- Les composés organiques à base d'alcanolamines, d'amines ou de mélanges d'acides aminés ou d'émulsions d'esters d'acides gras, utilisés comme inhibiteurs de migration (appliqués à la surface du béton) et additifs (ajoutés en grande quantité au cours du processus de production du béton).

2.3.1 Modes d'application des inhibiteurs de corrosion dans le béton :

Les principales méthodes d'application des inhibiteurs de corrosion dans le béton sont soit :

- L'adjuvantation : Les inhibiteurs peuvent être ajoutés au béton frais ou à l'eau de gâchage «Adjuvant pour béton», généralement utilisé comme mortier de réparation,

- L'imprégnation en surface : ou appliqué sur la surface du béton durci comme un traitement de consolidation et d'imperméabilisation pour protéger le béton, donc appelé inhibiteur de corrosion migrateur imprégné en surface.

La figure 2.3, illustre les différentes phases de pénétration de l'inhibiteur de corrosion dans le béton (Holloway, 2004).

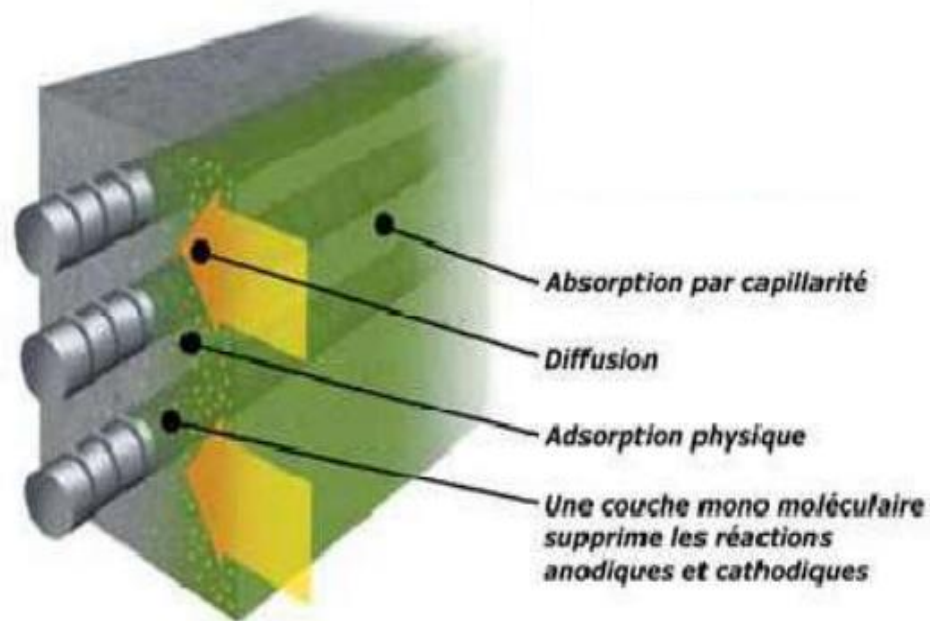


Figure 2.3: Action de l'inhibiteur migrateur dans le béton (Matthieu, 2008)

Lors de l'application des inhibiteurs sur le parement en béton armé, Il est d'abord absorbé par capillarité, et pénètre à travers les pores du béton par un processus de diffusion jusqu'à atteindre l'armature, dans cette étape, il s'adsorbe sur la surface de l'acier en formant un film de protection qui supprime les réactions anodiques et cathodiques.

Ce produit qui migre via la surface du béton « produit migrateur » doit avoir une action rapide et vérifiable, en outre, il doit :

- * être performant pendant de nombreuses années ;
- * être efficace dans le milieu d'étude.

Les paramètres d'efficacité à prendre en compte lors de l'utilisation des inhibiteurs de corrosion sont :

a- L'influence de l'état de surface de l'acier (absence de discontinuité acier/béton):

L'utilisation des inhibiteurs de corrosion permet de protéger l'ensemble des aciers en situation de risque de corrosion, sans avoir à purger le béton contaminé ou carbonaté, à condition qu'aucun phénomène d'épaufrure ou décollement acier / béton n'ait débuté [Joceline, 2003].

b- La pénétration du produit :

La pénétration des inhibiteurs à l'intérieur d'un béton dépend de nombreux paramètres: la porosité du béton, l'humidité, le degré de carbonatation, le type de ciment utilisé, la teneur en chlorures, les traitements préalables, etc.

Ainsi, cette pénétration ne peut pas, à ce stade des connaissances, faire l'objet d'une modélisation précise. Par conséquent, il est toujours nécessaire de vérifier la pénétration de l'inhibiteur par des tests de validation in situ.

c- La concentration minimale efficace au droit des armatures :

Celle-ci doit être précisée par le fabricant, sur la base de résultats d'essais représentatifs, en tenant compte notamment de la teneur en chlorures dans le béton au droit des armatures (limite d'efficacité)[Joceline, 2003].

Le recours aux inhibiteurs permet de conserver au maximum l'aspect initial de l'ouvrage et de réduire les zones à dégarnir.

Avant d'appliquer un inhibiteur, la surface du béton doit être préparée. Il s'agit d'éliminer la peinture ou autre revêtement par sablage ou hydro sablage. Un traitement par inhibiteur n'est pas possible si la surface a été préalablement traitée avec un hydrofuge. Un inhibiteur qui est sous forme liquide, s'applique directement à la surface du béton. Les solutions gélifiées s'appliquent en une fois.

Plusieurs méthodes d'application peuvent être testées, afin de valider la mise en œuvre la plus adaptée. Il est indispensable de procéder à l'évaluation de la quantité de produit dans le béton et à la détermination de sa concentration au droit de l'armature, sur la base des essais de convenance (validation de la

procédure). Cette concentration doit être conforme aux spécifications du fabricant, concernant la concentration minimale efficace.

La durabilité du traitement peut être vérifiée par :

- des mesures de teneur en inhibiteur au niveau de l'acier après quelques années,
- le suivi dans le temps des mesures de potentiels (cartographie) ou de courants de corrosion (résistance de polarisation).

Aucune norme ne définit les classes d'inhibiteur permettant de juger de leur efficacité intrinsèque (Joceline, 2003).

2.3.2 Application des Monofluorophosphates (MFP) :

Depuis 1980, des inhibiteurs de corrosion utilisés pour réparer ou protéger les structures existantes et appliqués sur les surfaces en béton ont été introduits.

Ces inhibiteurs de corrosion sont également appelés inhibiteurs de migration (MCIs pour Migrating Corrosion Inhibitors). Le plus largement utilisé est le monofluorophosphate de sodium (MFP) au cours des vingt dernières années.

Le MFP ($\text{Na}_2\text{PO}_3\text{F}$) peut être considéré comme une anode, une cathode ou un inhibiteur mixte. Il est appliqué sur la surface du béton sous la forme d'une solution aqueuse avec un pourcentage massique de 10-20%.

En effet, le MFP ne peut pas être ajouté au moment du gâchage, car cela modifiera non seulement les propriétés mécaniques du béton, mais entraînera également un retard dans la prise. L'efficacité du MFP repose non seulement sur sa diffusion dans le réseau poreux du béton, mais aussi sur son effet sur la surface de la barre d'acier.

Dans le coulis de béton, le MFP réagit avec les ions calcium pour former de l'apatite, c'est-à-dire un composé insoluble de formule $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{X}$, où l'anion X est OH^- , Cl^- ou F^- , conduisant ainsi à la consommation de la substance active PO_3F^{2-}

2.3.3 Evolution de la recherche sur les inhibiteurs de corrosion aqueux dans le béton :

La recherche sur le moyen d'intégration des inhibiteurs de corrosion susceptible de protéger l'acier de la corrosion a évolué durant ces dernières années, tout en étudiant les molécules inhibitrices responsables de l'inhibition de la corrosion.

Le tableau 2.1 Résume quelques travaux de la littérature sur les inhibiteurs aqueux étudiés dans des milieux alcalins simulant les pores du béton, ou le béton lui-même.

Tableau 2.1 : Travaux de recherche sur les inhibiteurs aqueux dans le milieu béton

(Auteur, date)	Titre de l'article	Inhibiteur d'étude	Milieu d'étude	Mode de traitement
(Junichuro et al, 2013)	Application of electrochemical organic corrosion inhibitor injection to a carbonate reinforced concrete railway viaduct	Solution d'Ethanolamine	Béton carbonaté	Réparateur Injection dans un béton carbonaté
(Mendoza-Wilson et al, 2013)	Potential of polyphenols from an aqueous extract of apple peel as inhibitors of free radicals :An experimental and computational study	Extrait aqueux d'écorce de pomme	Milieu aqueux	Préventif
(Chakri, 2015)	Compréhension des mécanismes d'inhibition de la corrosion des armatures métalliques des bétons par des molécules d'origine biologique	Bio-adjvant	Solution interstitielle du béton	Préventif Cop= 10% Bioadjvant Amélioration du film adsorbé.
(Xu et al, 2016)	Organic corrosion inhibitor of triethylenetetramine into chloride contamination concrete by electro-injection method	Triethylenetetramine (TETA)	Echantillons de Béton contenant NaCl	Réparateur
(Shanmugapriya et al, 2017)	Corrosion resistanceproperty of mildsteel n simulated concrete pore solution prepared in well water by using an aqueousextract of turmeric	Extrait aqueux de Turmeric (Curcuma longa L),	Solution stimulant les pores du béton	Préventif Cop= 10 ml El= 98%

