

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث 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 : Travaux publics

Spécialité : Voies et ouvrages d'art

Sujet

Étude expérimentale de l'efficacité inhibitrice de produits issus de plantes de la région de Tlemcen : cas des fleurs de lavande

Présenté par :

ADJDIR Zahia

&

LAHLALI Hadjer Walaa

Soutenu publiquement, le **10/06/2026**, devant le jury composé de :

M ^r BENYELLES Zoheir	Maître de Conférences A	Université de Tlemcen	Président
M ^{me} SAIL Latefa	Professeur	Université de Tlemcen	Examinatrice
M ^r BEZZAR Abdelillah	Professeur	Université de Tlemcen	Encadrant
M ^{me} BRIXI Nezha Khedoudja	Maître de Conférences B	Université de Tlemcen	Co-Encadrante

Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons tout particulièrement à remercier nos encadrants, Monsieur **BEZZAR Abdel Illah**, Professeur à l'Université Aboubekr Belkaïd de Tlemcen, et Madame **BRIXI Nezha Khedoudja**, Maître de conférences "B" à l'Université Aboubekr Belkaïd de Tlemcen, pour la confiance qu'ils nous ont accordée en acceptant de diriger ce travail. Nous leur sommes reconnaissantes pour leur disponibilité, leur patience, ainsi que pour la qualité de leurs conseils et orientations scientifiques. Leur accompagnement rigoureux, leurs remarques pertinentes et leur soutien constant ont été déterminants dans l'aboutissement de ce mémoire.

Nous exprimons notre profonde gratitude à Monsieur **BENYELLES Zoheir**, Maître de conférences "A" à l'Université Aboubekr Belkaïd de Tlemcen, qui nous fait l'honneur de présider ce jury, ainsi qu'à Madame **SAIL Latefa**, Professeur à l'Université Aboubekr Belkaïd de Tlemcen, qui nous fait l'honneur d'examiner ce travail. Nous leur sommes reconnaissantes pour le temps qu'ils consacrent à l'évaluation de ce travail, pour l'intérêt qu'ils portent à cette étude, ainsi que pour leurs remarques et critiques qui contribueront, certainement, à enrichir la qualité de notre mémoire.

Nous tenons aussi à remercier l'ensemble des enseignants qui ont assuré notre formation tout au long de notre parcours universitaire. Leurs enseignements, leur encadrement et leur dévouement ont constitué une base solide pour la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce travail,

À mes très chers parents, pour leur grand amour, leur soutien constant, leurs prières sincères et tous les sacrifices qu'ils ont faits pour mon bonheur et ma réussite. Vous êtes ma force, mes modèles et ma plus grande fierté.

À ma mère adorée, source de tendresse, de bonté et d'amour, qui m'a toujours encouragée et guidée.

À mon cher père, symbole de courage et de dignité, dont je porte le nom avec beaucoup de fierté et d'honneur.

À ma sœur unique, Sarah, ma complice et ma confidente, et à mes chers frères, Walid et Abdel Fatah pour leur amour, leur soutien précieux et tous les beaux souvenirs que nous partageons. Votre présence a rendu ce parcours plus facile et plus beau.

À toute ma famille, pour leur affection, leurs encouragements et leur présence à mes côtés tout au long de ce parcours.

À mes fidèles amis et à mes camarades de classe, avec qui j'ai partagé les moments difficiles et la joie du succès. Merci pour leur soutien, leur amitié et tous ces souvenirs inoubliables.

Adjdir Zahia.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail,

À mes très chers parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien constant et leurs sacrifices inestimables. Vous êtes ma force et ma plus grande source de motivation.

À ma chère grand-mère, pour sa tendresse, ses prières et sa sagesse qui m'ont toujours guidée.

À mes sœurs Meriem, Kawter, et à mon cher frère Ali, pour leur présence, leurs encouragements et les moments partagés qui ont illuminé mon parcours.

À mon petit frère Youcef, pour sa joie, son innocence et l'énergie positive qu'il apporte à ma vie.

À mes chères cousines, Samira, Naima, Manel et Fatima, pour leur affection, leur soutien et leur présence précieuse.

À mes chères tantes pour leur bienveillance et leurs encouragements.

À mes chères amies, chacune par son nom et sa valeur, pour leur amitié sincère, leur soutien et les souvenirs inoubliables que nous avons créés ensemble.

À mes collègues, avec qui j'ai partagé ce parcours académique, entre efforts, entraide et réussite.

Lahlali Hadjer walaa.

RÉSUMÉ

Ce travail étudie l'utilisation de la fleur de la lavande comme inhibiteur de corrosion vert de l'acier immergé dans un milieu simulant les pores du béton contenant 0,05 M en NaCl. Son efficacité a été évaluée par des méthodes électrochimiques, notamment le potentiel de circuit ouvert (PCO) et la résistance de polarisation (RP), à différents dosages et aux échéances 24 heures, 7 et 15 jours. Les propriétés du mortier ont été étudiées avec et sans ajout de l'inhibiteur : à l'état frais par l'essai d'affaissement, et à l'état durci par l'essai de résistance à la compression ainsi que la pesée hydrostatique, définis à 7, 28 et 90 jours. Les résultats montrent que 0,05 g/l de l'extrait fleurs de lavande réduit considérablement la corrosion dans le milieu d'étude tout en améliorant ses caractéristiques en ouvrabilité à l'état frais et en offrant des propriétés mécaniques atteignant 48,79 MPa à 90 jours.

Mots clés : Inhibiteur de corrosion vert, Lavande, Mortier, Chlorures, , Résistance à la polarisation linéaire, Résistance à la compression.

ملخص

تتناول هذه الدراسة استخدام زهرة الخزامى كمثبط صديق للبيئة للتآكل في بيئة تحاكي مسام الخرسانة تحتوي على 0,05 مولار من كلوريد الصوديوم. تم تقييم فعاليته بواسطة طرق كهروكيميائية، لا سيما جهد الدائرة المفتوحة ومقاومة الاستقطاب، بجرعات مختلفة وعلى فترات زمنية مختلفة تبلغ 24 ساعة، 7 و 15 يوماً بالنسبة للفلوآذ. تمت دراسة خصائص الملاط مع إضافة المثبط وبدونها: في الحالة الطازجة من خلال الترهل، وفي الحالة المتصلبة من خلال مقاومة الضغط والوزن الهيدروستاتيكي، بعد 7 و 28 و 90 يوماً. تُظهر النتائج أن 0,05 غ/لتر من مستخلص زهرة الخزامى يقلل بشكل كبير من التآكل في الوسط المدروس مع تحسين خصائص الملاط في الحالة الطازجة وتوفير خصائص ميكانيكية أفضل حتى 90 يوماً.

الكلمات المفتاحية: مانع التآكل الأخضر، الخزامى، الملاط، الكلوريدات، مقاومة الاستقطاب الخطي، مقاومة الضغط، قابلية.

ABSTRACT

This study investigates the use of lavender flower extract as a green corrosion inhibitor for steel immersed in a simulated concrete pore solution containing 0,05 M NaCl. Its effectiveness was evaluated using electrochemical methods, such as open circuit potential (OCP) and Resistance of polarization (RP), at different concentrations and for different exposure periods (24 hours, 7 days, and 15 days). The characteristics of the mortar were studied with and without the addition of the inhibitor: in the fresh state via the slump test, and in the hardened state through the compressive strength test and hydrostatic weighing, at 7, 28 and 90 days. The results show that 0,05 g/l of lavender flower extract significantly reduces corrosion in the test environment while improving workability in the fresh state and providing mechanical properties reaching 48,79 MPa at 90 days.

Keywords: Green corrosion inhibitor, Lavender, Mortar, Chlorides, Linear polarization resistance, Compressive strength.

SOMMAIRE:

LISTE DES TABLEAUX	xiii
La liste des abréviations :	xiv
Introduction générale :	1
Chapitre 1 : Généralités sur la corrosion	4
1.1 Introduction :	4
1.2 Classes d'exposition des ouvrages en béton armé :	4
1.3 Comportement du béton en fonction de l'environnement :	7
1.3.1 Béton sain (Environnement X0) :	7
1.3.2 Béton dans des milieux contenant les Chlorures (XS ou XD) :	8
1.3.3 Béton carbonaté XC :	9
1.4 Pathologies des Ponts :	10
1.5 Les causes de dégradation du béton armé :	15
1.6 Solutions contre la corrosion :	16
1.6.1 Les Techniques de Réparation physique ou chimique :	16
1.6.2 Techniques Electrochimiques :	17
1.7 Conclusion :	17
Chapitre 2 : Techniques de mesure de la corrosion des armatures du béton – Etude bibliographique	18
2.1 Introduction :	18
2.2 Les types d'inhibiteurs :	18
2.3 Inhibiteur de corrosion vert à base d'extrait de plante :	19
2.4 Préparation d'extrait de plante :	19
2.5 Méthodes d'extraction des inhibiteurs verts :	19
2.6 Essais électrochimiques :	23

2.6.1 Potentiel à circuit ouvert (PCO):	23
2.6.1.1 Étude effectuée par (PAN et al., 2020):	23
2.6.1.2 Étude effectuée par (LIU et al., 2023) :	24
2.6.1.3 Étude effectuée par (HAROUAT, 2024) :	25
2.6.1.4 Étude effectuée par (ZHANG et al., 2025):	26
2.6.2 Résistance à la polarisation linéaire (RPL) :	27
2.6.2.1 Étude effectuée par (HASSOUNE, 2018) :	28
2.6.2.2 Étude effectuée par (BRIXI, 2021) :	29
2.6.2.3 Étude effectuée par (FLORES-NICOLAS et al., 2021) :	30
2.6.2.4 Étude effectuée par (HAROUAT, 2024) :	31
2.7 Résistance à la compression :	32
2.7.1 Étude effectuée par (MASRI, 2019) :	32
2.7.2 Étude effectuée par (BRIXI, 2022) :	34
2.7.3 Étude effectuée par (HAROUAT, 2024) :	36
2.7.4 Étude effectuée par (BELARBI ,2024) :	37
2.8 Conclusion :	39
Chapitre 3 : Matériaux et méthodes	40
3.1 Introduction :	40
3.2. Matériaux Utilisés :	40
3.2.1 Acier :	40
3.2.2 Inhibiteur étudié :	40
3.2.3 Solution employée :	42
3 .2.4 Mortier :	42
3.2.4.1 Ciment :	42
3.2.4.2 Sable :	43

3.2.4.3 Eau de gâchage :	48
3.3.2 Potentiel à circuit ouvert (PCO):	52
3.3.3 La résistance à la polarisation linéaire (RPL) :	52
3.4.2 Caractérisation à l'état durci	53
3.4.2.1 Pesée hydrostatique :	53
3.4.2.2 L'essai de la résistance à la compression :	54
3.5 Conclusion :	55
Chapitre 4 : Résultats et interprétations.....	57
4.1 Introduction :	57
4.2 Propriétés électrochimiques des barres d'acier dans une solution simulant les pores du béton :	57
4.2.1 Potentiel de circuit ouvert :	57
4.2.2 Résistance à la polarisation linéaire :	59
4.3 Effet de l'inhibiteur sur les propriétés du mortier à l'état frais :	60
4.3.1 Affaissement des mortiers:	60
4.4 Effet de l'inhibiteur sur les propriétés du mortier à l'état durci :	62
4.4.1 Pesée hydrostatique :	62
4.4.2 Résistance à la compression :	63
4.5 Conclusion :	66
Conclusion générale :	67
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :	69

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Classe d'exposition des ouvrages en fonction de l'environnement (Batirama, 2009)	4
Figure 1.2 : (a) Pont du pirou classe d'exposition XC4/XD3/XF4,(b) pont de Rion-Antiron classe d'exposition XS1/XS2/XS3(BRAZILLIER et al., 2023)	7
Figure 1.3 : Schéma représentant la passivation des aciers dans le béton ("Chryso Canada," 2021)	7
Figure 1.4 : Schéma représentant la dépassivation et corrosion des aciers dans le béton par les chlorures (Holcim, 2015)	9
Figure 1.5 : Schéma représentant la dépassivation et corrosion des aciers dans le béton par carbonatation (Holcim , 2015)	10
Figure 1.6 : Poutre en béton armé : corrosion avancée des armatures en acier, réduction du diamètre et rupture des étriers, dans certaines zones, dues à la corrosion par les ions chlorure(Pepenar, 2015)	15
Figure 1.7 : Éclatement de beton du chevetre (BRAZILLIER et al., 2023)	16
Figure 2.1 : Modèle temporel potentiel du mortier (a : mortier mélangé avec 5 % de sodium, b : mortier mélangé avec NaCl et un inhibiteur de MCI-0)(Pan et al., 2020)	23
Figure 2.2 : Surveillance de l' PCO pendant les 3 jours de pré-passivation dans des solutions inhibitrices sans chlorure (Liu et al., 2023)	24
Figure 2.3 : Effet préventif de l'EPG sur l'acier immergé dans le mortier avec 0,5 M NaCl : (a) potentiel de corrosion (Harouat, 2024)	25
Figure 2.4 : Courbe de polarisation d'une électrode métallique pour évaluer la résistance de polarisation(Nasser, 2010)	27
Figure 2.5 : Évolution de la résistance de polarisation de l'armature dans les bétons testés, en fonction de la durée d'exposition aux chlorures (Hassoune, 2018)	29

Figure 2.6 : Effet préventif dans la solution simulant les pores du béton à 0,1 g/L d'acide ascorbique, avec et sans NaCl (Brix et al., 2021).	30
Figure 2. 7 : Les Valeurs de résistance de polarisation (R_p) au fil du temps (Flores-Nicolás et al., 2021).....	31
Figure 2.8 : Effet préventif de l'extrait de grenade sur l'acier immergé dans le mortier avec 0,5 M NaCl (b) densité du courant de corrosion (Harouat, 2024).	32
Figure 2.9 : Résultats de la résistance à la compression obtenus pour les différents dosages de l'Acide Ascorbique (Masri, 2019).	33
Figure 2.10 : Résultats de la résistance à la compression obtenus pour les différents dosages de l'(Acide Ascorbique +Propolis (Masri, 2019).	33
Figure 2.11 : Résultats de la résistance à la compression obtenus pour les différents dosages de l'extrait de feuilles de Henné (Masri, 2019).....	34
Figure 2.12 : La résistance à la compression des mortiers utilisés avec et sans EFH dans le mélange d'eau après 28 jours de durcissement (Brix, 2022).....	35
Figure 2.13 : Résistance à la compression des mortiers utilisés avec et sans acide ascorbique dans l'eau de gâchage après 28 jours de cure (Brix, 2022).....	36
Figure 2.14 : Résistance à la compression des mortiers utilisés avec et sans EPG (Harouat, 2024).....	37
Figure 2.15 : Résistance à la compression des échantillons de mortier avec et sans l'extrait de peau d'orange après 28 jours (Belarbi, 2024).....	38
Figure 2.16 : La résistance à la compression des échantillons de mortier avec et sans l'extrait de peau de grenade après 28 jours (Belarbi, 2024).	38
 Figure 3.1 : (a) Fleurs de lavande séchées, (b) Fleurs séchées de lavande immergées dans le solvant.	41
Figure 3.2 : Etapes de filtration de l'extrait en inhibiteur.	41

Figure 3.3 : Les étapes de préparation d'inhibiteurs utilisés, (a) Séchage par étuvage (b)Evaporation du solvant ,(c)Récupération de l'extrait sec.	42
Figure 3.4 : Masse volumique apparente de ciment utilisé.	43
Figure 3.5 : Masse volumique apparente de sable utilisé	44
Figure 3.6 : Essai de détermination de la Masse volumique absolue du sable.	44
Figure 3.7 : présentent les méthodes de mesure et les résultats d'essai d'équivalent de sable,(a) Mesure visuelle ,(b) Mesure par piston.....	45
Figure 3.8 : Courbe granulométrique.	47
Figure 3.9 : Etapes de fabrication de mortier ,(a) Préparation des matériaux ,(b) Malaxeur ,(c) Malaxage ,(d) Moulage ,(e) Conservation.	50
Figure 3.10 : (a) Electrodes de travail, (b) Polisseuse	51
Figure 3.11: (a) Dispositif expérimental ,(b) Cellule électrochimique à trois électrodes.	51
Figure 3.12 : Etapes d'essai d'affaissement.....	53
Figure 3.13 : Dimensions de mini-cône utilisé.....	53
Figure 3.14 : pesée hydrostatique.	54
Figure 3.15 : Etapes de L'essai de résistance à la compression.....	55
 Figure 4.1 : Résistance à la polarisation sur l'acier immergé dans SSPB avec 0,05 M NaCl avec et sans extrait de fleurs de lavande.	60
Figure 4.2 : Évolution de l'ouvrabilité en fonction de la concentration en inhibiteur.	61
Figure 4.3 : Effet de l'inhibiteur de corrosion à base de lavande sur la masse volumique.	63
Figure 4.4 : Résistance à la compression des mortiers utilisés avec et sans l'extrait de fleurs la lavande.	65