(Auteur, date)	Titre de l'article	Inhibiteur d'étude	Milieu d'étude	Mode de traitement
(Hassoune et al, 2017)	Corrosion inhibition of carbonsteel by N,N'Dimethylaminoethanol in simulated concrete pore solution contaminated with NaCl	N,N'-Dimethylaminoethanol (DMEA)	Solution simulant le béton avec NaCl	Préventif C _{op} = 0,125M/l EI= 85%
(Sanaei et al, 2019)	Application of green molecules from chicory aqueous extract for steel corrosion mitigation against chloride ions attack ; the experimental examinations and electronic/atomic level computational studies	Extrait de feuilles de chicorée (CLE) associé à des ions nitrate de Zinc	Electrolyte contaminée par les chlorures	Préventif 100 ppm Zn ²⁺ +100 ppm CLE EI= 96%
(Yanqi Wang et al, 2020)	Corrosion inhibition of galvanized steel by MnO ₄ ion as a soluble inhibitor in simulated fresh concrete environment	MnO ₄ ion	Milieu simulant le béton frais	Préventif C _{op} = 10 ⁻³ M MnO ₄ EI > 98 %
(Bellal et al, 2021)	A new corrosion inhibitor for steel rebar in concrete: Synthesis, electrochemical and theoretical studies	4- (3-Hydroxy-naphthalen-2-ylimino) -pentan-2-one (L2)	Béton immergé dans 0.5M NaCl	Préventif C _{op} = 10 ⁻⁴ M L2 EI= 93%
(Teymouri et al, 2021)	A comprehensive study on the inhibition behaviour of four carboxylate base corrosion inhibitors focusing on efficiency drop after the optimum concentration for carbonsteel in the simulated concrete pore solution	Acétate de sodium, Tartrate de potassium-sodium, citrate trisodique, acide Ethylènediaminet étracétique, sel disodique	Solution stimulant les pores du béton avec 0,5 M NaCl	Préventif EI= 91% avec 0,1M citrate trisodique
(Goyal, 2021)	Inhibitor efficiency of migratory corrosion inhibitors to reduce corrosion in reinforced concrete exposed to high chloride environment	MCI-1 et MCI-2 : inhibiteurs organiques, MCI-3 et MCI-4 : inhibiteurs d'amino-alcools MCI-5 et MCI-6 : inhibiteurs à base de surfactant et de sels d'amine.	Echantillons de béton contaminés par les chlorures	Réparateur Amélioration de la résistance à la corrosion par MCI -1 et MCI-2
(Diksha Dileep, 2022)	Evaluation of cerium oxide nanoparticle coating as corrosion inhibitor for mild steel	Cérium d'oxyde nanométrique CeO ₂	Solution stimulant les pores du béton avec 0,5 M NaCl	Préventif C _{op} = 1 wt% CeO ₂ revêtements époxy/CeO ₂ adhérence élevée

2.4 Conclusion :

Des recherches approfondies sur les inhibiteurs de la corrosion de l'acier au cours de ces deux dernières décennies ont conduit à trouver des produits ou mélanges de produits spécifiques correspondant à un système de corrosion donné (couples métal-milieu corrosif). Cependant, chaque situation de corrosion reste une situation particulière, 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.

Les inhibiteurs de corrosion peuvent être ajoutés au béton de différentes formes, leurs modes d'intégration en phase aqueuse fait l'objectif de cette recherche ce qui sera détaillé dans le chapitre suivant.

Chapitre 3 :
Méthodes d'intégration des
d'inhibiteurs de corrosion
aqueux dans le béton.

3.1 Introduction :

L'application des inhibiteurs de corrosion demeure une meilleure alternative qui a prouvé son efficacité vis-à-vis le prolongement de la durée de vie des structures en béton armé. L'intégration de ces produits inhibiteurs peuvent s'appliquer de différentes formes.

L'évaluation de l'efficacité d'un inhibiteur peut être testée soit par des méthodes gravimétriques (en se basant sur la perte de masse d'un métal) ou bien par des méthodes électrochimiques (en se basant sur les mesures des paramètres électriques d'un métal soumis à un milieu définie).

Dans ce chapitre, on va exposer les modes d'intégration des inhibiteurs aqueux dans le béton tout en citant les méthodes de mesure des efficacités inhibitrices et la nature du film adsorbé en surface suite à l'application de ces inhibiteurs.

3.2 Méthodes de mesures des efficacités inhibitrices :

Parmi les techniques de mesures des efficacités inhibitrices d'un produit inhibiteur, on distingue :

- Les mesures gravimétriques
- Les mesures électrochimiques

Les techniques d'analyse de surface sont utilisées pour étudier la nature du film adsorbé sur la surface du métal suite à l'application de l'inhibiteur.

3.2.1 Les mesures gravimétriques :

Parmi les méthodes d'évaluation de la corrosion d'un métal exposé à une solution électrolytique, les mesures gravimétriques se basant sur les essais de perte de masse demeurent une première approche de l'étude de l'inhibition de la corrosion d'un acier dans une solution électrolytique. La méthode de perte de masse est d'une mise en œuvre simple et ne nécessite pas un appareillage important.

Ces mesures de perte de masse nous donnent une estimation directe de la vitesse de corrosion de l'acier immergé dans la solution électrolytique en présence d'agents agressifs qui sont dans notre cas, les ions chlorures (Sail, 2013).

L'organigramme présenté dans Fig.1 décrit les étapes de mesures de l'efficacité inhibitrice d'un produit inhibiteur mis dans une solution électrolytique corrosive par mesures de perte de masse.

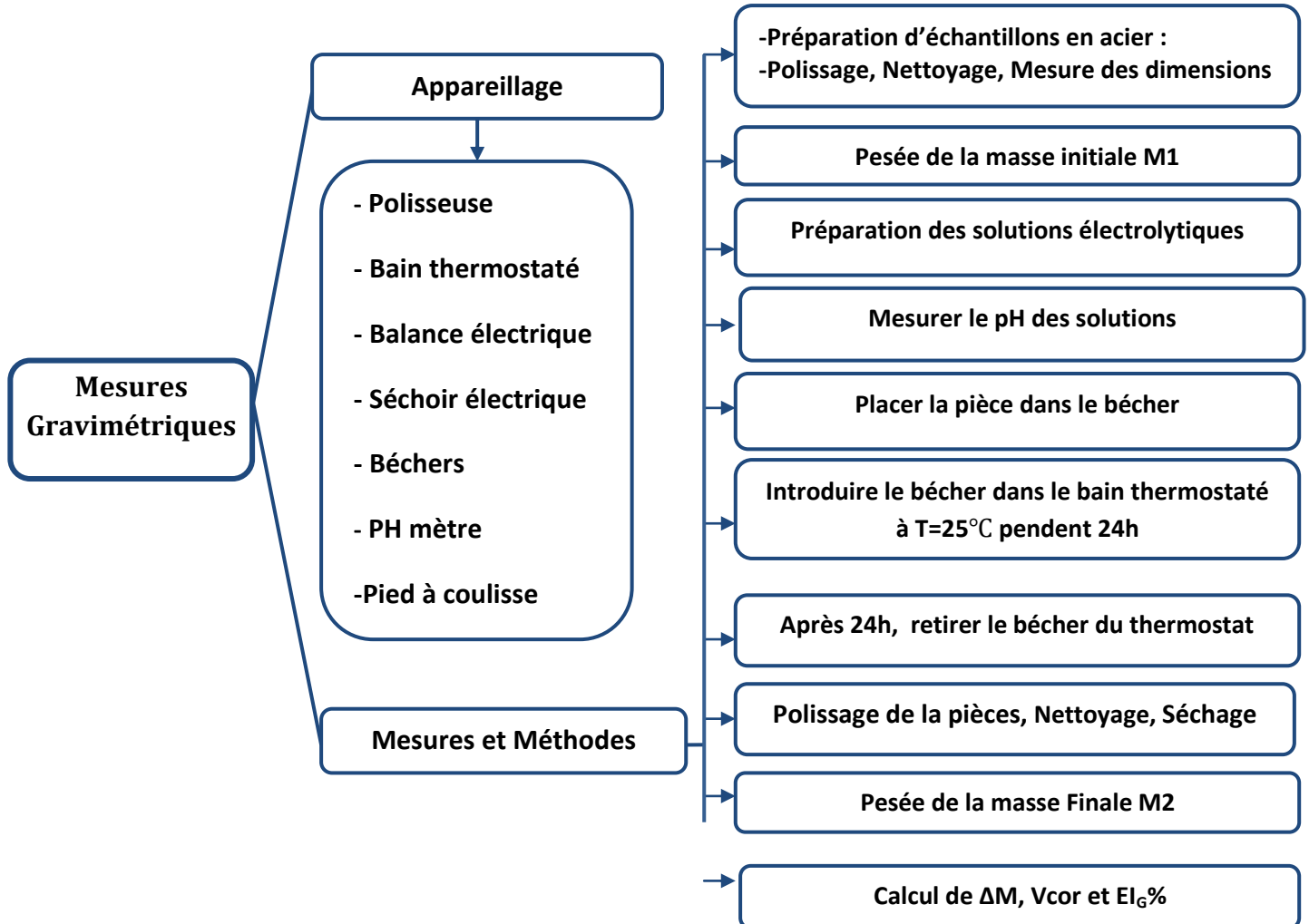


Figure 3.1: Etapes de mesures gravimétriques (Abdelli, 2020)

$$\text{Avec : } \Delta m = m_1 - m_2 \quad \text{Eq. (3.1)}$$

$$V_{corr} = \frac{\Delta m}{S \cdot t} \quad (\text{mg.cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}) \quad \text{Eq. (3.2)}$$

V_{corr} : La vitesse de corrosion ($\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$).

S : La surface de l'acier exposée en cm^2 .

t : Temps d'immersion dans la solution (heures).

L'efficacité inhibitrice EI % est donnée par la relation suivante :

$$EI\% = \frac{V_0 - V_{inh}}{V_0} * 100 \text{Eq. (3.3)}$$

3.2.2 Les mesures électrochimiques :

La corrosion des armatures étant un phénomène électrochimique qui conduit à la dissolution du fer et la naissance de produits de corrosion qui mènent à la destruction de l'enrobage du béton.

Ce mécanisme électrochimique implique la présence de plusieurs paramètres qui influent sur le processus de la corrosion. De ce fait, l'application des inhibiteurs de corrosion à son tour agit électro-chimiquement sur l'armature et conduit à la déposition d'une couche protectrice qui s'appelle film inhibiteur dont les propriétés peuvent être caractérisées par des méthodes spécifiques.