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Classe d'exposition en fonction de la norme NF EN 206+A2/CN.	6
Tableau 1.2 : Synthèse des Pathologies des Ponts	11
Tableau 2.1 : Classification et définitions des différents types d'inhibiteurs de corrosion.	18
Tableau 2.2 : Synthèse bibliographique des différents inhibiteurs de corrosion verts d'origine naturelle.	20
Tableau 2.3 : Résultats des mesures du potentiel en circuit ouvert (PCO) du fer dans un milieu carbonaté poreux en fonction de différentes concentrations de glutenin (Zhang et al., 2025).	26
Tableau 2.4 : Interprétation du courant de corrosion (Millard et al., 2001).	28
Tableau 3.1 : Composition Chimique de l'acier utilisé. (Sail et al., 2013)	40
Tableau 3.2 : Composition du milieu d'étude.	42
Tableau 3.3 : Résultat de l'analyse granulométrique du sable.	46
Tableau 3.4 : Caractéristiques physiques du sable.	47
Tableau 3.5 : Composition des différentes séries de mortiers.	48
Tableau 4.1 : Paramètres d'impédance de l'acier au carbone dans la SSPB contenant 0,05M en NaCl avec et sans Extrait de fleur de la lavande.	58
Tableau 4.2 : Résultats d'affaissement des mortiers avec et sans inhibiteur.	61
Tableau 4.3 : Résultats de la pesée hydrostatique.	62
Tableau 4.4 : Résultats de la résistance à la compression (Rc).	64

La liste des abréviations :

SSPB : Solution Simulant les Pores de Béton

M : Mol/L

PCO : Potentiel à Circuit Ouvert

RPL : Résistance de Polarisation Linéaire

EI : Efficacité inhibitrice

NaOH : Hydroxyde de sodium

KOH : Hydroxyde de potassium

Ca(OH)₂ : Hydroxyde de calcium

C₂S : Silicate bicalcique

C₃S : Silicate tricalcique

NaCl : Chlorure de sodium

E_{corr} : Potentiel de corrosion

R_p : Résistance à la polarisation

C-S-H : Silicate de calcium hydraté

pH : Potentiel hydrogène

M_{air} : Masse de l'échantillon à l'air

M_{eau} : Masse de l'échantillon dans l'eau

M_{sec} : Masse sèche de l'échantillon

m₁ : la masse du ballon + l'eau

m₂ : la masse du sable sec

m₃ : la masse du ballon + l'eau + sable

ESV : mesure visuelle

ESP : mesure par le piston

h_1 : hauteur totale (sable+ fines)

h_2 : hauteur du sable

h_2' : hauteur tassée au piston

E/C : Rapport massique eau sur ciment

ρ : masse volumique kg/m^3

m : la masse kg

V : le volume m^3

R_c : la contrainte de rupture à la compression (MPa)

$M_{\text{Réf}}$: Mortier de référence

F : la force appliquée donnée par l'appareil (KN)

S : la section d'échantillon (mm^2)

Introduction générale :

Les ponts sont des infrastructures clés pour le développement économique et social, garantissant la circulation des personnes et des marchandises. Fabriqués en béton armé, ces ouvrages assurent avant tout la sécurité et la durabilité. Toutefois, ils sont fortement exposés à des environnements agressifs (milieux marins, humidité, sels de déverglaçage), ce qui les rend vulnérables à la corrosion des armatures en acier.

La corrosion des armatures est une cause majeure de dégradation des ponts en béton armé. Elle engendre également des coûts économiques considérables à l'échelle mondiale, liés à la maintenance, à la réparation et au remplacement des infrastructures affectées. Cette pathologie représente 3-3,5% du PIB mondial, soit environ 2500 milliards USD par an, avec des économies potentielles de 15-35% par l'adoption de bonnes pratiques préventives (Lee et al., 2025). Aux États-Unis, les coûts directs annuels s'élèvent à 8,29 Md USD, incluant 3,8 M\$ pour le remplacement de ponts défectueux, 2 M\$ pour l'entretien des tabliers en béton, 2 M\$ pour les sous-structures et 0,5 M\$ pour la peinture des structures acier, les coûts indirects étant supérieurs à dix fois ce montant (NACE International, 2002). Au Royaume-Uni, une étude évaluée à environ 1 milliard £ (1,33 M\$), par an, les dépenses pour le parc de ponts en béton armé en Angleterre et au Pays de Galles (Dizaj et al., 2021). En France, le Cerema chiffre les réparations des ponts communaux à 3,3 Md€ (3,7 M\$) (dont 740 M€ urgents), (Cerema, 2024). En Chine, 10,89 milliards de yuans (1,52 M\$) pour la maintenance des routes et ponts (Hou et al., 2017). Au Japon, la préfecture d'Aomori réalise 186 Md yens (1,2 M\$) d'économies sur 50 ans pour 2 300 ponts via une gestion préventive plutôt que corrective (Préfecture d'Aomori, 2018). Principalement due à la corrosion des armatures dans le béton armé, cette dégradation a causé des catastrophes comme l'effondrement du pont Morandi à Gênes (2018) et du pont de Dresde (2024), soulignant l'urgence d'une surveillance renforcée (Mediachimie, 2022) (CEFRACOR/Mediachimie, 2022).

L'effondrement du pont Morandi à Gênes en 2018 a provoqué une catastrophe humaine majeure. L'accident a fait au moins 39 morts, ainsi que de nombreux blessés et disparus lors de la chute brutale d'une partie du pont. Cet événement a mis en évidence la gravité des défaillances structurelles des ponts et leurs conséquences directes sur la sécurité humaine. Il illustre l'effet de la corrosion des ponts sur la dégradation des structures et l'affaiblissement

progressif de leur résistance, pouvant conduire à des ruptures soudaines et à des pertes humaines importantes (LE PARISIEN, 2018).

Les inhibiteurs de corrosion protègent efficacement les métaux contre la dégradation. Les composés inorganiques sont de moins en moins utilisés en raison de leur toxicité, tandis que les inhibiteurs verts, issus de plantes, sont préférés pour leur biodégradabilité et leur faible coût. Ils agissent en formant une couche protectrice à la surface métallique, ce qui limite le processus de corrosion. Ils sont également efficaces dans différents milieux, qu'ils soient acides ou alcalins (Verma et al., 2017) .

Partant de ce principe, ce travail est consacré à l'utilisation de *Lavandula* (lavande) comme inhibiteur vert de corrosion, en raison de ses propriétés naturelles respectueuses de l'environnement, ainsi que de sa disponibilité et de son caractère économique.

Cependant, la lavande (*Lavandula*) est-elle efficace comme inhibiteur de corrosion dans un milieu alcalin simulant les pores de béton ? Est-ce que l'ajout d'extrait de lavande influence la résistance mécanique des mortiers à base de ciment ? L'incorporation de la lavande dans le mortier a-t-elle un impact sur l'ouvrabilité du mélange frais ?

Ce travail a pour objectif d'évaluer l'effet d'un extrait de fleurs de lavande (*Lavandula*) en tant qu'inhibiteur vert de corrosion. L'étude porte sur son efficacité dans un milieu alcalin simulant les pores de béton ainsi que dans un environnement exposé aux chlorures. En second lieu, l'influence de cet extrait sur les propriétés du mortier sera analysée, notamment la résistance mécanique et l'ouvrabilité (affaissement), afin de déterminer son impact sur les performances du matériau cimentaire.

Cette étude comporte une introduction générale précédant quatre chapitres :

Le premier chapitre traite des classes d'exposition des ponts, ainsi que de leurs pathologies et des principales causes de dégradation du béton armé. Ensuite, nous avons présenté les différentes solutions de protection contre la corrosion.

Le deuxième chapitre présente les différents types d'inhibiteurs de corrosion, ainsi que les principales méthodes d'extraction des inhibiteurs verts. Il aborde également les études réalisées par divers chercheurs ayant utilisé des techniques électrochimiques pour évaluer l'efficacité de ces inhibiteurs verts.

Le troisième chapitre présente les différentes méthodes expérimentales adoptées, ainsi que les matériaux et produits utilisés dans le cadre de notre étude.

Le quatrième chapitre présente les différents résultats obtenus à partir des essais électrochimiques, ainsi que les essais sur un mortier à l'état frais et durci.

Enfin, une conclusion générale est présentée, synthétisant l'ensemble du travail réalisé ainsi que les principaux résultats obtenus. Elle met également en évidence les apports de l'étude et propose des perspectives de recherche pour les futurs étudiants souhaitant approfondir ce thème.

Chapitre 1 : Généralités sur la corrosion

1.1 Introduction :

La plupart du temps, les structures en béton armé qui sont construites et qui se trouvent dans des environnements propices à des pathologies graves et à la corrosion, considérée comme un phénomène naturel dans les métaux et les alliages, causent des dommages aux infrastructures telles que les routes, les ponts, les voies ferrées, etc. Ces dommages représentent une menace continue pour la sécurité des utilisateurs. Cette menace peut entraîner des accidents potentiellement mortels et des reconstructions. Les dommages entraînent des coûts de reconstruction déraisonnables pour l'économie. Il est donc nécessaire de trouver un moyen d'arrêter ce phénomène.

1.2 Classes d'exposition des ouvrages en béton armé :

La figure (1.1) illustre les agressions que peuvent subir les différents éléments structurels d'un bâtiment comme les poteaux, les voiles, les fondations, les dalles, les planchers, les parkings, etc. vis-à-vis de l'environnement dans lequel se situe l'ouvrage. Ces classes sont de type XC si l'ouvrage est soumis à la corrosion par carbonatation, XF si les agressions subies sont dues à des cycles de gel/dégel, XD en cas de présence de sels de déverglaçage, XS en présence de sel marin et XA si les attaques proviennent des sols. Le tableau (1.1) résume ces classes d'exposition avec leurs degrés de sévérité en concordance avec la norme NF EN 206+A2/CN.

EXEMPLES INDICATIFS DE CHOIX DE CLASSE D'EXPOSITION							
	1 VOILES INTÉRIEURS	2 DALLES ET PLANCHERS INTÉRIEURS	3 VOILES EXTÉRIEURS	4 BALCONS	5 PARKING FERMÉ	6 FONDACTIONS MURS ENTERRÉS PIEUX	7 VOIE D'ACCÈS
XC	XC1	XC1	XC3 ou XC4	XC3 ou XC4	XC1 ou XC3	XC2	XC4
XF ⁽¹⁾	/	/	XF1 ou XF3	XF1 ou XF3	/	XF1	XF1 ou XF4
XD ⁽²⁾	/	/	/	/	XD1 ou XD3	/	XD1 ou XD3
XS ⁽³⁾	/	/	XS1 ou XS3	XS1 ou XS3	/	/	XS1 ou XS3
XA	/	/	À analyser au cas par cas en fonction de l'agressivité des eaux souterraines et des sols (=> étude chimique)				
(1) En fonction de la zone de gel - (2) Si sel de déverglaçage - (3) Si exposition à l'air marin							

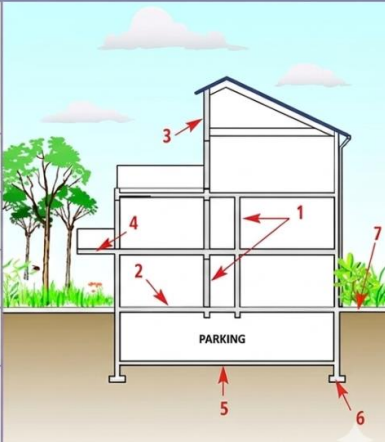


Figure 1.1 : Classe d'exposition des ouvrages en fonction de l'environnement (Batirama, 2009)

Si nous considérons le voile intérieur (1) (cf. figure 1.1), il est dans une classe d'exposition XC1, ce qui correspond dans le tableau 1 à : « Sec ou submergé en permanence (intérieurs de bâtiments) ». Le risque de carbonatation y est très faible. Par contre, le voile d'accès ou voile extérieur (3) ou (7) sur la même figure correspond à une alternance humidité/séchage (façades exposées à la pluie), offrant un risque élevé de carbonatation du béton et, par conséquent, de corrosion des armatures.

Les voiles extérieurs (3), le voile d'accès (7) et les balcons (4) sur la même figure sont aussi sujets à des classes d'exposition XS, allant de l'air véhiculant le sel marin (XS1) aux zones de marnage ou soumises à des projections/embruns (XS3). Ces environnements causent aussi la corrosion des armatures du béton armé.

Les parkings fermés (5) ou les voiles d'accès (7) sur la figure 1.1 montrent aussi qu'ils sont sujets aux classes XD1 à XD3, provenant de l'utilisation de sels de déverglaçage, eux aussi responsables de la corrosion des aciers noyés dans le béton. Les fondations, murs enterrés ou pieux (5) ou fondations (6) sont en contact direct avec les sols ou les eaux souterraines parfois agressives, causant des attaques chimiques telles que la lixiviation et l'attaque sulfatique externe (BRAZILLIER et al., 2023).

Tableau 1.1 : Classes d'exposition en fonction de la norme NF EN 206+A2/CN.

Nature du Risque	Code	Environnement et exemples types
-	X0	Aucun risque de corrosion, ni d'attaque (gel/dégel, abrasion, attaque chimique)
Corrosion par Carbonatation (Induite par l'air et l'humidité)	XC1	Sec ou submergé en permanence (intérieurs de bâtiments).
	XC2	Humide, rarement sec (fondations, réservoirs).
	XC3	Humidité modérée (extérieur abrité, halls ouverts).
	XC4	Alternance humidité/séchage (façades exposées à la pluie).
Corrosion par Chlorures Marins (Eau de mer)	XS1	Air véhiculant du sel marin (bâtiments proches du littoral).
	XS2	Immersion permanente en eau de mer.
	XS3	Zones de marnage ou soumises à des projections/embruns.
Corrosion par Chlorures (Hors milieu marin)	XD1	Humidité modérée (brouillards de sels de déverglaçage).
	XD2	Humide, rarement sec (piscines industrielles).
	XD3	Alternance humidité/séchage (tabliers de ponts, parkings).
Attaques Chimiques (Sols et eaux)	XA1	Agressivité chimique faible (sols et eaux souterraines).
	XA2	Agressivité chimique modérée (nécessite ciment PM-ES).
	XA3	Agressivité chimique forte (milieux industriels sévères).
Gel / Dégel	XF1-4	Résistance aux cycles de gel, avec ou sans sels de déverglaçage.



Figure 1.2 : (a) Pont du Pirou classe d'exposition XC4/XD3/XF4, (b) pont de Rion-Antirion classe d'exposition XS1/XS2/XS3 (BRAZILLIER et al., 2023)

1.3 Comportement du béton en fonction de l'environnement :

1.3.1 Béton sain (Environnement X0) :

Dans un béton sain, les armatures en acier sont protégées par une couche de passivation. Cette dernière est le résultat de la forte alcalinité de la solution interstitielle du béton, dont le pH se situe aux alentours de 13. Cette forte basicité est principalement due à la libération d'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ lors de l'hydratation du ciment. La figure 1.2 montre cette couche qui contient à la fois des oxydes ferriques et ferreux. Cette couche reste intacte tant que le milieu environnant maintient son alcalinité ; l'armature est ainsi isolée des agents corrosifs et ne subit aucune dégradation, garantissant la durabilité de la structure. (Barnes, 2006) .

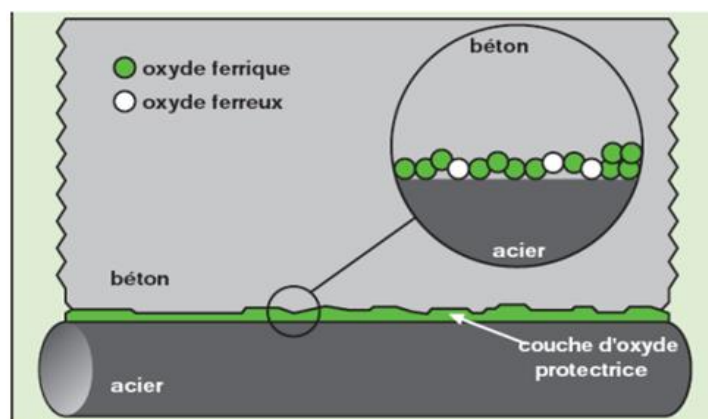


Figure 1.3 : Schéma représentant la passivation des aciers dans le béton ("Chryso Canada," 2021)

1.3.2 Béton dans des milieux contenant les Chlorures (XS ou XD) :

Les chlorures peuvent provenir de plusieurs sources. Durant la fabrication ils peuvent être incorporés ou ils peuvent diffuser depuis l'extérieur après durcissement et ils sont selon (Barnes, 2006) comme suit :

Lors de la fabrication (chlorures incorporés) :

- **Adjuvants** : utilisation d'accélérateurs de prise au chlorure de calcium (utilisé jusqu'au 1975)
- **Eau de gâchage** : emploi d'eau de mer lors du mélange initial.
- **Granulats** : utilisation de sables ou gravillons naturellement contaminés par le sel.

Après le durcissement (chlorures externes) :

- **Environnement marin** : exposition directe à l'eau de mer ou aux embruns salins.
- **Entretien routier** : application de sels de déverglaçage sur les structures.
- **Stockage industriel** : contact avec des produits chimiques (saumures, réservoirs de sel, aquariums).

Les chlorures externes diffusant à travers le béton après son durcissement, restent un problème majeur dans la plupart des régions du monde, que ce soit à cause des embruns salins marins ou de l'utilisation de sels de déverglaçage. Cependant, les chlorures incorporés lors du coulage ne doivent pas être négligés.

La corrosion de l'armature dans le béton démarre dès qu'une concentration critique de chlorures, par exemple provenant de l'eau de mer ou de sels de déverglaçage, pénètre la solution interstitielle des pores (cf. figure 1.4). En traversant localement la couche protectrice, ces chlorures entraînent une dépassivation locale de la surface de l'acier. Le processus de corrosion débute alors si trois conditions sont réunies simultanément : la destruction effective de cette couche passive, une humidité suffisante pour assurer la conductivité électrique du béton, et une disponibilité adéquate en oxygène. (Barnes, 2006)

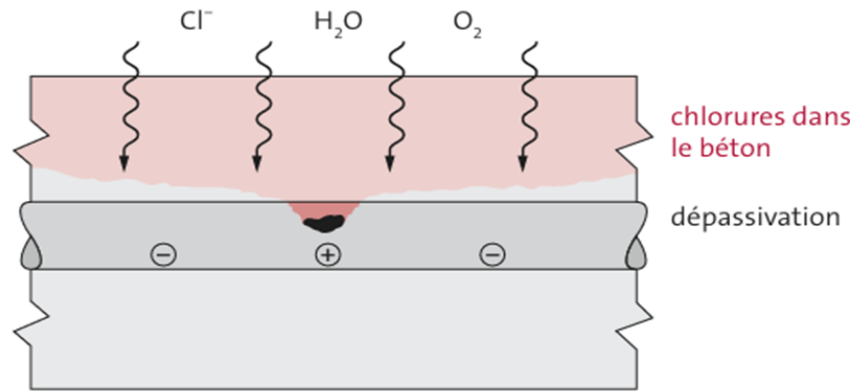


Figure 1.4 : Schéma représentant la dépassivation et corrosion des aciers dans le béton par les chlorures (Holcim, 2015)

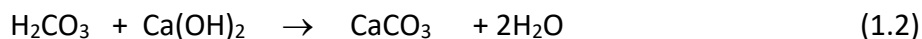
1.3.3 Béton carbonaté XC :

La carbonatation est le résultat de l'interaction du dioxyde de carbone gazeux de l'atmosphère avec les hydroxydes alcalins présents dans le béton. Comme beaucoup d'autres gaz, le dioxyde de carbone se dissout dans l'eau pour former un acide. Contrairement à la plupart des autres acides, l'acide carbonique n'attaque pas la pâte de ciment ; il se contente de neutraliser les alcalis de l'eau interstitielle (eau des pores), formant principalement du carbonate de calcium qui tapisse les pores (Barnes, 2006).

L'équation chimique suivante illustre le phénomène de carbonatation, ce processus induit la consommation du Ca(OH)_2 ce qui fait baisser le pH de la solution interstitielle conduisant ainsi



(Gaz) + (Eau) (Acide carbonique)



(Acide carbonique) + (Solution des pores) → (Carbonate de calcium) + (Eau)

« La transformation de l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 en CaCO_3 produit un béton carbonaté. Ce phénomène abaisse le pH de la solution interstitielle des pores sous la valeur de 10 ($\text{pH} < 10$), ce qui conduit à une corrosion généralisée (cf. figure 1.4).

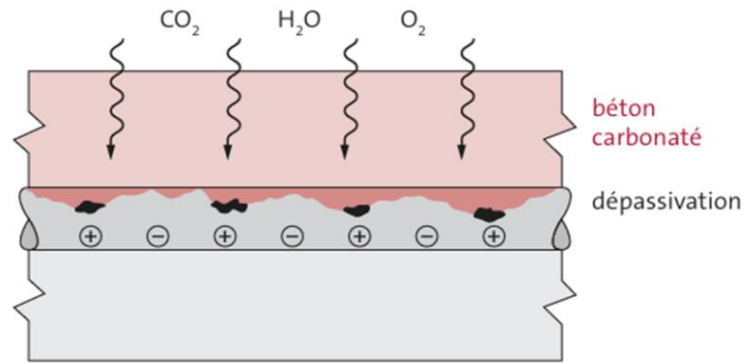


Figure 1.5 : Schéma représentant la dépassivation et corrosion des aciers dans le béton par carbonatation (Holcim , 2015).

1.4 Pathologies des Ponts :

La détermination de la classe d'exposition constitue une étape fondamentale en Génie civil pour caractériser les conditions environnementales de l'ouvrage et leur impact sur la durabilité du béton. Ce tableau vise à classer les différents environnements auxquels peuvent être confrontés les ponts et les ouvrages d'art, allant de l'humidité et de la carbonatation (XC) à l'action des sels marins (XS) et aux cycles de gel-dégel (XF) (voir tableau 1.1).

L'ensemble des études des ponts concernés en béton armé construits entre 1912 et 2014, exposés à divers environnements (marin, fluvial, routier, humide et gel-dégel) ont montré des pathologies : corrosion des armatures, causée soit par carbonatation et/ou pénétration des chlorures (voir tableau 1.1).

Les environnements marins, en particulier les zones de marnage (XS3), sont les plus agressifs en raison de fortes teneurs en chlorures et de conditions favorisant la corrosion. Les environnements routiers avec sels de déverglaçage présentent également un risque élevé à long terme, tandis que les milieux fluviaux sont globalement moins agressifs, sauf en cas de carbonatation avancée. L'enrobage du béton joue un rôle essentiel : un enrobage faible (< 45 mm) accélère l'atteinte des armatures. Même avec 45 à 50 mm, la corrosion peut apparaître si les conditions favorisant la carbonatation et la pénétration des chlorures sont réunies. Enfin, l'âge des ouvrages influence leur état : les ouvrages récents peuvent déjà être touchés en milieu agressif, ceux de 20 à 50 ans montrent une dégradation progressive, tandis que les plus anciens (> 50 ans) présentent soit une stabilité relative, soit une corrosion localisée avancée.

Tableau 1.2 : Synthèse des Pathologies des Ponts .

Debut de construction et mise en service	Nom et situation de Pont	Environnement d'exposition	Pathologies
Ouvrages ayant moins de vingt (20) ans (BRAZILLIER et al., 2023)			
1995-1998	Vasco de Gama Portugal	Marin agressif (XS2, XS3) Concentration des chlorures <u>superieure à</u> 0,4 % sur une profondeur de <u>20 à 25 mm</u> après <u>18 ans</u> de service de l'ouvrage. sachant <u>que l'enrobage</u> est de 45 mm (caissons),<u>70 mm (colonnes)</u>	Corrosion par attaque des chlorures
2014	Pont de Loudéac France	Humidité (XC4) et Gel (XF1) Enrobage :45 mm Carbonatation : 0 mm	Risque de corrosion par carbonatation est très élevé à long terme.

		Compte tenu de l'environnement (XC4), le risque de corrosion dû à la carbonatation était nul en 2016.	
(1999-2004)	Rion -Antirion La Grèce	Marin agressif (XS1, XS2, XS3) investigation sur le pylône M₂ en béton armé ayant un enrobage de 50 mm ayant montré : → La partie immergée de classe XS2 présente une teneur en chlorures libres de 0,11 % du poids ce ciment après 9 ans de service. à entre 40 à 50 mm de profondeur. → La zone de marnage de classe XS3 présente une teneur en chlorures libres de 0,06 % du poids ce ciment après 4 ans de service. à entre 30 à 50 mm de profondeur.	Risque de corrosion par chlorure à long terme.
1998	Pont Volesvres France	Fondations :(XC2,XA1) Appuis:(XC4,XF1) Hourdis:(XC4,XF1) Longrines : (XC4 , XF4 , XD1)	Risque de corrosion faible à modéré à long terme
Ouvrages entre 20 et 50 ans (BRAZILLIER et al., 2023)			
(1984-1985)	La Vachette Briançon, France	(XD3 ,XF4) – enrobage : 36 à 62 mm (culées) (XD3 ,XF4) – enrobage : 40 à 46 mm (corniches)	Risque de corrosion par carbonatation Éclatement du béton du chevêtre

1988	Saint-Poncy Cantal, France	(XF4,XD3) enrobage < 45 mm Carbonatation : 60 à 80 % de l'enrobage Chlorures : 2 % > seuil critique (0,4 %)	Risque de corrosion très élevé
1991	Pont du pirou France (prés de la côte)	Environnement routier (XF4, XD3 ,XC4) Concentration des chlorures <u>inférieure à 0,4 %</u> sur une profondeur de <u>25 à 30mm</u> après <u>23 ans</u> de service de l'ouvrage et profondeur de carbonatation au <u>maximum 15 %</u> de l'épaisseur d'enrobage sur les zones investiguées. sachant <u>que l'enrobage</u> est de <u>45mm</u>	Risque de corrosion par chlorure et par carbonatation à long terme.
Ouvrages plus de 50 ans (BRAZILLIER et al., 2023)			
1964	Pont Blondel France	L'ouvrage se situant à 2 km de la mer (XC4,XD1),la profondeur de carbonatation 30 a 45 mm sur les zones investiguées et le concentration de chlorures nulle. sachant <u>que l'enrobage</u> est de 50mm	Risque de corrosion par carbonatation.

1952-1954	Pont X	milieu marin(XC4,XS3) investigation sur des zones en béton armé ayant un enrobage de 50 mm ayant montré : → La zone marnage (Z_2) : La profondeur moyenne du front de chlorures est de l'ordre de 60 mm à la naissance de l'arc dans la zone → La zone immergée (Z_3) : la pénétration des chlorures est généralement stable par rapport aux zones exposées. (profondeur de carbonatation	Risque corrosion par carbonatation est très élevé à long terme et corrosion par les chlorures
1912	Pont Boutiron France	environnement fluvial (XC4,XD1) le profodeur de carbonatation 1mm (faible) sur les zones investiguées. sachants que l'enrobage est plus de 45 mm	Risque de corrosion par carbonatation (faible carbonatation) à long terme.
1947	Pont sur la Bruche France –Alsace	environnement fluvial (XC4, XD3 ,XF1) profondeur de carbonatation superieure ou égale à 30 mm Exposition aux sels de déverglaçage. Les teneurs en chlorures évaluées jusqu'à la première couche d'armatures sont faibles sachant que l'enrobage est de 40mm	Corrosion par carbonatation et Risque de corrosion par les chlorures à long terme.

1.5 Les causes de dégradation du béton armé :

La dégradation, la ruine des ouvrages en béton armé ou précontraint exposés à des environnements (marin, fluvial, routier, humide, et gel-dégel) est souvent le résultat de la corrosion des armatures soit par carbonatation et/ou pénétration des ions chlorures.

C'est le phénomène de la ruine des bétons armés dû à la corrosion des armatures par carbonatation ou par les ions chlorures, s'accompagnant donc d'une formation de produits de corrosion avec un volume supérieur de plusieurs fois celui de l'acier initial. Cette expansion produit des tensions internes énormes, qui dépassent la résistance à la traction du béton, ce qui provoque la fissuration de l'enrobage puis son flambage et son désagrégation (Eclatement). Cette condition est exacerbée par d'autres facteurs tels que le gel/dégel qui cause la détérioration de la matrice de ciment et engendre des fissures mécaniques, qui permettent à des agents agressifs de pénétrer jusque dans le centre de la matrice.



Figure 1.6 : Poutre en béton armé : corrosion avancée des armatures en acier, réduction du diamètre et rupture des étriers, dans certaines zones, dues à la corrosion par les ions chlorure(Pepenar, 2015)



Figure 1.7 : Éclatement de béton du chevetre (BRAZILLIER et al., 2023).

1.6 Solutions contre la corrosion :

1.6.1 Les Techniques de Réparation physique ou chimique :

a) Réparations par "Patch" (Mortiers) :

C'est la méthode la plus courante. Elle consiste à enlever le béton contaminé, à nettoyer l'acier et à appliquer un mortier de réparation. Repassivation de l'acier d'armature en enrobant l'acier d'armature avec un mortier ou un béton de réparation à base de ciment, la valeur du pH est à nouveau relevée de façon à obtenir une nouvelle couche passive à la surface de l'acier. (Holcim, 2015)

b) Revêtements et Scellements :

Ces techniques agissent comme une barrière physique. Les revêtements (peintures époxy, acryliques) ou les imprégnations hydrophobes (silanes/siloxanes) empêchent l'eau, l'oxygène et les chlorures de pénétrer davantage dans le béton. Ils sont souvent utilisés en finition après une réparation pour prolonger la durée de vie du traitement (Barnes, 2006).

c) Inhibiteurs de Corrosion :

Ce sont des substances chimiques ajoutées au mortier de réparation ou appliquées en surface pour qu'elles migrent vers l'acier. Ils agissent en formant un film protecteur moléculaire sur la surface du métal, ralentissant les réactions chimiques de corrosion même en présence de chlorures ou d'un pH réduit. (Holcim, 2015)

1.6.2 Techniques Electrochimiques :**a) Protection Cathodique (PC) :**

C'est la méthode la plus efficace pour les structures fortement contaminées. En connectant l'acier à une anode externe et en imposant un faible courant continu, on force l'acier à devenir une "cathode" (zone protégée). Cela arrête le processus électrochimique de la corrosion. C'est le seul système capable de stopper indéfiniment la corrosion dans un béton saturé de sel (Barnes, 2006).

b) Extraction Electrochimique des Chlorures (ECE) :

Il s'agit d'un traitement temporaire intensif (souvent de 4 à 8 semaines). On applique un courant électrique important entre l'acier et une maille métallique externe temporaire. Ce courant force les ions chlorures (chargés négativement) à migrer hors du béton vers l'anode externe. Une fois le niveau de chlorure redescendu sous le seuil critique, le système est retiré (Barnes, 2006).

c) Réalcalinisation Electrochimique :

Spécifiquement utilisée pour les bétons dégradés par la carbonatation (baisse du pH). Comme l'extraction des chlorures, c'est un traitement de quelques jours qui utilise le courant électrique pour faire pénétrer une solution alcaline dans le béton et restaurer le pH élevé (environ 12-13). Cela permet à la couche de passivation naturelle de l'acier de se reformer (Barnes, 2006).

1.7 Conclusion :

Les ponts en béton armé étudiés, construits entre 1912 et 2014, présentent principalement des problèmes de corrosion des armatures dus à la carbonatation et/ou à la pénétrations des chlorures, surtout en milieux marins et routiers agressifs. L'enrobage du béton est déterminant plus il est faible, plus les armatures sont rapidement atteintes, même si l'épaisseur suffisante ne garantit pas toujours une protection permanente. L'âge des ouvrages est aussi un paramètre primordial à prendre en compte lors des investigations menées en milieux agressifs. Au cours de ce chapitre, nous avons mis en évidence les dangers liés aux phénomènes de corrosions. Le chapitre suivant sera donc consacré à une des solutions contre ce phénomène à savoir l'inhibition de corrosion.

Chapitre 2 : Techniques de mesure de la corrosion des armatures du béton – Etude bibliographique

2.1 Introduction :

Nous avons abordé dans le chapitre précédent, les concepts de corrosion de l'acier des bétons aux environnements agressifs, ainsi que les moyens de protection contre cette pathologie. Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur les études précédemment menées par d'autres chercheurs sur les facteurs affectant le comportement mécanique et électrochimique du béton traité avec des inhibiteurs de corrosion et particulièrement ceux issus de l'extraction de différentes parties de plantes, communément appelés inhibiteurs verts.

2.2 Les types d'inhibiteurs :

Les inhibiteurs de corrosion peuvent être classés en trois groupes distincts, comme illustré dans le tableau 2.1 ci-dessous :

Tableau 2.1 : Classification et définitions des différents types d'inhibiteurs de corrosion.

Type d'inhibiteur	Définition
Inhibiteurs Organiques	Ce sont des composés chimiques contenant des atomes de carbone et des hétéroatomes (N, O, S). Ils agissent par adsorption à la surface du métal pour former un film protecteur hydrophobe.
Inhibiteurs Verts (Écologiques)	Ce sont des substances extraites de sources naturelles (plantes, biopolymères) qui sont respectueuses de l'environnement et non toxiques. Ils contiennent des molécules bioactives qui protègent le métal.
Inhibiteurs Minéraux (Inorganiques)	Ce sont des sels inorganiques (tels que les nitrites ou les phosphates) qui agissent en favorisant la formation d'une couche de passivation ou de précipités insolubles sur les sites actifs du métal.

Dans le cadre de notre étude, nous porterons une attention particulière aux inhibiteurs verts, en raison de leur efficacité et de leur caractère écologique.

2.3 Inhibiteur de corrosion vert à base d'extrait de plante :

Les inhibiteurs de corrosion verts à base de plantes ont fait l'objet d'un intérêt croissant pour protéger les métaux contre la corrosion, ces plantes transformant sous l'effet de la lumière du soleil des produits utiles en ayant recours à la photosynthèse et constituent une source de produits naturels tels que les fruits et les légumes, le bois, les huiles, les résines et les colorants dont la sphère de vie quotidienne utilise. A l'heure actuelle, les chercheurs s'intéressent tout particulièrement aux extraits de plantes en tant qu'inhibiteurs de corrosion pour leur efficacité au même titre que leur respect de l'environnement.

2.4 Préparation d'extrait de plante :

La préparation d'extraits de plantes consiste à extraire des substances actives contenues dans différentes parties de la plante que sont les feuilles, racines, fleurs ou graines. Pour ce faire, il est d'abord nécessaire d'effectuer la récolte et le nettoyage des plantes pour enlever les impuretés, puis un séchage pour éliminer, l'humidité, puis un broyage pour obtenir une poudre. En effet, cette poudre est ensuite soumise à un solvant : l'eau par exemple ou l'éthanol, afin d'extraire les composés actifs. Après cela, il est nécessaire de filtrer le mélange afin de pouvoir séparer la phase liquide des résidus solides.