La figure 3.2 décrit les méthodes électrochimiques appliquées pour la détermination des paramètres électriques entrant dans le processus de la corrosion.

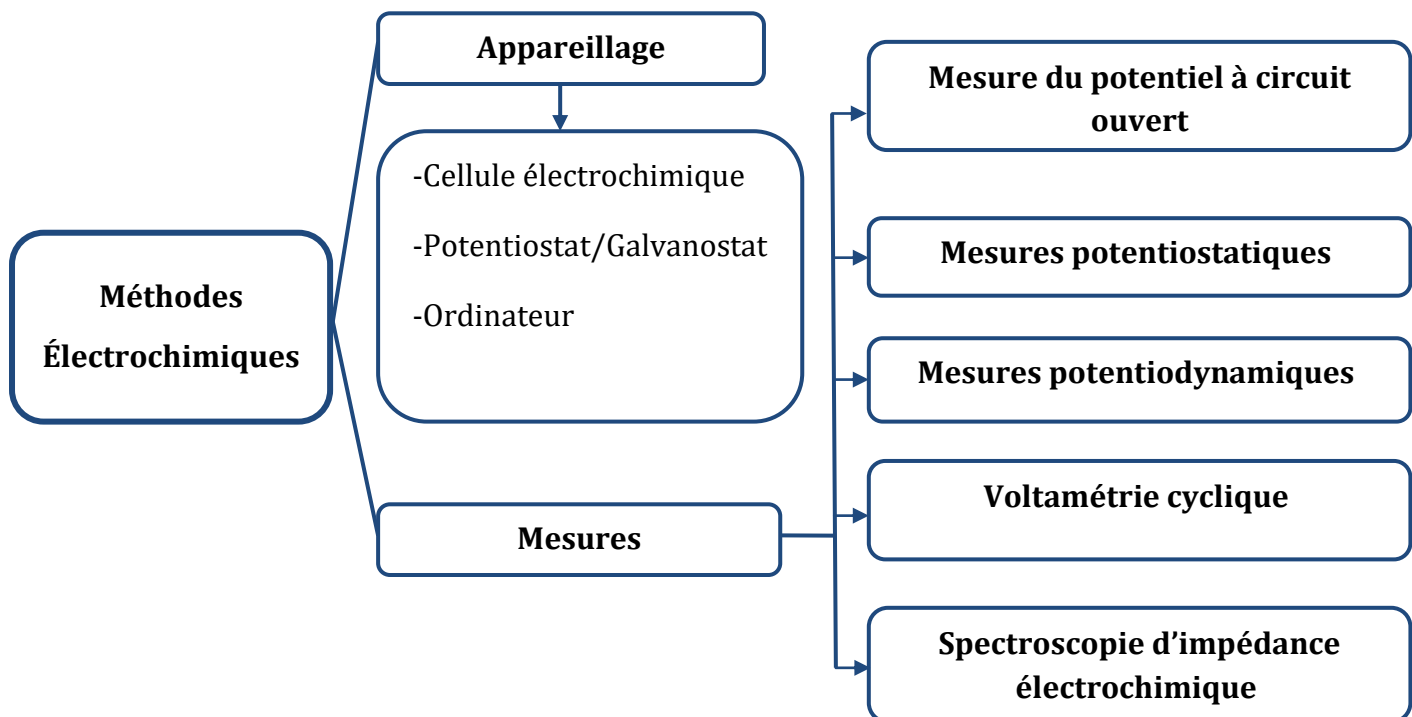


Figure 3.2: Mesures électrochimiques (Abdelli, 2020)

Les mesures électrochimiques permettent de déterminer les paramètres entrant dans le mécanisme d'inhibition de la corrosion à citer : le potentiel de corrosion, courant de corrosion, résistance de polarisation.

3.2.2.1 Mesure du potentiel à circuit ouvert OCP:

C'est le premier paramètre qui donne une indication directe sur l'état de l'armature (corrosion, passivation), appelé aussi potentiel abandon ou potentiel libre en fonction du temps d'immersion, Cette technique simple apporte des informations préliminaires sur la nature des processus en cours, à l'interface métal / électrolyte.

Le suivi du potentiel libre est déterminé en fonction du temps jusqu'à l'obtention du potentiel d'équilibre. On peut aussi déterminer directement la valeur du potentiel de corrosion en mesurant le potentiel entre l'électrode de travail et l'électrode de référence.

La corrosion est considérée active lorsque la valeur du potentiel de corrosion (E_{corr}) mesuré franchi une certaine "limite", associées à une probabilité de corrosion de 90% d'après la norme ASTM (ASTM C 876 1991), $E_{corr} \leq -275$ mV vs.ECS ou $E_{corr} \leq -350$ mV vs. ESC. Cette limite est utilisée pour la détermination de l'amorçage de la corrosion. (Hassoune, 2018)

Fig3.3 montre un exemple de courbes de potentiel à circuit ouvert.

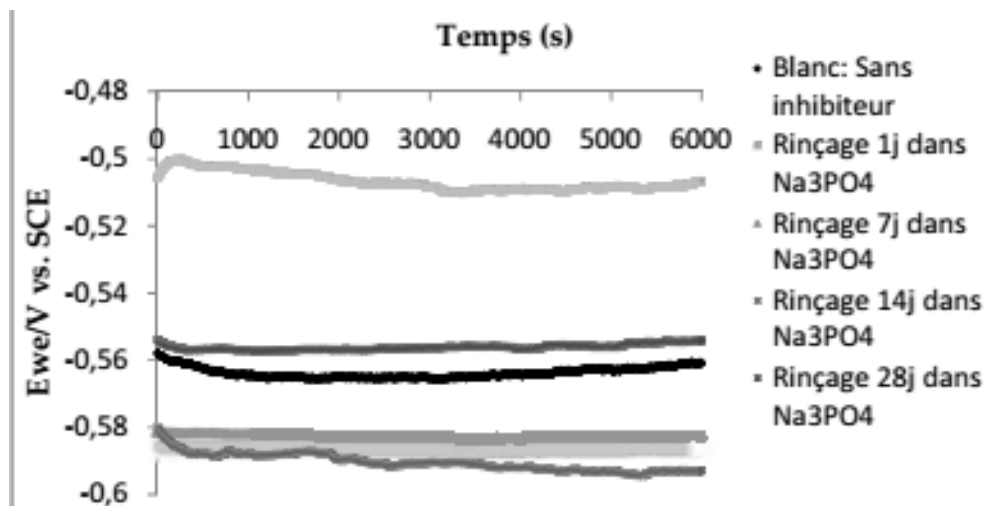


Figure 3.3: Courbes OCP par durée d'immersion dans $1\text{M Na}_3\text{PO}_4$ (Sail, 2013)

3.2.2.2 Les Mesures potentiostatiques :

Les mesures potentiostatiques consistent à maintenir le potentiel constant et d'enregistrer entre temps le courant de corrosion. On trace la courbe du courant "i" en fonction de la durée de temps.

Cette méthode est particulièrement utile afin d'identifier les phénomènes de transport dans l'électrolyte et d'étudier l'évolution du film passif.

La figure 3.4 montre un exemple de courbes potentiostatiques

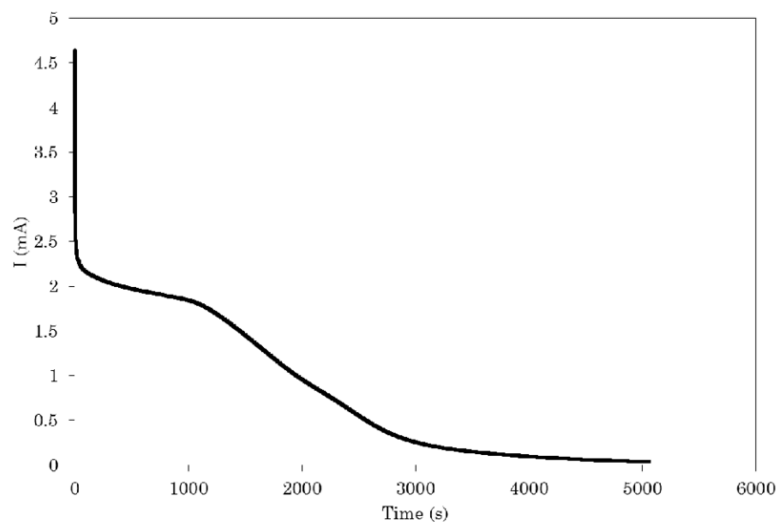


Figure 3.4 : Courbes potentiostatiques (Larfaillio, 2015)

3.2.2.3 Les mesures potentiodynamiques "PPD" :

Les courbes de polarisation potentiodynamiques sont déterminées en appliquant un potentiel à une électrode de travail et mesurer le courant correspondant.

.En effet, les mesures électrochimiques sont effectuées en présence d'un potentiostat-Galvanostat lié à une cellule électrochimique qui est à son tour munie de trois électrodes : Une électrode de travail qui est l'armature ou l'acier, une contre électrode, appelée électrode auxiliaire en platine ou en titane et une électrode de référence pour mesurer le potentiel de corrosion entre les deux parties.

La présentation du potentiel en fonction de la densité de courant (I) (ou $\log I$) pour chaque point mesuré permet d'obtenir la courbe de polarisation, cette dernière peut être utilisée pour déterminer le potentiel de corrosion et le taux de corrosion du métal dans l'état donné (pente Tafel).

Cette courbe de polarisation est donnée sous forme : $\log(I)=f(E)$, (figure 3.5), la densité du courant de corrosion est obtenue par l'intersection des droites (anodique et cathodique) de Tafel, extrapolées au potentiel de corrosion on obtient le courant I_{corr} ($\mu A/cm^2$).