2.5 Méthodes d'extraction des inhibiteurs verts :

L'obtention des inhibiteurs verts nécessite une extraction à partir de feuilles, écorces, fruits ou racines de plantes, plusieurs solvants peuvent être utilisés pour obtenir les produits photochimiques que contenaient les différentes plantes, Le Tableau 2.2 résume les travaux trouvés dans la littérature ayant utilisés ce type d'inhibiteur tout en spécifiant le milieu d'étude et l'efficacité inhibitrice obtenue.

Tableau 2.2 : Synthèse bibliographique des différents inhibiteurs de corrosion verts d'origine naturelle.

Référence	Plantes (inhibiteurs)	Solvant	Produit phytochimiques	Milieu Etude	Efficacité inhibitrice
(Zhang et al., 2025)	Glutenin	Eau déionisée Et éthanol	Glutenin Les amines (NH ₂) Carboxyles(COOH) Cycles benzéniques	C-SCPS	94.25%
(Harouat et al., 2024)	La peau grenade	Eau distillée Acétone	Acide gallique et la quercitrine et la kaempferol	Milieu alcalin	97,39%
(Naderi et al., 2024)	Le réglisse (racine de Réglisse)	Eau distillée et éthanol	Saponines triterpenoides Des flavonoïdes La quiritine et l'isoliquiritine	Solution alcaline Ph=12,6	(80_90)%
(Liu et al., 2023)	Extraits de poussière fibre de noix de coco	Eau déionisée éthanol	Cellulose Hémicellulose lignine Cires (wax) Saponines Flavonoïdes Polyphénols/tannins	Agressif très alcalin SSPB Ca(OH ₂) NaOH KOH	98,1%

(Song et al., 2023)	Extrait du son riz	éthanol 95%	Phénols, Flavonoïdes, acides phénoliques, tocotriénols, oryzanols ,caroténoïdes	SPCS Ca(OH ₂)	98%
(Wang et al., 2022)	Extrait des feuilles de fatsia japonica (FJLE)	Eau déionisée chaude (c°90)	α-D-Mannose, d-ribose L-Rhamnose monohydrate, d-Glucuronic acide Trigalacturonic acide, aldéhyde-D-glucose, d-Galactose dérivative, aldéhyde-D-xylose L-Arabinose, L-Fucopyranose	Ca(OH ₂) NaOH KOH NaCl	91,2% à 7 jours 89,6% à 1000mg/L
(Naderi et al., 2022)	Extrait de urtica dioica (ortie)	Eau distillée Chauffée a 70°C	Saponines Flavonoïdes Phytostérols Tannins Acides organiques Amino-acides Histamine Sérotonine	Sspb 0,3M KOH 0,1M NaCl Ca(OH ₂)	77%
(Brix, 2022)	Feuilles De henné	100% Ethanol	Lawson Acide gallique	SSPB Milieu	93,06%

			Les tannins	Agressif	
((Brix et al., 2021))	Acide ascorbique Et vitamine C	-	Acide ascorbique (C ₆ H ₈ O ₆)	Milieu marin agressif	88,98%
(Pan et al., 2020)	Inhibiteur de corrosion commercial à base d'amino-alcools (MCI O)	Eau et solution De NaCl	Amine /ester Particules de nano (sio ₂)	Environnement marin réel agent agressif	Elevé
(Pradipta et al., 2019)	Thé vert	Eau chaude ultra pur éthanol	Polyphénols catéchines EGCG ECG EC EGC	Milieu alcalin Ph=12 NaCl 3,5%	75%

Les inhibiteurs de corrosion naturels offrent une protection très efficace aux armatures en acier dans des environnements alcalins et marins chlorurés, avec une efficacité qui varie entre 75 et 98 %. Les extraits qui contiennent beaucoup de polyphénols, comme la peau de grenade, le son de riz et le henné, sont particulièrement efficaces, avec une efficacité supérieure à 95 pour cent. Cela est dû au fait qu'ils forment un film protecteur stable qui améliore la couche passive et limite l'attaque des chlorures.

2.6 Essais électrochimiques :

Les techniques électrochimiques sont plus complètes car elles étudient les fondements mêmes du phénomène de corrosion et des réactions électrochimiques. L'aspect quantitatif de ces méthodes (courbes de polarisation, potentiel de circuit ouvert etc.) permet de déterminer les vitesses de réaction et tous les paramètres décrivant l'état du système électrochimique. Ces mesures ne nécessitent aucun degré de corrosion ; elles peuvent donc être utilisées pour déterminer la vitesse de corrosion et l'efficacité des inhibiteurs de corrosion, ainsi que l'amorçage de la corrosion des armatures en acier dans les structures en béton.

2.6.1 Potentiel à circuit ouvert (PCO):

Le potentiel à circuit ouvert ou PCO, est très important dans la science de la corrosion et la recherche électrochimique. On mesure ce paramètre en notant la différence de potentiel entre l'électrode de travail et l'électrode de référence. Cela nous dit à quel point la barre d'armature est susceptible de se corroder. Si le potentiel est très négatif, le métal a plus de chances de se corroder.

2.6.1.1 Étude effectuée par (PAN et al., 2020):

La figure (2.1) illustre les résultats des mesures électrochimiques effectuées sur des barres d'armature à l'intérieur d'un mortier de ciment exposé à un milieu contenant du chlorure de sodium. Inhibiteur utilisé dans cette étude sont Inhibiteur de corrosion commercial à base amino alcools.

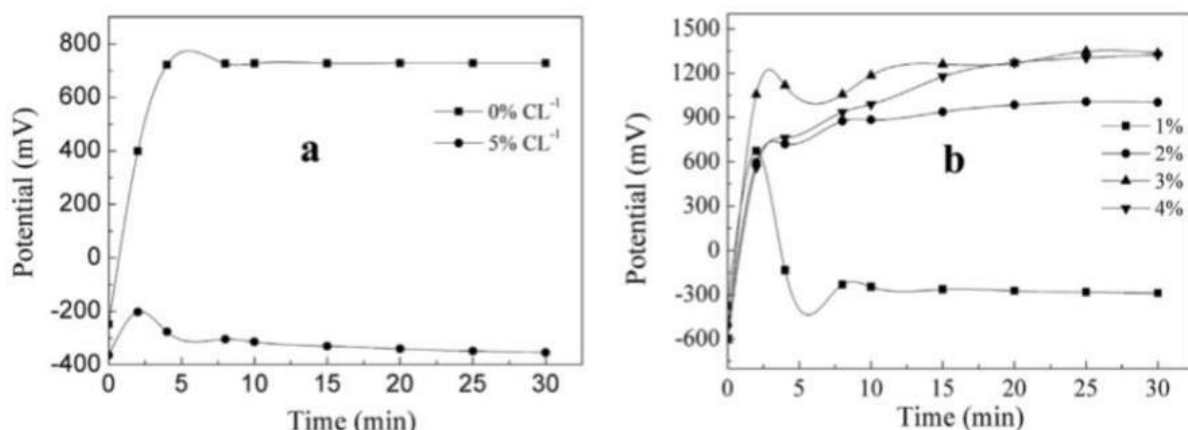


Figure 2.1 : Modèle temporel potentiel du mortier (a : mortier mélangé avec 5 % de sodium, b : mortier mélangé avec NaCl et un inhibiteur de MCI-0)(Pan et al., 2020).

Il ressort que le potentiel de polarisation de l'échantillon témoin est d'abord dégradé puis fluctue (figure a), ce qui traduit le bris de la couche protectrice et le commencement d'une corrosion active menée par les ions chlorures. Par contraste, les échantillons avec l'agent inhibiteur MCI-0 manifestent une grande supériorité (figure b) : l'accroissement de la concentration confère une plus grande stabilité du potentiel qui est presque parfaite à partir de la concentration de 2 %. Ceci confirme l'efficacité de l'inhibiteur (figure 2.3) dans la production d'un film protecteur stable qui protège les barres d'acier de l'attaque des sels (PAN et al., 2020).

2.6.1.2 Étude effectuée par (LIU et al., 2023) :

Dans cette étude, la poudre de noix de coco a été utilisée comme inhibiteur naturel ; nous avons mené des expériences sur le PCO qui ont donné les résultats suivants :

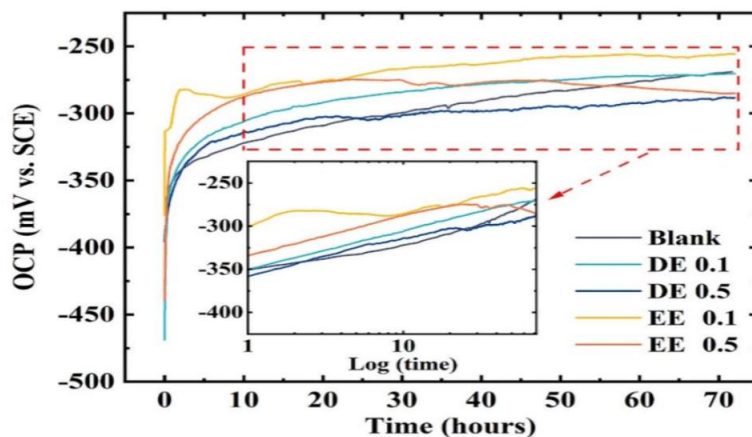


Figure 2.2 : Surveillance de l' PCO pendant les 3 jours de pré-passivation dans des solutions inhibitrices sans chlorure (Liu et al., 2023).

Les résultats de la tension en circuit ouvert (PCO) obtenus pendant la phase de passivation préliminaire ont montré que tous les échantillons d'acier au carbone placés dans une solution alcaline de pores de béton ont connu une augmentation rapide des valeurs d'PCO au cours des premières heures, suivie d'une relative stabilisation, ce qui indique la formation d'une couche de passivation initiale à la surface. Cependant, la présence d'extraits de poussière de fibres de coco a amélioré ce comportement à des degrés divers. L'extrait d'éthanol à une concentration de 0,1 g/L (EE0,1) présente les valeurs d'PCO les plus élevées et les plus stables, ce qui reflète un bon état de surface initial et la formation d'une couche protectrice cohérente

se développant en douceur sans perturbation, par rapport à l'extrait aqueux (DE) qui a présenté des valeurs d'PCO initiales plus faibles et un taux d'évolution plus élevé, ce qui indique une amélioration rapide mais moins homogène. L'analyse logarithmique de l'évolution de l'PCO a également montré que l'EE0,1 atteint un équilibre idéal entre passivation et stabilité, ce qui est un facteur important car une augmentation excessive ou instable de l'OCP peut accroître le risque de corrosion ponctuelle en présence d'ions chlorure. Les résultats de l'PCO confirment ainsi que l'efficacité de l'inhibiteur n'est pas seulement liée à l'augmentation de la tension, mais aussi à sa stabilité et à la qualité de la couche de passivation formée, ce qui explique les performances supérieures de l'extrait d'éthanol à faible concentration par rapport à l'augmentation de la (Liu et al., 2023)

2.6.1.3 Étude effectuée par (HAROUAT, 2024) :

La figure 2.3 montre les caractéristiques d'évolution électrochimique des échantillons étudiés par Harouat au cours d'une période d'immersion de 90 jours dans un milieu corrosif de NaCl 0,5.

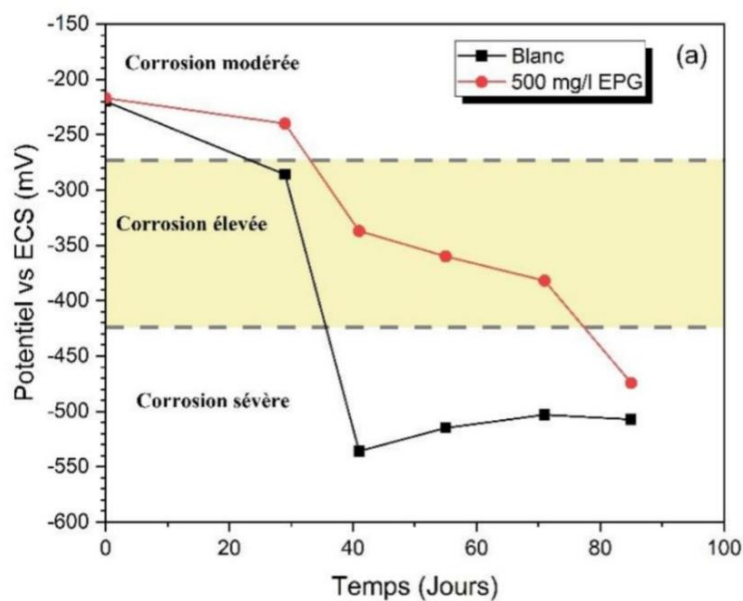


Figure 2.3 : Effet préventif de l'EPG sur l'acier immergé dans le mortier avec 0,5 M NaCl : (a) potentiel de corrosion (Harouat, 2024).

Les résultats montrent que l'échantillon blanc a présenté une diminution significative de sa résistance après 30 jours, passant rapidement dans la zone de corrosion sévère (inférieure à -420). Ceci indique que les ions chlorure ont pénétré le revêtement de béton et ont commencé à attaquer le métal. L'échantillon EGP 500g/l a conservé des valeurs plus favorables malgré une diminution progressive, restant loin du stade critique, contrairement à l'échantillon blanc. Cela suggère que l'échantillon EGP a réussi à le processus de dépassivation (Harouat, 2024).

2.6.1.4 Étude effectuée par (ZHANG et al., 2025):

Dans cette étude, le potentiel à circuit ouvert (PCO) des armatures a été mesuré après immersion dans une solution interstitielle carbonatée contenant différentes concentrations de glutenin (0 à 1 g/L). L'objectif est d'évaluer l'effet de la glutenin sur le comportement à la corrosion de l'acier.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 2.3 : Résultats des mesures du potentiel en circuit ouvert (PCO) du fer dans un milieu carbonaté poreux en fonction de différentes concentrations de glutenin (Zhang et al., 2025).

Concentration de glutenin (g/L)	PCO (V vs électrode de référence)	Interprétation
0	-0,679 V	Corrosion élevée – film passif dégradé
0,25	-0,672 V	Protection faible
0,5	-0,441 V	Amélioration notable de la passivation
0,75	-0,431 V	Film protecteur stable
1	-0,418 V	Meilleure protection

L'augmentation de la concentration en glutenin entraîne un déplacement du PCO vers des valeurs plus positives, indiquant une amélioration de la résistance à la corrosion. Sans inhibiteur, l'acier est en corrosion active avec un film passif dégradé. À partir de 0,5

g/L, une amélioration apparaît grâce à la formation d'un film protecteur, qui devient stable et efficace aux concentrations plus élevées (0,75–1 g/L) (Zhang et al., 2025).

Ainsi, la glutenin agit comme un inhibiteur anodique par adsorption, améliorant la passivation et réduisant le risque de corrosion (Zhang et al., 2025).

2.6.2 Résistance à la polarisation linéaire (RPL) :

Cette méthode, aussi appelée méthode Stern-Geary, permet d'estimer, rapidement et sans détruire, le taux de corrosion de l'acier dans le béton. Elle consiste à créer une déviation, très faible, de la tension d'équilibre (de 10 à 30 mV) et mesurer le courant qui en résulte.

Principaux aspects techniques :

Mesure de la résistance (R_p) : celle-ci correspond à la pente de la courbe de la relation tension-courant ($\Delta E/\Delta I$).

Mesure du courant de corrosion (I_{corr}) : il est déterminé par la relation suivante :

$$I_{corr} = B/R_p. \quad (2.1)$$

Constante de Stern-Geary (B) : sa valeur est comprise entre 26 mV (dans le cas de l'acier actif/corrodé) et 52 mV (dans le cas de l'acier inerte/protégé).

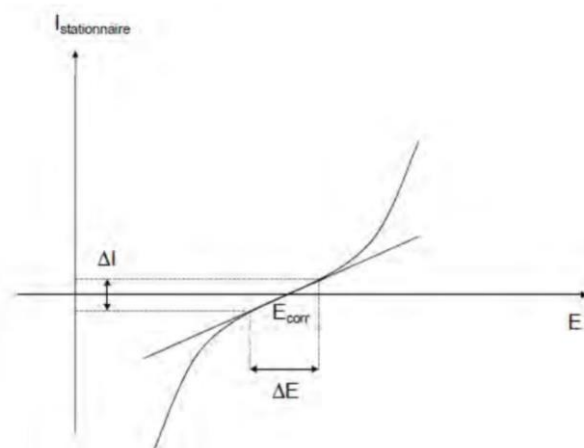


Figure 2.4 : Courbe de polarisation d'une électrode métallique pour évaluer la résistance de polarisation (Nasser, 2010)

Explication de la courbe de polarisation : (Nasser, 2010) a expliqué l'illustration expliquant comment mesurer la « pente de la courbe » au point d'équilibre pour en déduire la valeur R_p . Représentation graphique : sa référence est utilisée pour soutenir l'explication visuelle de la manière dont le pôle métallique se comporte lorsqu'un léger changement de tension est appliqué, un élément essentiel sur lequel dépendent les calculs du taux de corrosion.

Il a alors été possible d'établir un système de classification décrivant l'état du métal en utilisant la résistance de polarisation R_p et l'intensité du courant de corrosion I_{corr} . (Millard et al., 2001) :

Tableau 2.4 : Interprétation du courant de corrosion (Millard et al., 2001).

$R_p(k\Omega.cm^2)$	$I_{corr} (\mu A/cm^2)$	Etat de corrosion
0,25 - 2,5	10 – 100	Sévère
2,5 – 25	1 – 10	Elevé
25 – 250	0,1 – 1	Faible/modéré
> 250	< 0,1	Passive

Ce tableau 2.5 a pour rôle de faire la synthèse des conditions géotechniques et chimiques des matériaux ferreux et de s'intéresser à la fragilité vis-à-vis de la corrosion via l'adaptation de la relation inversement proportionnelle entre la résistance de polarisation (R_p) et l'intensité du courant de corrosion (I_{corr}). En clair : plus la R_p diminue, plus l' I_{corr} augmente, et plus le métal peut passer d'un état passif (Passive) à un état dangereux, voire à un stade de corrosion sévère. Cet outil est donc extrêmement précieux pour évaluer le niveau de dégradation des structures et leur durée de vie.

2.6.2.1 Étude effectuée par (HASSOUNE, 2018) :

Cette étude porte sur le suivi de la corrosion des armatures dans le béton à l'aide de la résistance de polarisation linéaire (R_p), en présence et en absence d'inhibiteurs de corrosion (DMEA, Na_3PO_4 et KH_2PO_4), sous exposition aux chlorures.

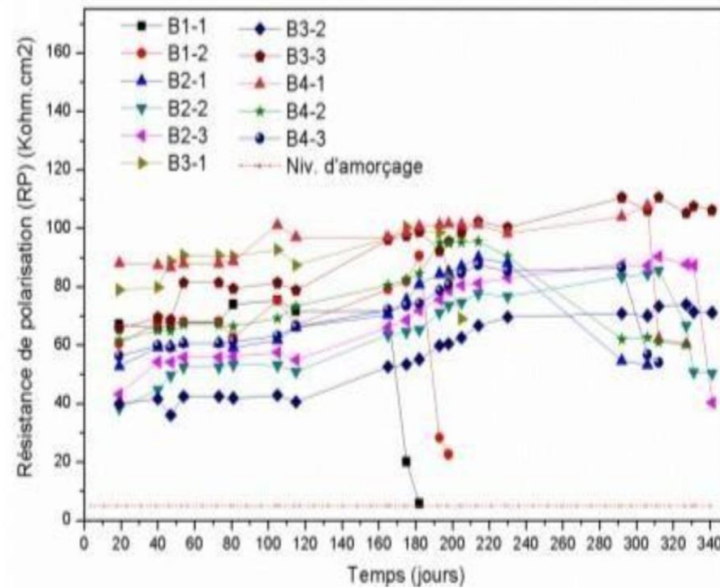


Figure 2.5 : Évolution de la résistance de polarisation de l'armature dans les bétons testés, en fonction de la durée d'exposition aux chlorures (Hassoune, 2018).

Les graphes montrent que la résistance de polarisation (R_p) est élevée au début, ce qui signifie que l'acier est bien protégé. Après 180 jours la valeur de R_p présente une chute rapide, cela indique une dépassivation de l'acier et un début de la corrosion (Hassoune, 2018).

Les bétons contenant des inhibiteurs gardent des valeurs de R_p plus élevées et diminuent plus lentement, ce qui veut dire que la corrosion est retardée. Parmi eux, le béton avec KH_2PO_4 donne les meilleurs résultats, suivi de DMEA, alors que le béton sans inhibiteur est le plus fragile (Hassoune, 2018).

Enfin, le suivi du R_p permet de détecter l'ammorçage de la corrosion des aciers noyés dans les bétons (Hassoune, 2018).

2.6.2.2 Étude effectuée par (BRIXI, 2021) :

Dans cette étude, l'acide ascorbique a été étudié comme inhibiteur organique de la corrosion de l'acier d'armature immergé dans une solution simulant les pores du béton, ainsi que dans des mortiers exposés aux chlorures, et son efficacité a été évaluée par la mesure de la résistance de polarisation (R_p) avec et sans l'ajout de NaCl (Brixi et al., 2021).

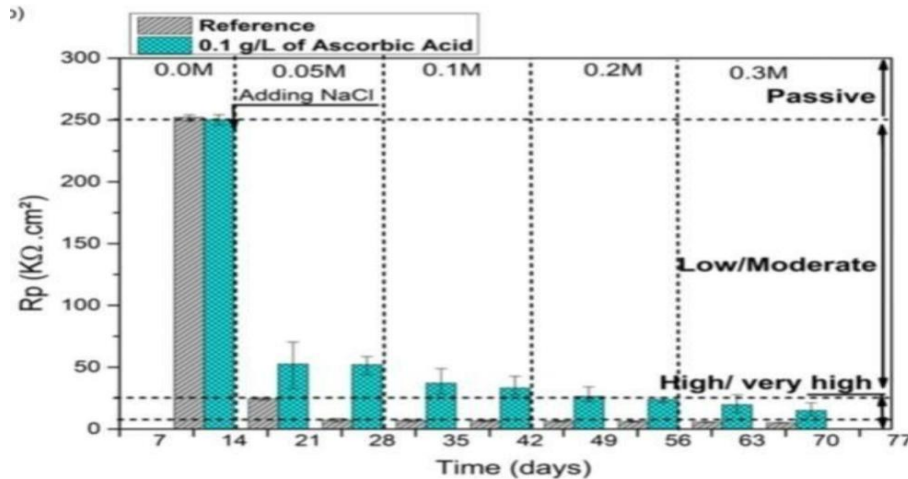


Figure 2.6 : Effet préventif dans la solution simulant les pores du béton à 0,1 g/L d'acide ascorbique, avec et sans NaCl (Brixi et al., 2021).

Les résultats montrent au début de l'immersion entre 0 à 14 jours (sans NaCl), la résistance de polarisation R_p est très élevée, atteignant environ $250 \Omega \cdot \text{cm}^2$. Après ajout de 0,05M de NaCl au 14^{ème} jour, une chute brutale du R_p a été observée pour l'échantillon de référence (sans inhibiteur), à $25 \Omega \cdot \text{cm}^2$ (Brixi et al., 2021).

Selon la norme ASTM C876-99, cette baisse indique que l'acier passe d'un état passif à un état de corrosion active.

Pendant toute l'expérience (jusqu'à 77 jours), même avec l'augmentation progressive de NaCl (0,05 à 0,3 M), l'échantillon avec 0,1 g/L d'acide ascorbique conserve toujours des R_p plus élevées que le témoin (Brixi et al., 2021).

L'acide ascorbique montre une protection de l'acier en prolongeant la stabilité de sa couche passive. Même si les chlorures réduisent progressivement R_p , il permet de maintenir la corrosion à un niveau faible ou modéré plus longtemps que sans traitement (Brixi et al., 2021).

2.6.2.3 Étude effectuée par (FLORES-NICOLAS et al., 2021) :

Les données obtenues lors de la détermination de la résistance à la polarisation (R_p) pour les échantillons d'armatures en béton sont présentées dans la figure numéro 9. De tels indicateurs témoignent du fait que tous les échantillons de béton armé ont subi une corrosion active et intense sous l'influence d'un environnement salé (3 % de NaCl).

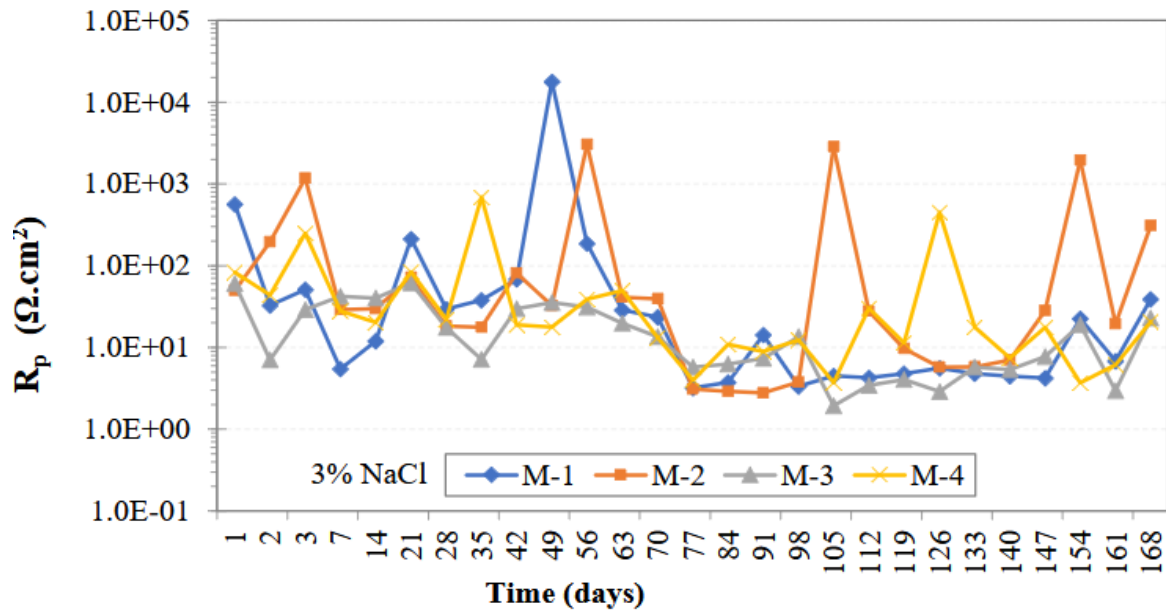


Figure 2. 7 : Les Valeurs de résistance de polarisation (R_p) au fil du temps (Flores-Nicolás et al., 2021).

La valeur a diminué de manière significative et est comprise principalement dans la plage de 1×10^1 à $1 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$. Cela indique l'action de chlorure qui a pénétré la couche protectrice naturelle de l'acier (dépassivation). Il est important de noter que des augmentations temporelles des indicateurs de résistance à la polarisation pour les échantillons (M-1) et (M-2) ont été notées entre les jours 42 et 70. Cependant, c'était des fluctuations instables suivies de diminutions rapides qui étaient liées au manque de succès dans le processus de passivation. En conséquence, le fait qu'il y avait eu une action rapide de processus électrochimiques montre que l'ajout de poudre de graphite ne protège pas la structure du niveau de risque de corrosion supérieur à 90 % (Flores-Nicolás et al., 2021).

2.6.2.4 Étude effectuée par (HAROUAT, 2024) :

La figure 2.5 illustre l'efficacité de l'extrait d'écorce de grenade comme inhibiteur de corrosion en suivant l'évolution de la densité du courant de corrosion (I_{corr}) au fil du temps ; les résultats montrent que :

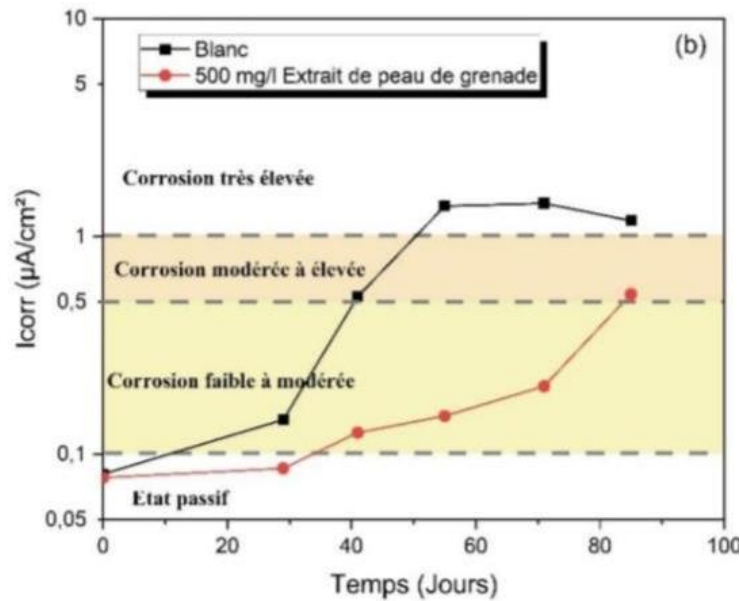


Figure 2.8 : Effet préventif de l'extrait de grenade sur l'acier immergé dans le mortier avec 0,5 M NaCl (b) densité du courant de corrosion (Harouat, 2024).

L'analyse comparative montre que l'échantillon de référence (Blanc) a subi une détérioration rapide et importante, passant d'un état passif à un niveau de corrosion très élevé, avec des valeurs de I_{corr} dépassant le seuil de $1 \mu A/cm^2$, ce qui correspond à une diminution significative de la résistance de polarisation à moins de $25 k\Omega \cdot cm^2$. En revanche, l'extrait d'écorce de grenade à une concentration de 500 mg/l a permis de maintenir le métal à l'état passif plus longtemps et avec une vitesse de croissance du courant très lente, les valeurs de I_{corr} à la fin du test restant inférieures au seuil de $0,5 \mu A/cm^2$. Ceci garantit que la résistance de polarisation (R_p) reste à des niveaux élevés, compris entre 50 et $250 k\Omega \cdot cm^2$, confirmant ainsi la grande efficacité de l'extrait pour inhiber l'attaque ionique et assurer une protection durable de la surface de l'acier (Harouat, 2024).

2.7 Résistance à la compression :

2.7.1 Étude effectuée par (MASRI, 2019) :

(Masri, 2019) a étudié l'utilisation de l'acide ascorbique, de l'acide ascorbique avec la propolis, et de l'extrait de feuilles de Henna comme inhibiteurs dans les mortiers. Des tests à 28 jours ont montré comment chaque additif affecte la résistance à la compression.

Pour acide ascorbique :

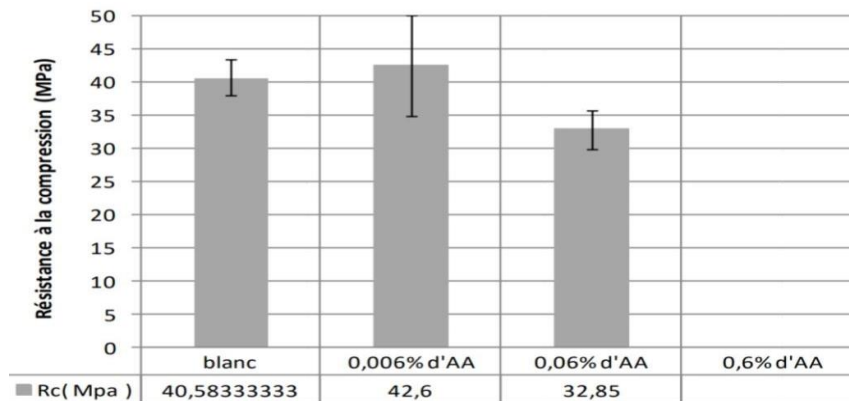


Figure 2.9 : Résultats de la résistance à la compression obtenus pour les différents dosages de l'Acide Ascorbique (Masri, 2019).

À 28 jours, le mortier témoin a une résistance de 40,6 MPa. Un faible dosage d'acide ascorbique (0,006 %) améliore légèrement la résistance (+5 %), tandis qu'une concentration plus élevée (0,06 %) la réduit fortement (−19 %) (Masri, 2019).

Pour l'Acide ascorbique +Propolis :

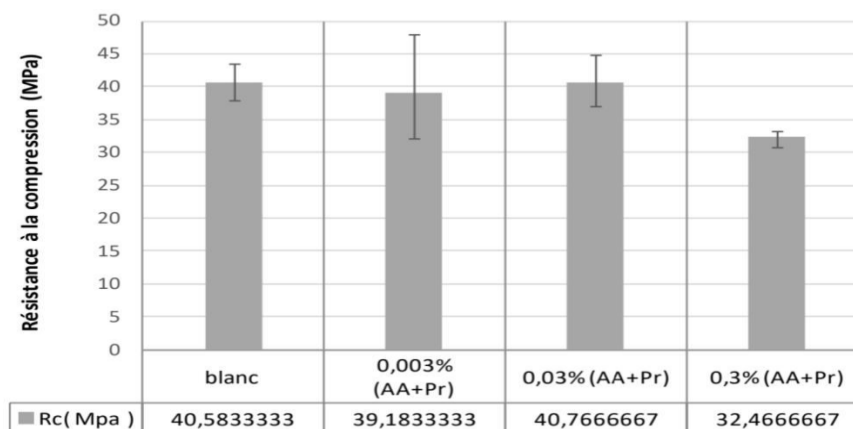


Figure 2.10 : Résultats de la résistance à la compression obtenus pour les différents dosages de l'(Acide Ascorbique +Propolis (Masri, 2019).

L'ajout d'acide ascorbique à faible dosage (0,006 %) améliore légèrement la résistance à la compression du mortier.

À des concentrations plus élevées, il agit comme retardateur et réduit fortement la résistance.

Un dosage excessif (0,6 %) empêche l'hydratation du ciment et provoque la détérioration des échantillons (Masri, 2019).