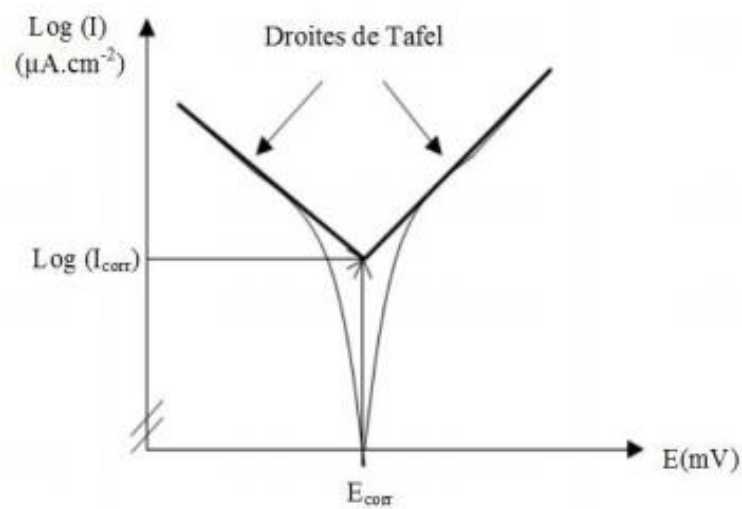


Figure 3.5: Schématisation du courant de corrosion (I_{corr}) par la technique de Tafel plots (Sail, 2013)

Le taux de l'efficacité inhibitrice est déterminé à partir du courant de corrosion circulant dans le milieu électrolytique en absence et en présence de l'inhibiteur d'étude.

$$EI(\%) = \frac{I_{0\ inhib} - I_{inhib}}{I_{0\ inhib}} \cdot 100 \quad \text{Eq. (3.4)}$$

Où I_{inhib} et $I_{0\ inhib}$ désignent respectivement les densités de courant de corrosion en présence et en absence de l'inhibiteur.

3.2.2.4 La voltamétrie cyclique (méthode à balayage en potentiels) :

Les mesures de voltamétrie cyclique consistent à effectuer des balayages linéaires en potentiels autour d'une position donnée et d'observer les éventuelles apparitions et/ou disparition des phénomènes électrochimiques (oxydation et/ou réduction).

Certains paramètres, tels la vitesse de balayage, permettent de rendre compte de 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 [Pascale, 2005]. Fig3.6 montre un exemple de courbes de voltamétrie cyclique

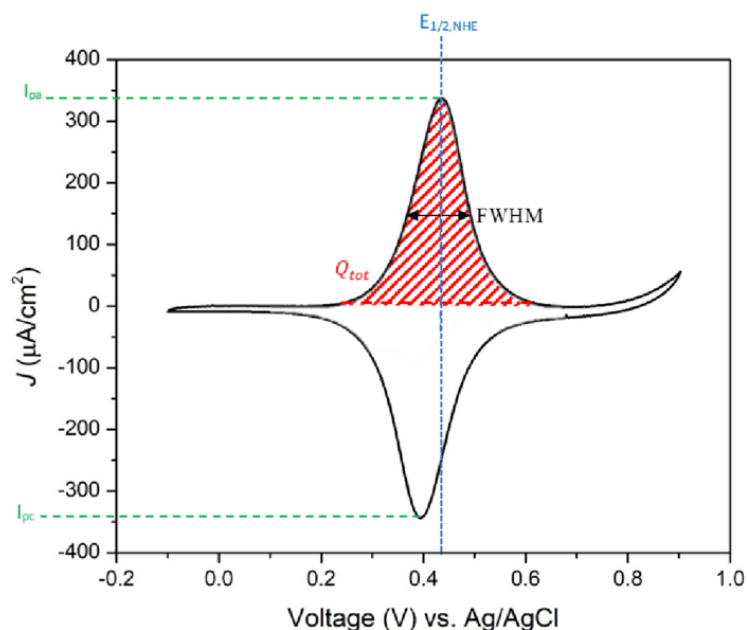


Figure 3.6: Courbes de voltamétrie cyclique (Brunel, 2020)

3.2.2.5 Spectroscopie d'impédance électrochimique SIE :

La mesure de l'impédance électrochimique consiste à étudier la réponse du système électrochimique, suite à une perturbation qui est, le plus souvent, un signal alternatif de faible amplitude.

L'avantage de cette technique par rapport aux précédentes, est de différencier les phénomènes réactionnels par leur temps de relaxation. Seuls les processus rapides sont caractérisés à hautes fréquences; lorsque la fréquence appliquée diminue, apparaîtra la contribution des étapes plus lentes, comme les phénomènes de transport ou de diffusion en solution (Landolt, 1993).

Le rôle de l'inhibiteur dans les différents processus intervenant à l'électrode (transfert de charge, diffusion, adsorption...) est bien élucidé. Les valeurs de la résistance de transfert et de la résistance de polarisation permettent de calculer la vitesse de corrosion même dans le cas où le métal est recouvert d'une couche protectrice.

La S I E permet aussi l'évaluation du taux d'inhibition, la caractérisation des différents phénomènes de corrosion (dissolution, passivation, piqûrations...) et l'étude des mécanismes réactionnels à l'interface électrochimique (Lebrini, 2005).

Les mesures de l'impédance électrochimique permettent de tracer les courbes de Nyquist, en fonction desquelles, on peut déduire les paramètres électrochimiques (Fig3.7).

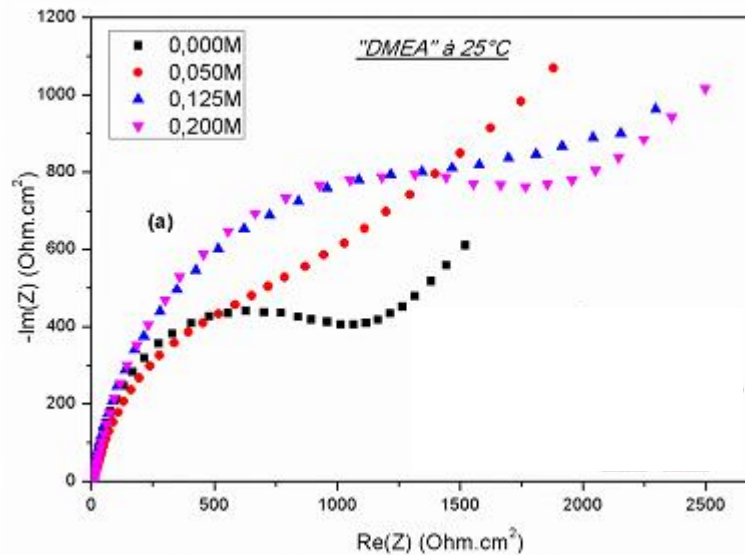


Figure 3.7: Diagrammes de Nyquist obtenu pour l'acier au carbone immergé dans la solution à différentes concentration en DMEA (Hassoune, 2018) :

Les différents processus se déroulant à l'interface électrode/électrolyte peuvent être modélisés par la construction d'un circuit électrique équivalent. Chacun des composants utilisés, branchés en série ou en parallèle, représente un phénomène physique particulier. Ces modèles sont ensuite utilisés pour ajuster les diagrammes expérimentaux afin d'extraire les paramètres nécessaires à la compréhension du système étudié (Jorcin, 2007).

L'efficacité inhibitrice est estimée à l'aide de l'extrapolation des diagrammes de Niquist, la résistance de transfert de charge représente ainsi le paramètre essentiel qui permet la détermination de cette efficacité.

$$EI(\%) = \frac{R_{ct} - R_{ct0}}{R_{ct}} \cdot 100 \quad \text{Eq. (3.5)}$$

Où : R_{ct} et R_{ct0} représentent respectivement les résistances de transfert de charge en présence et en absence de l'inhibiteur.

3.2.3 Méthodes d'analyses de surface:

La corrosion est un phénomène électrochimique, de ce fait, les méthodes d'analyse de surface rendent compte de l'état du métal (dissolution, immunité ou passivité) sont nécessaires pour compléter l'interprétation des résultats obtenus par mesures électrochimiques. On distingue parmi ces méthodes :

3.2.3.1 La microscopie électronique à balayage (MEB) :

La microscopie électronique à balayage "MEB" est une technique de caractérisation texturale et chimique locale de matériaux massifs basée sur l'interaction de ces matériaux avec un faisceau d'électrons focalisé, d'énergie comprise entre 0.5 et 0.35 KV. Les différents rayonnements émis sous l'impact du faisceau d'électrons (électrons secondaires, électrons rétrodiffusés et rayons X) sont utilisés pour former des images exprimant des propriétés différentes du matériau (topographie, hétérogénéité de composition élémentaire locale respectivement) (Perrin, 2016).

3.2.3.2 Spectroscopie infrarouge :

La spectroscopie infrarouge est une technique analytique simple et rapide permettant de déterminer la présence de divers groupes fonctionnels.

La spectroscopie IR se base sur les interactions des radiations électromagnétiques avec les molécules ou les atomes. Elle mesure tout simplement l'absorption des fréquences IR qui s'étalent de 4000-500 cm⁻¹ cette technique permet de mettre en évidence la présence de l'ion compensateur dans l'espace ainsi que les interactions qui peuvent exister [Hesse et al, 1997].

3.2.3.3 Diffraction des rayons X :

La diffractométrie de rayons X est une méthode d'analyse physico-chimique basée sur la diffraction des rayons X sur la matière. Cette technique est utilisée pour caractériser la matière. Les directions dans lesquelles les interférences sont constructives, appelées « pics de diffraction », (Saadoune, 2010).

3.2.3.4 *Résonance magnétique nucléaire RMN :*

C'est la plus explicite des méthodes spectroscopiques couramment utilisées de nos jours. Son utilisation est bénéfique pour suivre l'évolution des réactions, la détermination des structures ou pour l'étude de l'effet stérique des groupements substitués. Le spectre RMN peut nous indiquer les déplacements chimiques et les constantes de couplage qui sont extrêmement importants de part les renseignements qu'ils donnent sur le nombre, la nature et l'environnement des protons dans le squelette de la molécule.