Pour l'extrait de feuilles de Henna :

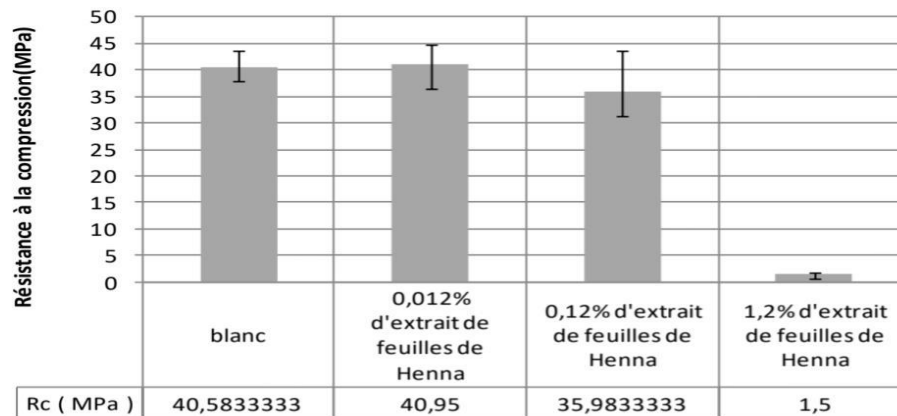


Figure 2.11 : Résultats de la résistance à la compression obtenus pour les différents dosages de l'extrait de feuilles de Henné (Masri, 2019).

L'extrait de feuilles de Henné n'influence pas la résistance à faible dosage (0,012 %), avec des valeurs proches du mortier témoin. A 0,12 %, une diminution sensible de la résistance à la compression est observée. Un dosage élevé (1,2 %) provoque une chute très importante de la résistance, traduisant une dégradation du mortier (Masri, 2019).

Cet effet est lié aux composés organiques du Henné qui retardent l'hydratation du ciment.

Parmi les trois inhibiteurs étudiés, l'acide ascorbique pur ralentit fortement la prise et diminue la résistance à la compression. En mélange avec la propolis, son effet est faible, car la quantité de vitamine C est très faible. Les extraits de henné, riches en Lawson, acide gallique et tanins, retardent également la prise et réduisent la résistance du ciment. Chaque inhibiteur agit de manière optimale à une certaine concentration, tandis qu'un ajout excessif peut produire un effet inverse, perturbant l'hydratation et la résistance (Masri, 2019).

2.7.2 Étude effectuée par (BRIXI, 2022) :

Cette étude, menée par Madame (Brix, 2022) a pour but d'analyser l'influence de deux inhibiteurs naturels, l'extrait de feuille de henné (EFH) et l'acide ascorbique, sur la résistance à la compression du mortier à 28 jours, en comparaison avec un mortier de référence sans ajout.

1 Pour l'extrait de feuille de henné (EFH) :

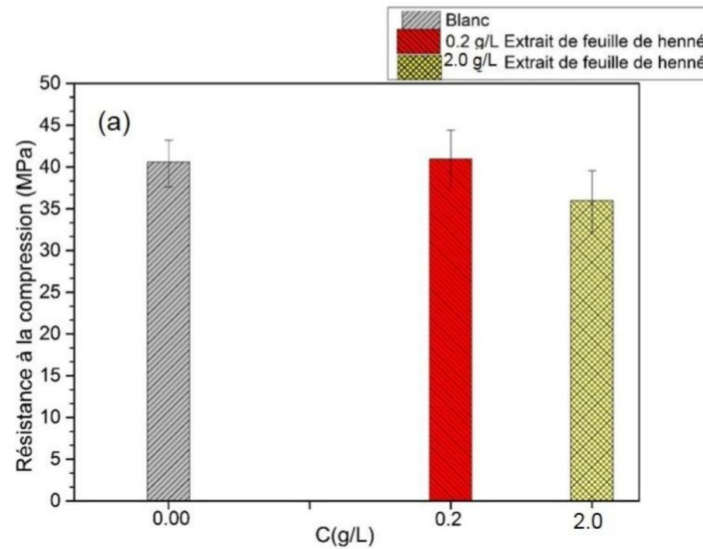


Figure 2.12 : La résistance à la compression des mortiers utilisés avec et sans EFH dans le mélange d’eau après 28 jours de durcissement (Brixi, 2022).

Le béton témoin (sans EFH) présente une résistance à la compression d’environ 40 MPa à 28 jours.

L’ajout de 0,2 g/L d’EFH entraîne une augmentation de la résistance, atteignant environ 41–42 MPa. Cela montre un effet bénéfique de l’EFH à faible dosage,

En revanche, avec 2 g/L d’EFH, la résistance diminue pour atteindre environ 35–36 MPa , ce qui est inférieur au béton de référence.

Cette diminution de la résistance peut être due à la présence de sucres dans l’extrait de henné, lesquels agissent comme retardateurs de prise, entraînant un retard dans le durcissement et une baisse de la résistance de 42,6 MPa à 35 MPa.

La concentration de 0,2 g/L est optimale car elle permet de garder les mêmes propriétés mécaniques que le mortier blanc (Brixi, 2022).

2 Pour l’acide ascorbique :

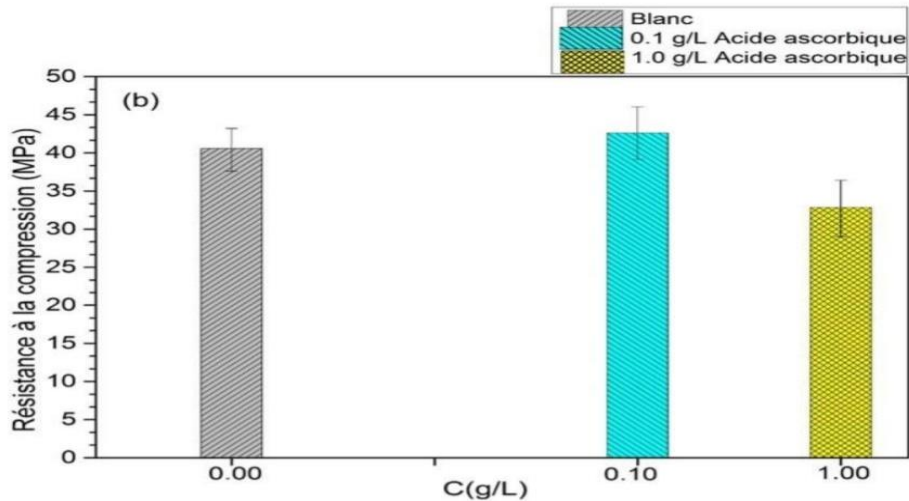


Figure 2.13 : Résistance à la compression des mortiers utilisés avec et sans acide ascorbique dans l'eau de gâchage après 28 jours de cure (Brix, 2022).

Le graphique montre l'effet de l'ajout d'acide ascorbique sur la résistance à la compression du mortier on observe :

Le mortier de référence (0 g/L) présente une résistance d'environ 40 MPa.

L'ajout de 0,1 g/L augmente légèrement cette résistance ($\approx +5\%$), ce qui confirme que cette faible dose améliore les propriétés mécaniques.

En revanche, une dose plus élevée (1 g/L) entraîne une diminution notable de la résistance (≈ 33 MPa)

Enfin, l'acide ascorbique a un effet bénéfique à faible dose (0,1 g/L) en améliorant légèrement la résistance et la compacité du mortier, tandis qu'à forte dose (1 g/L), il devient défavorable en réduisant la résistance. Ainsi, le dosage optimal est de 0,1 g/L (Brix, 2022).

2.7.3 Étude effectuée par (HAROUAT, 2024) :

Harouat a réalisé des essais de résistance à la compression sur différents échantillons de mortier, avec et sans extrait de peau de grenade, à 28 jours.

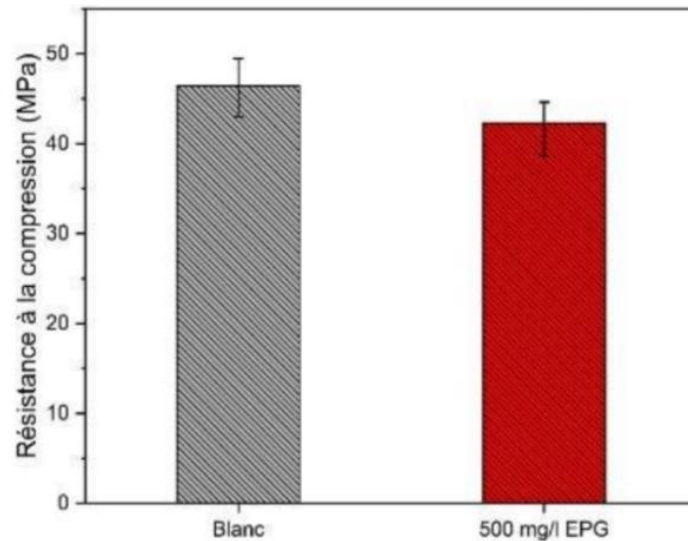


Figure 2.14 : Résistance à la compression des mortiers utilisés avec et sans EPG (Harouat, 2024).

Les résultats montrent que l'ajout de 500 mg/L d'extrait d'écorce de grenade au mortier a réduit sa résistance à la compression de 9 % après 28 jours, passant de 46,43 MPA (témoin) à 42,31 MPA. Cette baisse est due aux tanins de l'écorce, qui libèrent des sucres et des acides ralentissant l'hydratation du ciment et la cohésion du mortier (Harouat, 2024).

2.7.4 Étude effectuée par (BELARBI ,2024) :

(Belarbi, 2024) à étudié deux types d'inhibiteurs verts, à savoir l'extrait de peau d'orange et l'extrait de peau de grenade, et a réalisé des essais de résistance à la compression après 28 jours.

Pour l'extrait de peau d'orange :

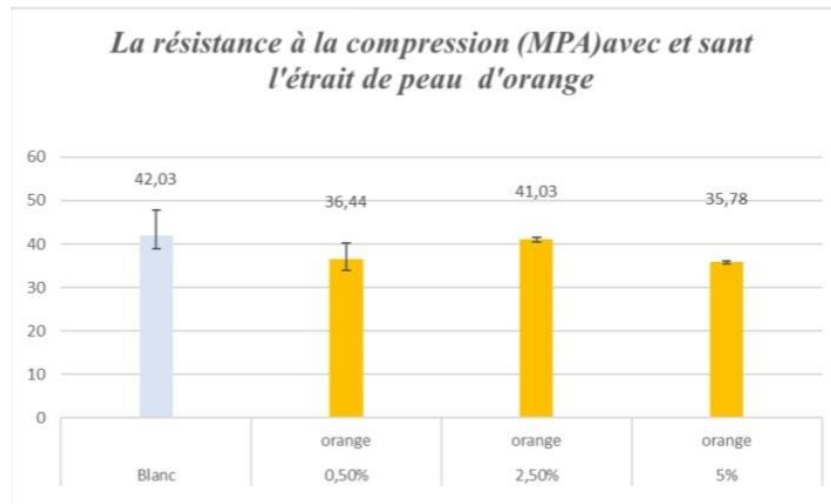


Figure 2.15 : Résistance à la compression des échantillons de mortier avec et sans l'extrait de peau d'orange après 28 jours (Belarbi, 2024).

L'extrait de peau d'orange a baissé la résistance d'environ 14 % pour 0,5 % et 5 % à 2,5 %, la résistance était presque la même que celle du témoin.

Les valeurs étaient 41,03 MPa pour l'inhibiteur et 42,03 MPa pour le témoin (Belarbi, 2024).

Pour l'extrait de peau de grenade :

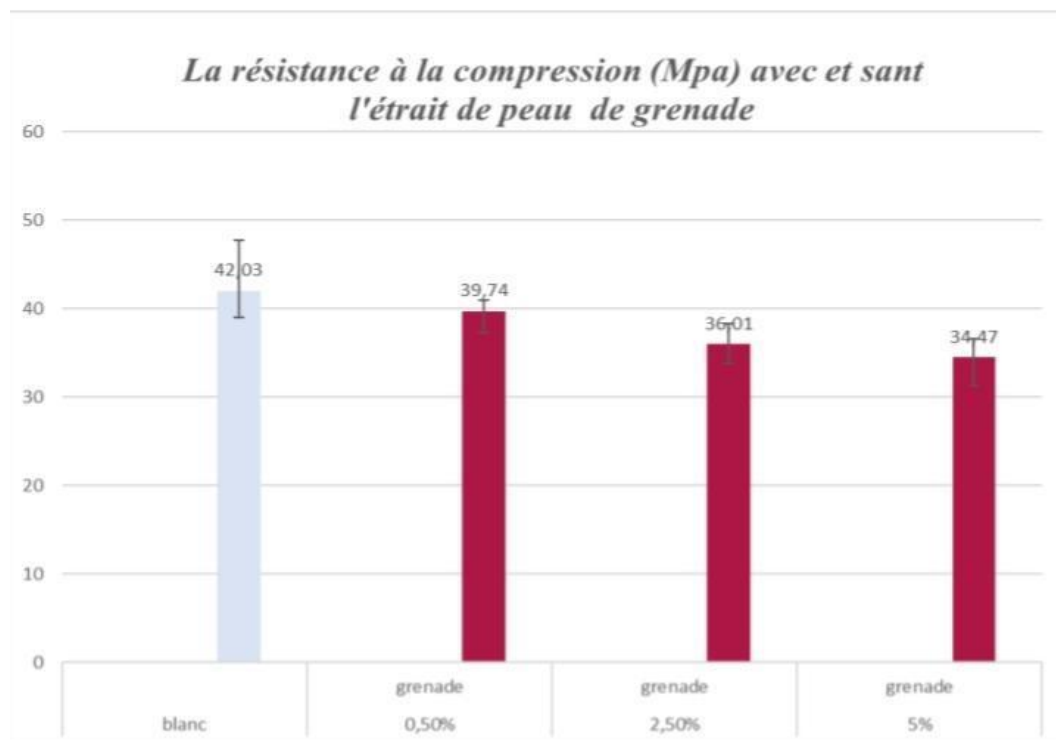


Figure 2.16 : La résistance à la compression des échantillons de mortier avec et sans l'extrait de peau de grenade après 28 jours (Belarbi, 2024).

Avec 0,5 % d'extrait de peau de grenade, la résistance a baissé de 6 %. À 2,5 % et 5 %, elle a diminué de 14 % et 18 %. Donc, plus il y a d'extrait, plus le mortier devient faible (Belarbi, 2024).

2.8 Conclusion :

Les inhibiteurs de corrosion écologiques constituent une solution efficace et durable pour la protection des armatures, avec une efficacité anticorrosion supérieure à 90 % grâce à la formation d'un film protecteur. Toutefois, leur impact sur les propriétés mécaniques du béton dépend fortement du dosage. Un ajout non optimisé, comme celui de l'extrait d'écorce de grenade, peut entraîner une diminution de la résistance à la compression en ralentissant l'hydratation du ciment. Il est donc essentiel d'optimiser le dosage afin de garantir un bon compromis entre protection contre la corrosion et performances mécaniques du béton.

Dans le chapitre suivant, on va présenter simplement les matériaux utilisés, les méthodes expérimentales et les approches théoriques de l'étude, afin de mieux comprendre l'effet des inhibiteurs sur le comportement du béton armé.

Chapitre 3 : Matériaux et méthodes

3.1 Introduction :

Dans le cadre de ce travail expérimental, une étude a été menée afin d'évaluer l'efficacité inhibitrice d'un produit naturel, à savoir un extrait de fleurs de lavande. Des essais électrochimiques ont été réalisés sur des échantillons d'acier immergés dans une solution simulant les pores du béton en présence de chlorure, ainsi que dans des éprouvettes de mortier, en présence et en absence de différentes concentrations de cet extrait. Par ailleurs, des essais de caractérisation des matériaux à l'état frais et durci ont également été effectués afin d'analyser l'influence de cet extrait sur les propriétés du matériau.

3.2. Matériaux Utilisés :

3.2.1 Acier :

L'acier utilisé dans cette étude est un acier d'armature couramment employé dans le béton armé. Sa composition chimique a été déterminée par analyse spectrométrique au niveau du laboratoire de contrôle qualité de l'usine ALFON (Oran). Cet essai a été réalisé dans le cadre des travaux de recherche de (Sail et al., 2013). Les résultats sont représentés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Composition Chimique de l'acier utilisé. (Sail et al., 2013)

Élément	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	V	Sn	Fe
% masse	0,25	0,27	1,25	0,01	0,04	0,05	0,01	0,11	0,003	0,29	0,06	0,01	97,65

3.2.2 Inhibiteur étudié :

Le produit naturel retenu pour cette étude est la fleur de la lavande, connue sous le nom scientifique *Lavandula angustifolia* (lavande officinale). Les fleurs ont été cultivées et récoltées dans les champs de Sebdou, de la région de Tlemcen, Algérie. La lavande contient plusieurs familles de composés bioactifs, notamment des acides phénoliques (caféique, férulique, coumarique, rosmarinique), des flavonoïdes (lutéoline, apigénine et leurs glucosides), des coumarines, ainsi que des dérivés de la chlorophylle. Elle renferme aussi des triterpènes (α et β -amyrine, acide ursolique) et des composés phénoliques complexes comme les dérivés de l'acide caféique (Héral, 2021).

L'extrait de fleurs de lavande a été préparé au laboratoire EOLE (Eau et Ouvrages dans leur Environnement). La méthode d'extraction retenue est la macération. Pour ce faire, 75 g de fleurs de lavande séchées (Figure 3.1a) ont été immergés dans 1500 ml d'un mélange hydroalcoolique constitué de 30 % d'eau distillée (450 ml) et de 70 % d'éthanol (1050 ml) (Figure 3.1b). L'ensemble a été laissé en macération pendant 15 jours, à température ambiante et à l'abri de la lumière.



Figure 3.1 : (a) Fleurs de lavande séchées, (b) Fleurs séchées de lavande immergées dans le solvant.