Le principe de cette méthode repose sur le fait que chaque noyau atomique possède une charge, une masse et peut posséder aussi un spin. Un moment dipolaire magnétique, un moment quadripolaire électrique. De ce fait, tout noyau possédant un spin peut être étudié par RMN (Browning, 1974).

3.2.4 Les isothermes d'adsorption :

Une isotherme d'adsorption décrit le mode d'adsorption des molécules inhibitrices sur la surface du métal, ce mode d'adsorption est défini par un modèle qui caractérise la nature de l'adsorption; qui est ainsi représentée par une courbe reliant l'activité de l'adsorbat contenu dans une atmosphère donnée et connue à la quantité d'adsorbat fixée sur un solide en équilibre avec cette atmosphère (Nebbar, 2010). On peut récapituler les modèles les plus utilisés dans le Tableau 3.1

Tableau 3.1 : Isothermes d'adsorption

Isotherme	Equation	Expression de ΔG
Langmuir	$C/\theta = 1/K + C$	
Frumkin	$\log \{\theta/(1-\theta) C\} = \log K + g\theta$	$\Delta G_{ads} = -RT \ln(K \times 55.5)$
Temkin	$\log (\theta/C) = \log K - g\theta$	
Freundlich	$(\theta) = L(K) + n \ln(Cinh)$	

Où : S: surface du solide

θ : taux de recouvrement soit l'occupation des sites

K : La constante d'équilibre de l'inhibiteur

g: paramètre de l'adsorbat

L'enthalpie libre standard ΔG_{ads} est en relation directe avec le coefficient d'équilibre d'adsorption K, ce dernier est obtenu par les différents modèles d'isotherme d'adsorption déjà cités (Langmuir, Freundlich, Temkin et Frumkin...).

R est la constante de gaz, $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$;

T : la température absolue (Kelvin) ;

La valeur constante de 55,5 est la concentration d'eau dans la solution exprimée en Mol.

Généralement, les valeurs de ΔG_{ads} , voisines de -20 kJ mol^{-1} ou moins négatives, sont liées à des interactions électrostatiques entre les molécules chargées et le métal chargé (adsorption physique), alors que celles proches de -40 kJ mol^{-1} ou plus négatives impliquent un transfert de charge entre les molécules organiques et la surface métallique (chimisorption) (Dean, 1973).

3.3 Méthodes d'intégration des inhibiteurs aqueux dans le béton :

Les inhibiteurs de corrosion aqueux sont généralement ajoutés au béton de plusieurs manières, l'organigramme exposé en figure 3.8 décrit ces différents modes d'intégration.

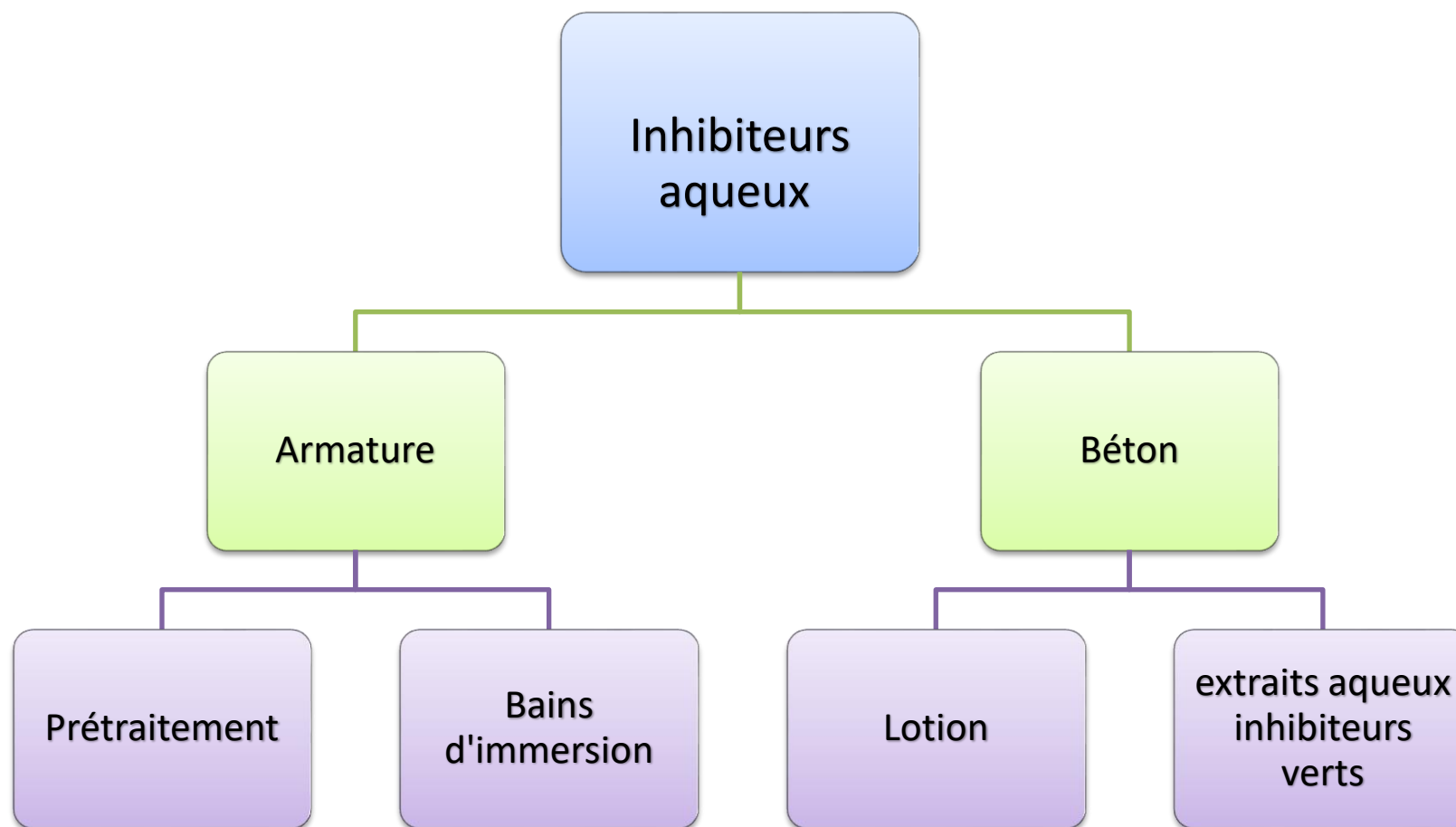


Figure 3.8 : Organigramme décrivant les modes d'intégration des inhibiteurs aqueux

3.3.1 Le prétraitement :

Les revêtements par mode de prétraitement des armatures en acier préalablement nettoyées sont appliqués comme première méthode directe de prévention contre la corrosion, ils sont aussi susceptibles de favoriser l'adhérence des couches primaires à la surface de l'acier tout en assurant une protection de ce dernier contre les réactions chimiques et ceci grâce à la formation d'un film imperméable sur l'armature.

Tableau 3.2 : Application des inhibiteurs aqueux en mode de prétraitement

Auteur et date	Inhibiteur utilisé	Mode d'intégration	Méthode de mesure	Nature de film
(Etteyeb et al, 2010)	Phosphate de Sodium (Na_3PO_4),	un prétraitement de l'acier dans des solutions inhibitrices molaires 0.5 M Na_3PO_4	potentiel de corrosion, résistance de polarisation et spectroscopie d'impédance électrochimique	le film d'oxyde formé sur l'acier correspond à 0.3–3 de couches moléculaires
(SAIL, 2013)	Phosphate de Sodium (Na_3PO_4),	un prétraitement de l'acier dans des solutions inhibitrices molaires 1M Na_3PO_4 pour des durées d'immersion de : 1, 7, 14 et 28 jours.	Mesures électrochimiques Mesures Analytiques MEB et EDX	Un film formé d'aiguilles rassemblées sous forme de cristaux cubiques
(SAIL, 2013)	Monohydrogénophosphate de Potassium (K_2HPO_4)	un prétraitement dans des solutions inhibitrices molaires 1M K_2HPO_4 pour des durées d'immersion de : 1, 7, 14 et 28 jours.	Mesures électrochimiques Mesures Analytiques MEB et EDX	Un film sous forme de couches poreuses spongieuses

(SAIL, 2013)	Monofluorophosphate de sodium (NaMFP ou $\text{Na}_2\text{PO}_3\text{F}$)	un prétraitement dans des solutions inhibitrices molaires 1M $\text{Na}_2\text{PO}_3\text{F}$ pour des durées d'immersion de : 1, 7, 14 et 28 jours.	Mesures électrochimiques Mesures Analytiques MEB et EDX	Un film sous forme de nodules fortement rassemblés sous forme de roses de sables
(Yanqi Wang et al, 2020)	KMnO_4	10^{-3} mol.l ⁻¹ KMnO_4 a été ajouté dans la solution SCP pour évaluer l'efficacité de l'inhibition de l'ion MnO_4^- sur la RDHE de l'acier galvanisé.	Méthode d'évolution d'hydrogène RDHE SIE	Film protecteur composé (Mn, Ca)
(DikshaDileep et al, 2021)	Ceriumd'oxide nanoparticle	Le revêtement a été obtenu en mélangeant différentes concentrations de nanoparticules de CeO_2 avec une résine époxy à base d'eau	Potentiel à circuit ouvert Polarisation linéaire Tafel	Film imperméable et efficace à long terme

3.3.2 Les bains d'immersion

a- La phosphatation :

La phosphatation est un procédé de transformation chimique qui consiste à transformer la surface de certains métaux (acier, fonte, zinc, aluminium, titane) en phosphate métallique stable et insoluble. Cette couche est adsorbée sur le métal et lui confère différentes caractéristiques.

L'acier est ainsi immergé dans un bain de phosphatation ce qui permet la formation d'un film protecteur en surface.

b- La Conversion chimique :

Un revêtement de conversion chimique est un revêtement produit par réaction électrochimique ou chimique de métaux donnant une couche superficielle qui contient le composé métallique, .il offre une protection chimique contre la corrosion et une surface adaptée au revêtement en poudre et à la peinture. Le Cr(VI) adsorbé à la surface empêche l'adsorption des anions tels que Cl⁻. Cette méthode n'est pas largement applicables dans les armatures en acier suite à la toxicité du chrome.

C- La galvanisation ou chromatation:

Elle consiste à recouvrir une pièce d'une couche de ou de zinc ou de chrome dans le but de la protéger contre la corrosion .le traitement est dit anticorrosif, .ce mot vient au nom de l'inventeur Luigi Galvani.

Tableau 3.3 : Application des inhibiteurs aqueux en mode d'immersion

Auteur et date	Inhibiteur utilisé	Mode d'intégration de l'inhibiteur	Méthodes de mesure	Nature de film
(Bejinariu et al, 2015)	Bain phosphaté à base de H_3PO_4	Le dépôt par pulvérisation a été effectué afin d'évaluer le dépôt à différentes concentrations et temps de pulvérisation. Les échantillons ont été pulvérisés avec de l'eau distillée, avant la phosphatation, en raison de la réactivité des solutions utilisées.	Microscopie par imagerie Spectres EDX	Film sous forme de cristaux Revêtement compact de l'acier
(Bensabra et al, 2013)	Bainde phosphate de zinc modifié par des ions Ni^{2+}	Le traitement de phosphatation à été réalisé dans une cellule à double paroi chauffée à l'aide d'un bainthermostaté. Après un décapage mécanique, les échantillons on été immergés dans le bain de phosphaté.	Potentiellibre, Mesures potentiodynamique sSIE.	un film d'oxyde de fer étanche et bien adhérent à la surface
(Elshami et al, I 2017)	Revêtement au phosphate de zinc	Trente bains de ZP ont été développés et formés par CC. - 10 bains avec différentes concentrations d'acide nitrique ; -10 bains avec différentes concentrations de sulfate de nickel -4 bains avec différentes concentrations de cuivre et de zirconium ; -6 bains avec différentes concentrations d'acide phosphorique.	Conversion chimique Protection cathodique	Un film uniforme en surface Composé d'hopeite et phosphophyllite
(Simescu, 2008)	Revêtement au phosphate de zinc	L'acier est immergé dans un bain phosphatant généralement porté à une température comprise entre 40 et 100 °C Le bain de phosphatation contenant de l'acide phosphorique, de l'acide nitrique, des ions zinc et nickel. Le revêtements de phosphate par traitement électrochimique cathodique (TEC) à un potentiel imposé (PI) ou à une densité de courant imposée (CI)	Microscopie électronique à balayage couplée à l'EDS et par la diffraction des rayons X (DRX)	Film superficiel stable sous forme d'une structure de granules et de feuilletés organisés en rose des sables,

3.3.3 Les Lotions:

L'inhibiteur utilisé en lotion peut être soit commercialisé sous forme liquide, c'est un produit chimique prêt à l'emploi, ou bien obtenu par mélange d'une quantité de produit solide à l'eau distillée ou d'autres produits éventuellement qui assurent sa solubilité.

Les inhibiteurs en lotion peuvent être appliqués comme mode de traitement réparateur pour un béton contaminé par les chlorures ou bien aussi dans le traitement d'un béton carbonaté. Des recherches exposées dans cette partie montrent l'utilisation des inhibiteurs aqueux par injection comme mode de réparation.

Tableau 3.4 : Application des inhibiteurs aqueux en mode de lotion

Auteur et date	Inhibiteur utilisé	Mode d'intégration de l'inhibiteur	Méthode de mesure	Nature de film
(Junichuro et al, 2013)	Solution aqueuse d'éthanolamine	La technique d'injection implique le passage d'un courant constant pendant une période de plusieurs jours entre une cathode en acier encastrée et une anode placée dans une solution aqueuse contenant l'inhibiteur de corrosion de base organique en contact avec la surface externe du matériau carbonaté.	Injection électrochimique de l'inhibiteur Profils de pénétration des inhibiteurs dans le béton	pénétration d'une concentration adéquate de l'inhibiteur au voisinage de l'acier pour la passivation
(Xu et al, 2016)	Triéthylentétramine (TETA)	Un champ électrique a été appliqué entre les cathodes en acier encastrées et les anodes externes pour injecter l'inhibiteur de corrosion des électrolytes externes dans les échantillons de béton et extraire les ions chlorure de la zone de couverture en béton.	Réhabilitation par Electromigration bidirectionnelle (BIEM) Extraction électrochimique des chlorures (ECE) Mesure des Profils de	L'inhibiteur utilisé en mode de réparateur d'où la combinaison des deux méthodes BIEM et ECE

			pénétration des inhibiteurs de corrosion, des ions chlorure et hydroxyle	
(Hassoune et al, 2017)	N,N'Diméthylaminoéthanol	Le DMEA a été utilisé sous forme liquide, il a été ajouté à la solution d'étude à différentes concentrations. Au mortier, l'inhibiteur est ajouté à l'eau de gâchage.	-Gravimétriques -Electrochimiques : potentiodynamique résistance de polarisation R_p SIE	Film stable, passif et homogène en surface de l'acier
(Teymouri et al, 2021)	-Acétate de sodium (Ace, $C_2H_3NaO_2$), -Tartrate de potassium et de sodium (Tar, $C_4H_4KNaO_6$), -citrate trisodique (Cit, $C_6H_5Na_3O_7$) et acide éthylènediaminetétracétique, sel disodique Edt, $C_{10}H_{14}N_2Na_2O_8$)	Toutes les solutions ont été préparées à partir de réactifs de qualité analytique et d'eau désionisée. Les inhibiteurs utilisés dans cette étude étaient l'acétate de sodium, le tartrate de potassium, le citrate trisodique et le sel disodique de l'acide éthylènediaminetétraacétique, ajoutés en quantité étudiée à la solution simulant les pores du béton.	les mesures électrochimiques : Spectroscopie d'impédance électrochimique (SIE), et analyses de Mott-Schottky Spectroscopie photoélectronique à rayons X (XPS)	Formation d'un réseau continu d'atomes près de l'interface métal/solution et empêchant les ions chlorure d'attaquer la surface de l'acier
(Goyal et al, 2021)	MCI-1 et MCI-2 inhibiteurs à base de silanes, MCI-3 et MCI-4 inhibiteurs d'amino-alcools MCI-5 et MCI-6	les inhibiteurs migrants ont été appliqués sur la surface de l'échantillon, par pulvérisation à dosage requis, conformément aux recommandations du fabricant.	Technique de polarisation potentiodynamique Potentiel à circuit ouvert Mesure de la résistivité électrique du béton	Structure d'un film de silane réticulé

	inhibiteurs à base de surfactants et de sels d'amines.			
--	--	--	--	--

3.3.4 Les extraits aqueux :

Les inhibiteurs de corrosion verts sont biodégradables et ne contiennent pas de métaux lourds ou d'autres composés toxiques. Ces inhibiteurs verts, écologiques composés de molécules responsables de l'inhibition de la corrosion, sont utilisés sous forme d'extraits solubles dans la solution d'étude. On peut utiliser ces extraits sous forme aqueuse comme expliqué dans les études citées dans le tableau suivant.

Tableau 3.5 : Application des inhibiteurs aqueux en mode d'extraits aqueux

Auteur et date	Inhibiteur utilisé	Mode d'intégration de l'inhibiteur	Méthodes de mesure	Nature de film
(Mendoza et al, 2012)	Extrait aqueux d'écorce de pomme	L'extrait aqueux est obtenu à partir de 1 g de poudre d'écorce de pomme et de 25 ml d'eau d'ionisée, ensuite centrifugé et congelé	La spectrophotométrie ultraviolet-visible théorie de densité fonctionnelle	Pouvoir antioxydant de l'extrait de pomme
(Shanmuga priyaa et al, 2018)	Extrait de Turmeric (Curcuma longa L),	50 grammes de poudre de curcuma (curcuma longa L) séchée sont bouillis avec de l'eau bidistillée pendant 10 minutes, les particules en suspension sont éliminées par filtration et la solution est complétée à 100 ml. Ensuite ajouté à la solution simulant les pores du béton.	Mesures gravimétriques Polarisation potentiodynamique SIE	Film protecteur passif et compact

(Sanaei et al, 2019)	Extrait de feuilles de chicorée (CLE) combiné à des ions de zinc (Zn)	L'extrait de CLE a été obtenu par le processus suivant : 40 g de poudre de CLE séchée, ajoutés à 800 ml d'eau déminéralisée et agitée pendant 4 h à 75 ° C, puis le mélange est passé d'un papier à mailles fines pour obtenir de l'extrait pur de CLE. Chauffage au reflux à 60°C pendant 24h, l'eau a été éliminée et finalement la poudre de CLE a été recueillie. L'efficacité de l'extraction était d'environ 15% de nitrate de zinc et de chlorure de sodium ont été utilisés pour la préparation de l'électrolyte...	Polarisation potentiodynamique Spéctroscopie d'impédance électrochimique SIE	Film épais et dense
(Dehghani et al, 2019)	Extrait aqueux de fleur de bourrache	L'extrait aqueux a été ajouté à la solution d'étude	Mesures gravimétriques PPD, SIE MEB	Formation d'un film résistant en surface
(Shweta et al, 2019)	Extraits d'écorces de prunusdulcis (amandes)	500g d'amandes ont été trempées dans de l'eau pendant une nuit. séchées dans une étuve à 313 K pendant 48 h. Les pelures séchées ont été réduites en poudre. La poudre a été trempé dans de l'eau et du méthanol. La solution d'extrait a été filtrée et le résidu a été recueilli et ajouté à la Solution du béton.	Polarisation Tafel PPD SIE MEB	Film épais compact composés de molécules d'extraits d'amandes

3.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a exposé les différentes méthodes d'évaluation de la corrosion, généralement appliquées, notamment lors de l'application des inhibiteurs de corrosion. Les méthodes gravimétriques qui se basent sur la mesure de la perte de masse, ainsi que les méthodes électrochimiques qui définissent les paramètres électriques entrant en réaction métal/électrolyte.