La solution obtenue après macération a été filtrée à l'aide d'un papier filtre standard afin d'éliminer les résidus solides (Figure 3.2). Le filtrat a ensuite été soumis à une évaporation du solvant à l'étuve, à une température de 50 °C pendant 24 heures, dans le but de récupérer l'extrait sous forme solide.



Figure 3.2 : Etapes de filtration de l'extrait en inhibiteur.

L'extrait solide (Figure 3.3) ainsi obtenu a été collecté et conservé pour les essais ultérieurs. Il a notamment été utilisé pour évaluer son pouvoir inhibiteur sur la surface de l'acier de

renforcement, à différentes concentrations (0,05,...et 0,4 g/L). Cet extrait a également servi de base à l'ensemble des expérimentations réalisées dans la suite de l'étude.



Figure 3.3 : Les étapes de préparation d'inhibiteurs utilisés, (a) Séchage par étuvage (b)Evaporation du solvant ,(c)Récupération de l'extrait sec.

3.2.3 Solution employée :

La solution d'immersion utilisée est une solution qui simule les pores du béton (SSPB). Elle est préparée à partir d'une solution de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturée, à laquelle on ajoute du NaOH , du KOH afin d'obtenir un milieu alcalin. Ensuite, des chlorures sous forme de NaCl sont ajoutés (Tableau 3.2).

Cette solution a été choisie pour reproduire l'environnement interne d'un béton sain exposé à des chlorures présents dans l'eau de mer Méditerranée.

Tableau 3.2 : Composition du milieu d'étude.

Composants	KOH	NaOH	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	NaCl
C (mol/L)	0,0089	0,0100	0,0270	0,0051

3.2.4 Mortier :

Les matériaux utilisés pour la formulation des différents mortiers de cette étude sont présentés comme suit :

3.2.4.1 Ciment :

Le matériau cimentaire utilisé est un ciment de type CEM II/A-P 42,5. Il est fourni par la cimenterie de Béni-Saf, située dans la wilaya d'Ain-Temouchent. Le ciment présente respectivement une masse volumique apparente 1047 kg/m^3 .

a) Masse volumique apparente du ciment :

La masse volumique apparente du ciment correspond à la masse rapportée au volume total occupé, incluant les vides intergranulaires ainsi que les pores ouverts et fermés. À l'inverse, la masse volumique absolue représente la masse de matière contenue dans un volume donné, sans prendre en compte les espaces vides entre les particules. Elle s'exprime en kg/m^3 et permet de caractériser la densité intrinsèque du ciment (Figure 3.4).



Figure 3.4 : Masse volumique apparente de ciment utilisé.

3.2.4.2 Sable :

Le sable utilisé dans cette étude provient de la carrière de l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG) de Sid-Abdelli, située dans la wilaya de Tlemcen. Il s'agit d'un sable de classe 0/4. Ses caractéristiques physiques sont présentées dans le tableau 3.4.

a) Masse volumique apparente :

Afin de caractériser notre sable, nous avons déterminé sa masse volumique apparente (Figure 3.5) , conformément à la norme NA EN 1097-6. le résultat de la masse volumique apparente du sable utilisé regroupe dans le tableau 3.4.



Figure 3.5 : Masse volumique apparente de sable utilisé .

b) Masse volumique absolue :

La masse volumique absolue est la masse d'un matériau rapportée à son volume réel, sans les vides. la figure 3.6 montre ca:

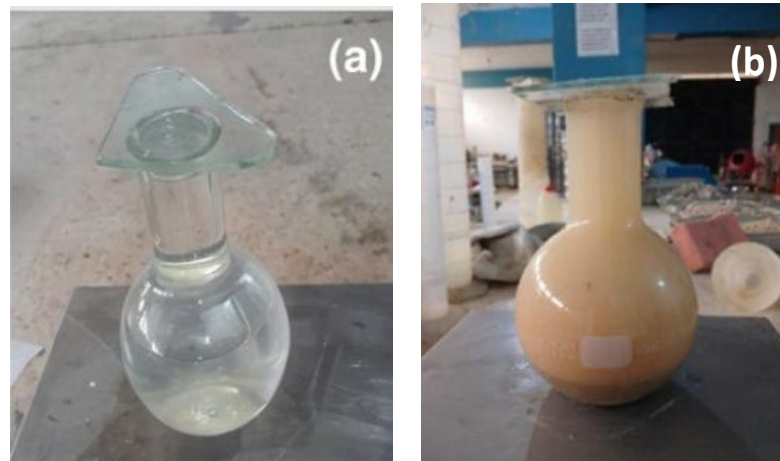


Figure 3.6 : Essai de détermination de la Masse volumique absolue du sable.

c) Equivalent de sable (NF18-598) :

Cet essai permet d'évaluer la propreté du sable en déterminant la quantité de particules fines qu'il contient. Les sables étudiés peuvent provenir de carrières concassées, de dunes ou d'oueds.

On note deux méthodes pour mesurer l'équivalent de sable : la méthode visuelle et la méthode au piston, la première étant simple et rapide, et la seconde plus précise et fiable.

Equivalent de sable est déterminée par :

$ESV = (h_2 / h_1) * 100$: mesure visuelle.

$ESP = (h_2' / h_1) * 100$: mesure par le piston.

h_1 : hauteur totale (sable+ fines).

h_2 : hauteur du sable

h_2' : hauteur tassée au piston.

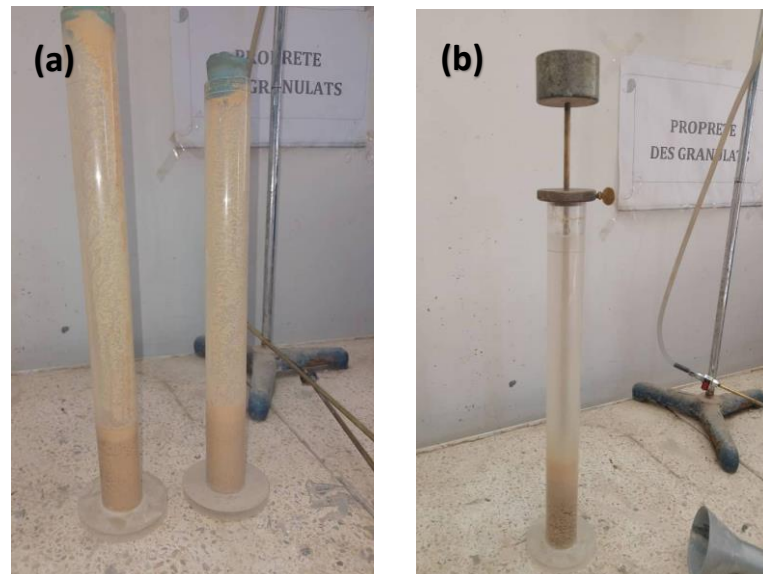


Figure 3.7 : présentent les méthodes de mesure et les résultats d'essai d'équivalent de sable, (a) Mesure visuelle , (b) Mesure par piston.

d) Analyse granulométrique :

La distribution granulométrique du sable peut être relevée par un essai de tamisage normalisé NF EN 933-1. Cette mise à rude épreuve, consiste à trier les différents grains composants de l'échantillon, à l'aide d'une série de tamis superposés dont les ouvertures sont définies par une norme, de la plus grosse à la plus petite ouverture d'en haut en bas. L'échantillon à tester est introduit en partie supérieure de la colonne de tamisage, puis la séparation des grains est réalisée par vibration de l'ensemble. Les données d'analyse de sous-échantillon de sable sont conciliées dans (le tableau 3.3) et tracé graphiquement dans la figure 3.8.

Tableau 3.3 : Résultat de l'analyse granulométrique du sable.

Tamis (mm)	Mi (kg)	Mc(kg)	Pr%	Pt%
6,3	0	0	0	100
5	0,012	0,012	1,2	98,8
4	0,036	0,048	4,8	95,2
3.15	0,080	0,128	12,8	87,2
2,5	0,016	0,144	14,4	85,6
2	0,252	0,396	39,6	60,4
1,6	0,088	0,484	48,4	51,6
1,25	0,040	0,526	52,6	47,4
1	0,042	0,566	56,6	43,4
0,8	0,028	0,594	59,4	40,6
0,63	0,038	0,632	63,2	36,8
0,5	0,032	0,664	66,4	33,6
0,315	0,094	0,758	75,8	24,2
0,250	0,056	0,814	81,4	18,6
0,16	0,112	0,926	92,6	7,4
0,125	0,044	0,97	97	3
0,1	0,005	0,975	97,5	2,5
0,080	0,010	0,985	98,5	1,5
0,063	0,005	0,99	99	1
Fond	0,004	0,994	99,4	0,6

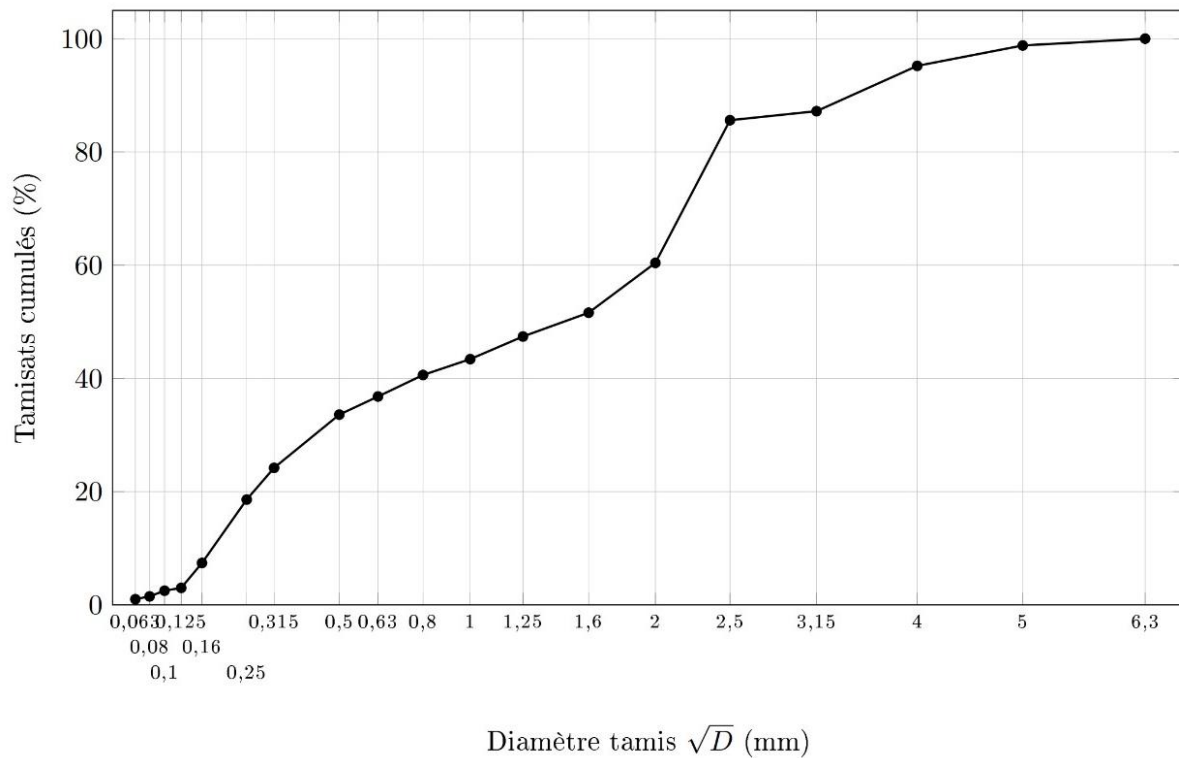


Figure 3.8 : Courbe granulométrique.

Suivant l'analyse granulométrique, le sable présente une teneur en éléments inférieurs à 0,063 mm de l'ordre de 1 %. Le module de finesse du sable est de l'ordre de 2,99 il est classé comme sable moyen légèrement grossier selon la norme (NF P 18 – 541). (Tableau 3.4)

Tableau 3.4 : Caractéristiques physiques du sable.

Mv apparente (Kg/m³)	1658	
Mv absolue (Kg/m³)	La méthode du ballon	2820
Équivalent de Sable (%)	ESV	82,84
	ESP	77,12
Module de finesse	2,99	
% des fines	1	

Les valeurs de « ESV % » et « ESP % » présentées dans le tableau indiquent que le sable utilisé est propre.

3.2.4.3 Eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisée est une eau déminéralisée fournie par le laboratoire TECHNA-Lab (Saf-Saf, Tlemcen, Algérie). Elle a été choisie pour son pH neutre afin d'éviter toute contamination du mortier avec d'autres ions.

3.2.4.4 Formulation mortier :**a) Préparation Des Mortiers :**

La fabrication du mortier a été réalisée pour préparer 9 échantillons de dimensions ($4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$) pour chaque dose d'inhibiteur. Les constituants du mortier sont :

Tableau 3.5 : Composition des différentes séries de mortiers.

Composants	M _{réf} (Référence)	M1	M2	M3
Inhibiteur	0 g/L	0,1 g/L	0,5 g/L	1 g/L
Ciment	350 g	350 g	350 g	350 g
Sable	1050 g	1050 g	1050 g	1050 g
Eau	175 g	175 g	175 g	175 g
Rapport E/C	0,5	0,5	0,5	0,5

b) Protocole de fabrication du mortier avec inhibiteur :**1-Préparation des matériaux**

Pour 9 échantillons de $4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$:

- Ciment : 350 g
- Sable : 1050 g
- Eau distillée : 175 g
- Eau d'absorption : 1,6 %
- Inhibiteur : selon la dose choisie

2-Pesée des matériaux : précision chaque matériau selon la dose d'inhibiteur utilisée.

3-Mélange à sec du ciment et le sable à sec pendant 1 à 2 minutes pour que ce soit bien homogène.

4-Dissoudre l'inhibiteur dans l'eau de gâchage avant de l'ajouter au mélange sec.

5- Verser l'eau avec l'inhibiteur progressivement et mélanger pour éviter les grumeaux.

6-Malaxage du mélange pendant 2 à 3 minutes jusqu'à obtenir un mortier bien homogène et facile à travailler.

7-Préparation des moules et les enduire d'huile, afin de faciliter le démoulage après la prise du mortier.

8- Verser le mortier dans les moules ($4 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$) sur une table vibrante pour enlever les bulles d'air et bien compacter le mortier.

9-Démoulage Après 24 heures, démouler les échantillons avec soin.

10-Placer les échantillons sont placés dans un bac d'eau pour une période de cure de 7, 14 ,et 90 jours.



Figure 3.9 : Etapes de fabrication de mortier ,(a) Préparation des matériaux ,(b) Malaxeur ,(c) Malaxage ,(d) Moulage ,(e) Conservation.

3.3 Méthodes de mesures :

3.3.1 Mesures électrochimique :

Afin d'évaluer l'efficacité inhibitrice du produit testé sur des échantillons d'acier immergés dans une solution simulant les pores du béton, avec et sans inhibiteur, des essais électrochimiques ont été réalisés.

3.3.1.1 Préparation des échantillons d'acier :

Tout d'abord, ces échantillons ont été soumis à un polissage (Figure3.10)avec du papier abrasif de grades croissants (220, 320, 400,800 et 1000), rincés à l'eau distillée et stockés dans une solution alcaline qui simule les pores de béton pendant 15 jours pour une pré-passivation. Cette dernière permet de simuler les conditions réelles des électrodes de travail d'acier d'armature dans le béton avant l'infiltration d'espèces agressives.

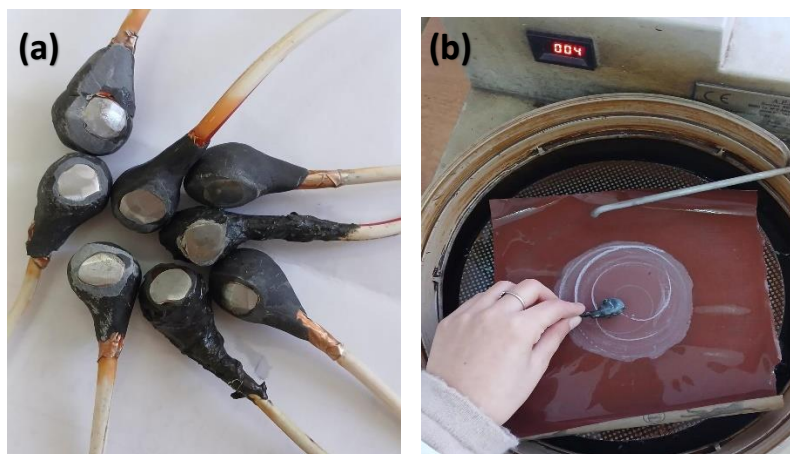


Figure 3.10 : (a) Electrodes de travail, (b) Polisseuse

Les essais électrochimiques ont été réalisés à l'aide d'un Potentiostat/Galvanostat de modèle Voltalab80-PGZ402, piloté par le programme Voltamaster4. Le Potentiostat/Galvanostat est relié à un bécher en verre contenant 100 ml de solution simulant les pores de béton contaminée par 0,05M en NaCl en absence et en présence de différentes concentrations en inhibiteurs testés (extrait de fleurs de la Lavande) Le bécher a été équipé de trois électrodes : l'électrode de travail est celle représentée sur la figure 3.8, l'électrode de calomel saturé (ECS) utilisée comme électrode de référence et l'électrode de platine comme électrode auxiliaire. Le dispositif expérimental utilisé pour les mesures électrochimiques est illustré sur la figure 3.11.