A travers ces méthodes, on peut procéder au calcul des efficacités inhibitrices du produit inhibiteur étudié.

On s'est intéressé en particulier aux modes d'intégration des inhibiteurs de corrosion aqueux dans le béton ou les milieux qui le simulent soit dans un cadre préventif ou réparateur.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

La corrosion des armatures dans le béton est un phénomène complexe qui suscite l'intérêt des chercheurs durant ces dernières décennies, vu le coût très élevée de réparation des ouvrages dégradés par ce phénomène.

Les inhibiteurs de corrosion constituent un moyen efficace, économique et disponible afin de remédier aux problèmes engendrés par la corrosion. Ces produits inhibiteurs se présentent en plusieurs formes : solide, liquide ou même pulvérisés.

On s'est intéressé dans le présent travail à l'étude des inhibiteurs de corrosion aqueux qui constituent un moyen de lutte récent contre la corrosion des métaux et des alliages. L'originalité de cette méthode provient du fait que le traitement anticorrosion peut se faire soit sur le métal lui-même comme mode de prétraitement ou par l'intermédiaire du milieu corrosif comme adjuvant en solution aqueuse.

Les nombreuses études consacrées, depuis plus d'une cinquantaine d'années, à ces composés, ont abouti à proposer des produits ou des mélanges de produits précis correspondant à des systèmes de corrosion (couples métal-milieu corrosif) donnés.

Chaque cas de corrosion reste cependant un cas particulier, et il est nécessaire de connaître les données de base de fonctionnement de ces inhibiteurs, leurs limites d'utilisation, leur toxicité particulière, pour pouvoir les utiliser avec une marge suffisante de sécurité.

Les molécules inhibitrices peuvent agir suivant différents mécanismes, leur conférant ainsi des performances d'inhibition en fonction du milieu d'étude. En particulier, pour la protection des armatures en béton armé, les inhibiteurs aqueux présentent des pouvoirs protecteurs satisfaisants et sont actuellement largement utilisés.

Comme perspectives d'étude, on propose d'utiliser ces inhibiteurs aqueux comme mode de réparation tout en étudiant l'état du béton actuel et son adhérence avec le béton injecté pour des structures réelles affectées par la corrosion..

Références Bibliographiques :

- Abdel-Gaber A.M., Elawady G.Y., S El-Housseiny. (2006). inhibitive action of some extracts on the corrosion of steel in acidic media. *International Journal of Electrochemical Science* 7(9):7823 2765-2779.
- Abdelli F., Abdelli H., (2020). "Méthodes d'évaluation de la corrosion". Mémoire de Master en Génie civil, Université de Tlemcen.
- Alain A., (2015). "corrosion sèche des métaux" . Rapport LCPC
- Alonso C., Andrade C., Argiz C., Malric B., (1996). Na₂PO₃F as inhibitor of corroding reinforcement in carbonated concrete, *Cement and Concrete Research*, 26(1996), 405-415.
- Amarni, L. (2012). "Durabilité des éléments en Béton Armé en milieu agressif Corrosion des Armatures", Mémoire de magister, Université de Tizi-Ouzou, Algerie. .
- Asipita S.A., MohammadIS., (2014). "Green Bambusa Arundinacea leaves extract as a sustainable corrosion". *Journal of Cleaner Production* Volume 67, 139-146
- Asmara Y.P., Kurniawan T., Geter A., Sutjipto E., Jamiluddin J., (2018). "Application of Plants Extracts as Green Corrosion Inhibitors for Steel in Concrete" - A review. *Indonesian journal of science and technology*, Vol 3, No 2
- Aurenti M., (2016). "Comment utiliser la lasure minérale?". Fiche technique
- Badaoui M. A., (2003). "La corrosion des aciers dans le béton armé". Mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène, Algerie.
- Bagneux M., (2002). "Béton de fibre à ultra-hautes performances", Recommandations provisoires. documentation scientifiques et techniques de l'association française de génie civil. 152p.
- Bahgat Radwan A. M., Ahmed Bahgat Mostafa H., Noor Yusuf, Aboubakr M. Abdullah (2019). "Enhancing the corrosion resistance of reinforcing steel under aggressive operational conditions using behentrimonium chloride". *Scientific Reports* 9(1) DOI: 10.1038/s41598-019-54669-y
- Balayssac, J.P., Détriché, Ch.H. and Grandet, J., (1997). "Effects of curing upon carbonation of concrete", *Construction and Building Materials* 9 (2) (1995) 91–95
- Benali O., Larabi L., Traisme M., Gengembre L., Harek Y., Electrochimical, theoretical and XPS studies of 2-mercapto-1- methylimidazole adsorption on carbon steel in 1M HClO₄, *Applied surface science*, Ed. Elsevier, 253 (2007), 6130-6139.
- Ben Harb M., Abubshait S., Etteyeb N., Kamoun M., (2020). "Olive leaf extract as a green corrosion inhibitor of reinforced concrete contaminated with seawater". *Arabian Journal of Chemistry*, 13 (3), 4846-4856

- Boukili A., (2015). "Contribution à l'étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier doux en milieu chlorhydrique molaire par un dérivé de la mercaptobenzimidazole", Mémoire de Master en Sciences et techniques, Université Mohammed Benabdellah Alger.
- Benmostefa A., Abdellaoui M., (2021). "Utilisation de la technique de phosphatation comme mode de protection des armatures dans le béton". Mémoire de Master, Université de Tlemcen.
- Bommersbach P., (2005). "Evolution des propriétés d'un film inhibiteur de corrosion sous l'influence de la température et des conditions hydrodynamiques: caractérisation par technique électrochimiques. Thèse de Doctorat, Université de Lyon, France.
- Bouteiller V., E. Marie-Victoire, S. Joiret, T. Chaussadent, Y. Tong, (2019). Electrochemical chloride extraction to repair combined carbonated and chloride contaminated reinforced concrete, *Electrochimica Acta*, 317 (2019) 486-493.
- Browning D., (1974). "Méthodes spectroscopiques d'analyse : Masson & CIE" Bibliothèque en ligne; Paris.
- Brixi N.K, Cherif R., Bezzar A., Sail L., Aït-Mokhtar A., (2021), "Effectiveness of henna leaves extract and its derivatives as green corrosion inhibitors of reinforcement steel exposed to chlorides (2021). *European Journal of Environmental and Civil Engineering* DOI: 10.1080/19648189.2021.1925159.
- Brunel D., (2020). Nano-antennes plasmoniques avec des diodes moléculaires rectifiantes pour la captation d'énergie et la photodétection. Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille, France
- Chakri S., (2015). "Compréhension des mécanismes d'inhibition de la corrosion des armatures métalliques des bétons par des molécules d'origine biologique". Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie curie, France
- Constantin F., (2011). "Etude de l'efficacité d'inhibiteurs de corrosion utilisés dans les liquides de refroidissement". Thèse de Doctorat, Université de Lyon, France
- Dean J.A., (1973). "Lange's Handbook of Chemistry", 8th Edition, McGraw-Hill, New York,.
- Dhouibi L., Triki E., Raharinaivo A., (2002). "The application of electrochemical impedance spectroscopy to determine the long-term effectiveness of corrosion inhibitors for steel in concrete". *Cement and Concrete Composites*, 24 (1) 35-43
- Dhouibi L., Triki E., Salta M., Rodrigues P., Raharinaivo A., (2003), "Studies on corrosion inhibition of steel reinforcement by phosphate and nitrite", *Materials and Structures/ Matériaux et Constructions*, 36 (2003), 530-540.
- Dillard J., (1996). Action des Monofluorophosphates sur la corrosion des armatures dans le béton. Synthèse d'études faites au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées avec le Laboratoire Régional de l'Est-Parisien et le LERM

- Elsener B., Buchler M., F. Stalder H., (1999). "Migrating Corrosion Inhibitor Blend for Reinforced Concrete: Part 2—Inhibitor as Repair Strategy. *Corrosion—Vol. 55, No. 12*, 1155-1163
- Etteyeb N., Sanchez M., Dhouibi L., Alonso MC., Takenouti H., Triki E., (2010). "Effectiveness of pretreatment method to hinder rebar corrosion in concrete". *Corrosion engineering, science and technology*. 45(6), 435-441
- Fiaud C., (1990). "Inhibiteur de corrosion", *Technique de l'ingénieur méthode de prévention et lutte contre la corrosion*. Article / Réf : COR1005 v1 .
- Fouda A.S, Abd EL Hady El-Masoud S., (2019). "Extrait végétal écologique de *Medicago sativa* (Alfalfa) comme inhibiteur de corrosion pour l'acier au carbone en milieu marin". *electrochemical science*, 6045-6064.
- Guiraud P., (2018). "Prévention des phénomènes de corrosion des armatures en acier dans le béton", *Documentation en ligne, Info-ciments*.
- Girèienė O., Ramanauskas R., Leontij L., (2005). "Efficiency of steel corrosion inhibitor calcium nitrite in alkaline solutions and concrete structures". *CHEMIJA*. T. 16. Nr. 3-4. P. 1–6
- Goyal A., Eshmaiel G., Homayoon S.P., Tyrer M., (2021). "Inhibitor efficiency of migratory corrosion inhibitors to reduce corrosion in reinforced concrete exposed to high chloride environment". *Construction and Building Materials* 303 (2021) 124461
- Hamer, Z. (1973). "The influence of oviducal fluid on the development of one-cell rabbit embryos in vitro". *J. Reprod. Fert.* 35, 415[^]-23.
- Han-Seung R., Dong-Geun J., Han-Seung L., (2017). "Corrosion protection of steel by applying a zn-sn metal spray system". *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 14 (6), 505-513
- Hassoune M., Bezzar A., Sail L., Ghomari F. (2017), "Corrosion inhibition of carbonsteel by N,N'Dimethylaminoethanol in simulated concrete pore solution contaminated with NaCl". *Journal of Adhesion Science and Technology*, 32 (1), 68-90
- HESSE M., (1997). "Méthodes spectroscopiques pour la chimie organique, Edition Masson ; Paris. 37.
- Holcim B., (2019). *Causes et préventions des altérations du béton : Corrosion des armatures*, Documentation en ligne, Belgique.
- Holloway L., Nairn K., Forsyth M., (2004), "Concentration monitoring and performance of a migratory corrosion inhibitor in steel-reinforced concrete", *Cement and Concrete Research*, 34 (2004), 1435 – 1440.
- Hwa Sung R., Chang Gil L., Tae Won K., Seungmin Lim, Hong Tae Kim, Sang Heon Shin, (2019). "Evaluation of Corrosion Resistance of Corrosion Inhibitors for Concrete Structures by Electrochemical Testing in Saturated Ca(OH)₂ Solutions with NaCl and

Na₂SO₄". *Advances in Materials Science and Engineering*,
Doi.org/10.1155/2019/8294360

Iso, 1986. (1986). *corrosion des métaux et alliages*.

Joceline J. (Setra), Taché G. (CEBTP), *Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion*, 2008, AFGC, Paris, p. 107

Jorcin J. B., (2007). *Spectroscopie d'impédance électrochimique locale : caractérisation de la delamination des peintures et de la corrosion des alliages Al-Cu*, Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, France.

Joshua Olusegun Okeniyi, Abimbola Patricia I.P, Loto C.A., (2017). "Corrosion-inhibition and compressive-strength performance of *Phyllanthus muellerianus* and triethanolamine on steel-reinforced concrete immersed in saline/marine simulating-environment". *Energy Procedia*, Volume 119, 972-979

Junichuro kubo, Y. T., Christopher L. Page, Mary M. Page, (2013). "Application of electrochemical organic corrosion inhibitor injection to a carbonate reinforced concrete railway viaduct". *Construction and Building Materials*, Volume 39, 2-8

Kashyap A., (2008). "Effects of water chemistry, temperature, gaseous cavitation & phosphate inhibitors on concrete corrosion". Thèse de Doctorat, Université Virginia USA.

Khaled K.F., (2009). "Simulations of corrosion inhibition of mild steel in 0.5m Sulphuric Acid by some Green corrosion inhibitors". *Journal of Solid State Electrochemistry* 13(11):1743-1756

Lan, M.-T. L.-J. (2005). "Reliability analysis for the existing reinforced concrete pile corrosion of bridge substructure", *Cement and Concrete Research*, Volume 35, Issue 3, 540-550. .

Landolt D., (1993). "Corrosion et chimie de surface des métaux" : Presses polytechniques et universitaires romandes, 1993, 553 p. ISBN 288074-245-5.

Larfaillio S. (2015). "Application de la spectroscopie d'impédance électrochimique à la caractérisation et au diagnostic de microbactéries tout dolides" Thèse de Doctorat, Université Paris Sud, France.

Lebrini M., (2005). "Synthèse et études physicochimiques de nouveau thiadiazoles inhibiteurs de corrosion de l'acier en milieu acide". Thèse de Doctorat, Université de Lille, France.

Marmi S., (2017). "Comportement à la corrosion des revêtements à base nickel et de chrome sur des substrats de cuivre". Thèse de Doctorat, Université de Biskra.

Matthieu C., (2008), "Technologie pour étendre la durée de vie des structures en béton", MCI® inhibiteurs de corrosion migrateurs, Cortec, 2008, USA.

- Millet J.P., Pech D., Steyer P., (2008). "Electrochemical behaviour enhancement of stainless steels by a SiO PACVD coating". *Corrosion Science*, 50 (5), 1492-1497
- Morris W., Vico A., Vazquez M., (2003), "The performance of a migrating corrosion inhibitor suitable for reinforced concrete", *Journal of Applied Electrochemistry*, 33 1183–1189.
- Nahali, H. (2014). "Effect of phosphate based inhibitor on the threshold chloride to initiate steel corrosion in saturated hydroxide solution". *construction and building materials*, 87-94.
- Nebbar M., (2010), "Etude de la tenue à la corrosion de l'acier N80 et évaluation de l'efficacité d'un inhibiteurs de corrosion" , *Memoire de magister, Université de Biskra,Algerie*.
- Okeniyi O., Loto C.A., Patricia IdowuPopoola, (2014). *Morinda lucida* effects on steel-reinforced concrete in 3.5% NaCl: Implications for corrosion-protection of wind-energy structures in saline/marine environments. *Energy Procedia*, Volume 50, 421-428
- Okeniyi O., Ikotun J.O., Titilayo A., Okeniy E.T., (2019). "Anticorrosion Behaviour of *Rhizophora mangle* L. Bark-Extract on Concrete Steel-Rebar in Saline/Marine Simulating-Environment". *scientific world journal*. Doi.org/10.1155/2019/6894714
- Oulabbas A., (2019). "Effet des inhibiteurs verts sur la corrosion des aciers ordinaires dans deux milieux acides". *Thèse de Doctorat Université d'Annaba*
- Oxand S.,(2002). "Solutions for durability", *fiche technique- corrosion des armatures carbonatation*.
- Perrin M., (2016). "Cours de microscopie électronique à balayage et microanalyse, ScanMAT - Synthèse, Caractérisation et Analyse de la Matière". *Université de Rennes 1, France. RENNES: Université de RenneS*.
- Popova A., Sokolova E., Raicheva S., Christov M., (2003). "AC and DC study of the temperature effect on mild steel corrosion in acid media in the presence of benzimidazole derivatives" *Corrosion Science* 45(1):33-58.
- Rakanta E., Zafeiropoulou Th., Batis G., (2013). "Corrosion protection of steel with DMEA-based organic inhibitor", *Construction and Building Materials*, 44 (2013) 507–513. .
- Rivetti M. L., Andrade Neto J.S., Nilson Santana de Amorim J., Vêras Ribeiro D., (2017). "Corrosion inhibitors for reinforced concrete. book: Corrosion Inhibitors, Principles and Recent Applications". *intechopen.72772*
- Saadoune S.,(2010). "Synthese et caracterisation d'inhibiteurs bi-fonctionnels :application à la corrosion des aciers de construction", *Memoire de Magister, Université de Setif, Algerie*.
- Sail L., (2013). " Etude de la performance d'inhibiteurs de corrosion à base de phosphate pour les constructions en béton armé. Thèse de Doctorat, Université Abou bekrbelkaid, Tlemcen, Algérie.

- Sail L., Ghomari F., Khelidj A., Bezzar A., (2014). "Properties evolution of phosphate film inhibitor as function of immersion time". *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. DOI: 10.1080/19648189.2014.909336
- Shalabi K., AbdelNazeer A., (2019). "Ethoxylates nonionic surfactants as promising environmentally safe". *Journal of Molecular Structure*, Volume 1195, 863-876
- Sanaei Z., Bahlakeh G., Bahram R., Ramezanzadeh G. B., (2019). Application of green molecules from Chicory aqueous extract for steel corrosion mitigation against chloride ions attack; the experimental examinations and electronic/atomic level computational studies. *Journal of Molecular Liquids* 290 (2019) 111176.
- Shanmugapriya S., Prabhakar P.P, Rajendran S., (2017). "Corrosion resistance property of mild steel in simulated concrete pore solution prepared in well water by using an aqueous extract of turmeric". *Material Proceeding*, 5 (2), 8789-8795
- Simescu F., (2009). "Corrosion behaviour in alkaline medium of zinc phosphate coated steel obtained by cathodic electrochemical treatment" Thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliqués Lyon, France.
- Soylev T.A, Richardson M.G, (2008). "Corrosion inhibitors for steel in concrete: State-of-the-art report", *Construction and Building Materials*, 22 (2008), 609–622
- Taché G., (2017). *LE Béton :la pollution par les chlorures Corrosion, Diagnostic, Réparation Etat de l’art*, Documentation en ligne, consulté le 26 Mai 2022
- Talipov L., Velichko E., (2018). "Effect of polycarboxylate and polyarylate". *MATEC Web of Conferences* 251(2):01026
- Teymouri F., Reza Allahkaram S., Shekarchi M., Johari M., (2021). "A comprehensive study on the inhibition behaviour of four carboxylate base corrosion inhibitors focusing on efficiency drop after the optimum concentration for carbon steel in the simulated concrete pore solution". *Construction and Building Materials* 296(12):123702, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123702
- Tuutti K., (1982). "Corrosion of steel in concrete, estimating residual service life of deteriorated reinforced concrete structure", CBI Research Report no.4.82, Swedish, Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden, 1982. .
- Vinod R.P., Binsi P.M., Kakkassery J.T.,(2018). "Efficacies of sodium nitrite and sodium citrate–zinc acetate mixture to inhibit steel rebar corrosion in simulated concrete interstitial solution contaminated with NaCl" . *International Journal of Industrial Chemistry*, <https://doi.org/10.1007/s40090-018-0142-7>
- Vololonirina O.M., (2011). "contribution a l'évaluation des capacités des glycérophosphates pour la maintenance dans le béton". Thèse de Doctorat Université de Toulouse, France

- Wilson M., ElíArmenta-Vázquez M., Ivan S., (2013). "Potential of polyphenols from an aqueous extract of apple peel as inhibitors of free radicals :An experimental and computational study". *Journal of Molecular Structure*, Volume 1035, 61-68
- Xu W., Wei Liang Jin H.L. Wang, J.H. Mao., (2016). "Organic corrosion inhibitor of triethylenetetramine into chloride contamination concrete by electro-injection method". *Construction and Building Materials* 115:602-617
- Yanqi Wang, Gang. K. (2020). "Corrosion inhibition of galvanized steel by MnO₄ ion as a soluble inhibitor in simulated fresh concrete environment". *Construction and Building Materials* 257 (2020) 119532
- Youcef bellal, F., Benghanem F., KeraghelS., (2018). "A New Inhibitor for Steel Rebar Corrosion in Concrete: Electrochemical and Theoretical Studies". *Journal of Molecular Structure* 1225 (2021) 129257