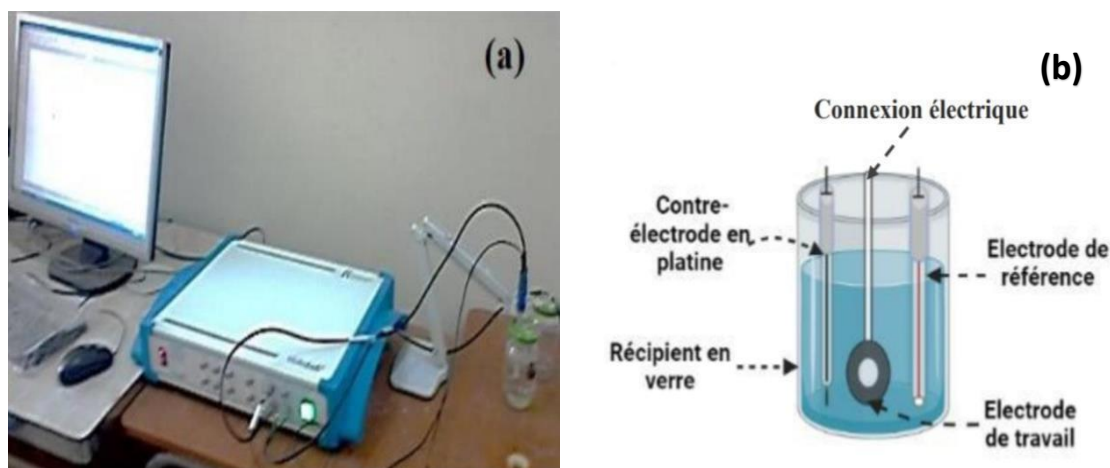


Figure 3.11: (a) Dispositif expérimental , (b) Cellule électrochimique à trois électrodes.

3.3.2 Potentiel à circuit ouvert (PCO):

Le potentiel de circuit ouvert (PCO) est un paramètre clé en corrosion et en électrochimie. Il se mesure par la différence de potentiel entre l'électrode de travail et l'électrode de référence lorsque aucun courant ne passe. En outre, ce paramètre est directement lié au degré de corrosion des armatures en acier. Par exemple, un potentiel fortement négatif correspond à une situation où la corrosion est très probable. Pour les besoins de la recherche, ce potentiel a été enregistré de temps en temps de façon correcte (synchrone) pour surveiller fidèlement les changements électrochimiques du métal ainsi que son contact avec l'environnement.

3.3.3 La résistance à la polarisation linéaire (RPL) :

Est une technique électrochimique utilisée pour déterminer le taux de corrosion des métaux en mesurant la réponse du courant à une faible variation de tension proche de la tension de corrosion. Cette méthode repose sur le principe selon lequel la valeur de la résistance à la polarisation (R_p) est inversement proportionnelle à la vitesse de corrosion : des valeurs élevées indiquent un faible taux de corrosion, tandis que des valeurs faibles indiquent une corrosion élevée. Cette technique est l'une des méthodes importantes en électrochimie pour évaluer le comportement des matériaux métalliques dans différents milieux. Dans ce travail, une plage de tension comprise entre -20 et $+20$ mV a été appliquée autour de la tension de corrosion, à une vitesse de balayage de $0,167$ mV/s, ce qui a permis de déterminer à la fois la tension de corrosion (E_{corr}) et la résistance de polarisation (R_p).

3.4 Effet de l'inhibiteur sur les propriétés du mortier :

3.4.1. Caractérisation à l'état frais : Mesure au mini cône

L'affaissement des mortiers préparés a été évalué immédiatement après le mélange à l'aide d'un mini cône comme le montre les figures 3.11 et 3.12.



Figure 3.12 : Etapes d'essai d'affaissement.

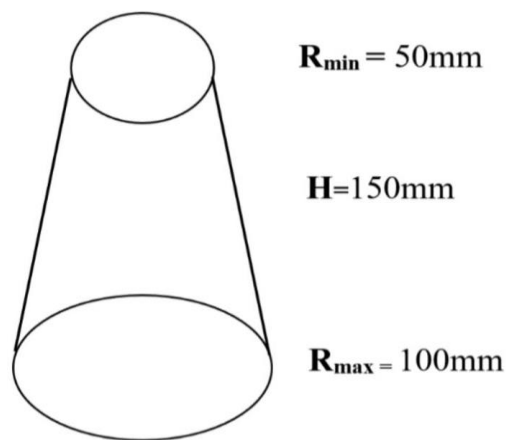


Figure 3.13 : Dimensions de mini-cône utilisé.

3.4.2 Caractérisation à l'état durci

3.4.2.1 Pesée hydrostatique :

La pesée hydrostatique sert à calculer la masse volumique des échantillons de mortier à 7, 28 jours. On les pèse dans l'air et dans l'eau pour connaître leur volume. À 7 jours, l'hydratation commence, à 28 jours le mortier est normal. L'étude a utilisé 3 échantillons pour chaque dose d'inhibiteur (0,1, 0,5 et 1 g/L) et 3 échantillons sans inhibiteur.

Étapes de la pesée hydrostatique :

On prépare les échantillons et on sèche légèrement leur surface.

On pèse chaque échantillon à l'air : M_{air} (masse à l'air).

On immerge l'échantillon dans l'eau et on mesure sa masse : M_{eau} (masse humide ou immergée).

On répète ces mesures à 7, 28 jours pour suivre l'évolution de la densité et de la compacité.

On calcule la masse volumique de chaque échantillon.

Masse volumique = $M_{\text{air}} / (M_{\text{air}} - M_{\text{eau}})$



Figure 3.14 : pesée hydrostatique.

3.4.2.2 L'essai de la résistance à la compression :

L'essai de résistance à la compression a été réalisé après 7 et 28, 90 jours sur des échantillons cubiques de dimensions $(4 \times 4 \times 4) \text{ cm}^3$, selon la norme européenne NF EN 12390-3, 2019.



Figure 3.15 : Etapes de L'essai de résistance à la compression.

Pour tester la résistance à la compression, nous avons procédé de la manière suivante :

- Après avoir positionné l'échantillon au centre, il a été progressivement et uniformément chargé jusqu'à la rupture.
- La machine d'essai a été mesurée directement la contrainte de rupture (RC).

La valeur de la contrainte de rupture RC a été vérifié par la formule suivante :

- $R_c = F(KN)/S(mm^2)$ (3.2) Avec :
- RC : la contrainte de rupture à la compression (MPa).
- F : la force appliquée donnée par l'appareil (KN).
- S : la section d'échantillon (mm^2).

3.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les méthodes utilisées dans cette étude. Nous avons d'abord décrit les matériaux et la préparation de l'inhibiteur à base de fleurs de lavande. Le polissage des électrodes a été réalisé pour garantir de bonnes mesures.

Ensuite, nous avons effectué des essais sur le sable, comme la masse volumique apparente, l'analyse granulométrique et l'équivalent de sable. Puis, nous avons confectionné des mortiers avec différents dosages d'inhibiteur.

La solution alcaline simulant les pores du béton a permis de reproduire un milieu proche de la réalité afin d'effectuer les essais électrochimiques. Les caractéristiques du mortier à l'état frais à savoir l'essai d'affaissement et à l'état durci les essais de résistance mécanique permettront de juger l'effet de cet inhibiteur. Les résultats seront présentés et analysés dans le chapitre suivant.

Chapitre 4 : Résultats et interprétations

4.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous analyserons les résultats des essais électrochimiques les caractéristiques du mortier à l'état frais et à l'état durci.

Les performances de l'extrait de fleurs de lavande en tant qu'inhibiteur de corrosion des armatures dans un milieu simulant les pores du béton contaminé par les ions chlorures. Les essais électrochimiques, tels que le potentiel en circuit ouvert (PCO) et la résistance à la polarisation linéaire (RPL) ont été effectués afin de caractériser le comportement de l'acier avec et sans la présence de l'inhibiteur à diverses concentrations. Ensuite, nous examinons les propriétés du mortier : ouvrabilité, densité et à la résistance à la compression à différents âges et concentrations de cet extrait.

4.2 Propriétés électrochimiques des barres d'acier dans une solution simulant les pores du béton :

4.2.1 Potentiel de circuit ouvert :

Les mesures du potentiel de corrosion en fonction du temps ont montré une évolution de potentiel à circuit ouvert (E_{corr}). Pour l'échantillon blanc, une baisse significative du potentiel a été notée, de -514,6 mV après 24 heures à -646,1 mV après 15 jours. Cela confirme la corrosion par détérioration de la couche protectrice ce qui fait augmenter la cinétique de corrosion. En outre, les faibles dosages (0,05 g/L et 0,1 g/L) ont montré une réduction de la cinétique de la corrosion. La concentration la plus faible de 0,05 g/L a donné une valeur à la fin de l'étude (-417,2 mV), bien au-dessus de celle de l'échantillon blanc, ce qui suggère la formation d'une meilleure protection de la surface de l'acier. Toutefois, la plus grande concentration (0,4 g/L) a enregistré une valeur très négative, dépassant (-655,4 mV), ce qui indique que les concentrations trop élevées ne renforcent pas la protection. En résumé, la meilleure performance est observée à une concentration de 0,05 g/L de l'extrait de fleurs de lavande.

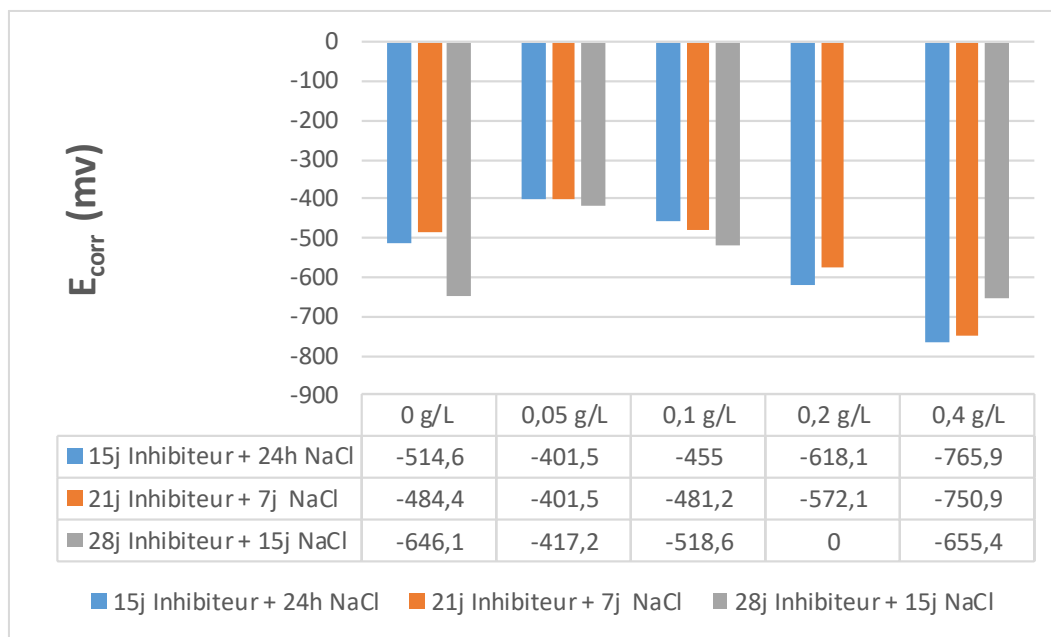


Tableau 4.1 : Paramètres d'impédance de l'acier au carbone dans la SSPB contenant 0,05M en NaCl avec et sans Extrait de fleurs de lavande.

	C(g/L)	Ecorr(mv)	Rp(kΩ·cm ²)	R ²	EI%
24 h	00	-514,6	19,28	0,999	—
	0,05	-401,5	115,50	0,999	<u>83,30</u>
	0,1	-455	88,21	0,991	78,14
	0,2	-618,1	38,92	0,996	50,46
	0,4	-765,9	37,02	0,997	47,92
7 jour	00	-484,4	34,85	0,999	-
	0,05	-401,5	115,50	0,999	<u>69,82</u>
	0,1	-481,2	35,93	0,999	3
	0,2	-572,1	16,97	0,999	—
	0,4	-750,9	7,23	0,996	—

15	00	-646,1	4,63	0,999	–
jour	0,05	-417,2	110	0,997	<u>95,79</u>
	0,1	-518,6	15,65	1	70,41
	0,2	–	–	–	–
	0,4	-655,4	8,63	0,996	46,34

Selon les résultats du tableau 4.1, la concentration 0,05 g/L s'est avérée être la concentration optimale pour protéger l'acier contre la corrosion. Cette dose apporte une efficacité remarquable de 83,30 % dès les premières 24 heures. Même si une diminution est remarquée au niveau de 7 jours (69,82 %), cette concentration est la seule qui permet de garder une protection stable contre l'agressivité des ions chlorures. À 15 jours, les performances se sont nettement améliorées avec une efficacité maximale de 95,79 %. Cela montre que cette faible dose de 0,05 g/L, forme un film protecteur, assurant ainsi un meilleur comportement vis-à-vis de la corrosion des armatures.

4.2.2 Résistance à la polarisation linéaire :

Les résultats de la résistance de polarisation linéaire (R_p), indique pour l'échantillon témoin (0 g/L), une augmentation de la corrosion active peut être observée. Cela correspond directement à la forte diminution des valeurs de R_p qui ont chuté d'environ 76% pour atteindre 4,63 $k\Omega \cdot cm^2$ après 15 jours d'exposition à 0,05M en chlorures, ce qui indique un état de corrosion avancé. En revanche, une concentration de 0,05 g/L a montré le meilleur résultat. Non seulement la résistance de polarisation (R_p) maximale a été obtenue (115,5 $k\Omega \cdot cm^2$), mais elle est restée stable jusqu'à 15 jours avec un (R_p) de 110 $k\Omega \cdot cm^2$, ce qui montre que l'extrait a bien protégé cet acier par un film stable avec un risque de corrosion faible (Millard et al., 2001). À la concentration de 0,1 g/L, un autre comportement est toutefois observé. L'efficacité est bonne au départ (88,21 $k\Omega \cdot cm^2$), mais elle diminue rapidement, avec presque toute la résistance perdue à partir de 15 jours (15,65 $k\Omega \cdot cm^2$), ce qui suggère que la couche protectrice est moins efficace à cette concentration.

La concentration supérieure à 0,1g/L de l'extrait de la fleurs de lavande sont moins efficaces pour l'inhibition de corrosion des armatures en acier puisque la résistance à la polarisation linéaire (R_p) sont de l'ordre de $10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$, ce qui montre un risque de corrosion élevé (Millard et al., 2001).

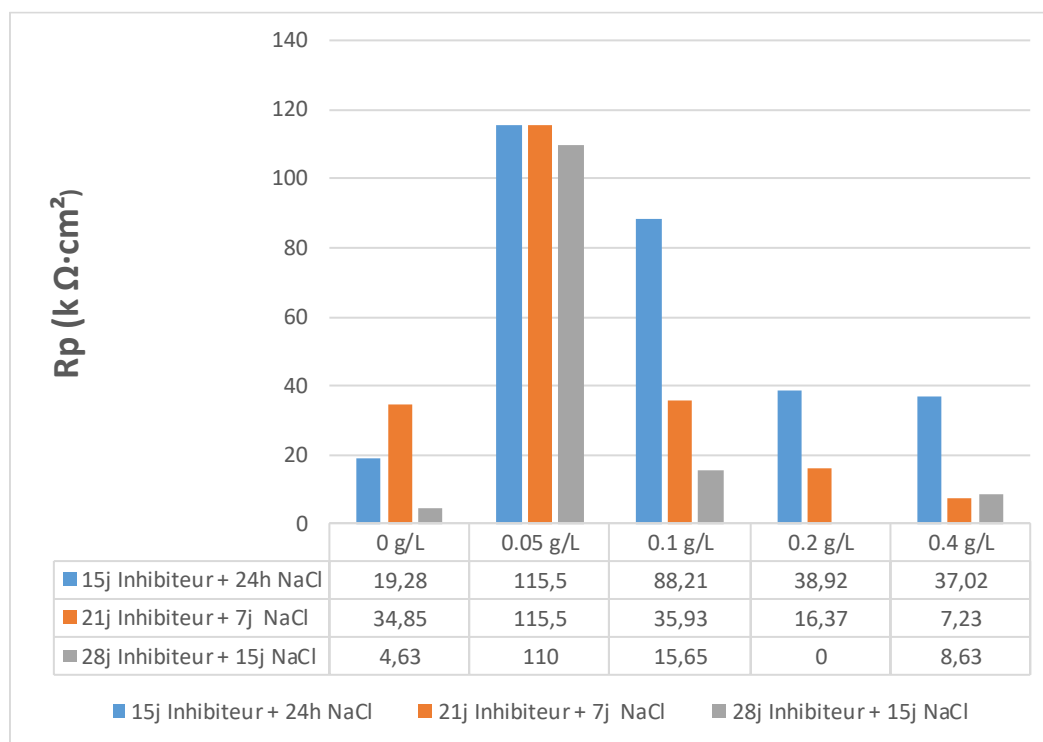


Figure 4.1 : Résistance à la polarisation sur l'acier immergé dans SSPB avec 0,05 M NaCl avec et sans extrait de fleurs de lavande.

Les résultats de résistance à la polarisation indiquent qu'une concentration de 0,05 g/L est le dosage optimal pour une protection maximale.

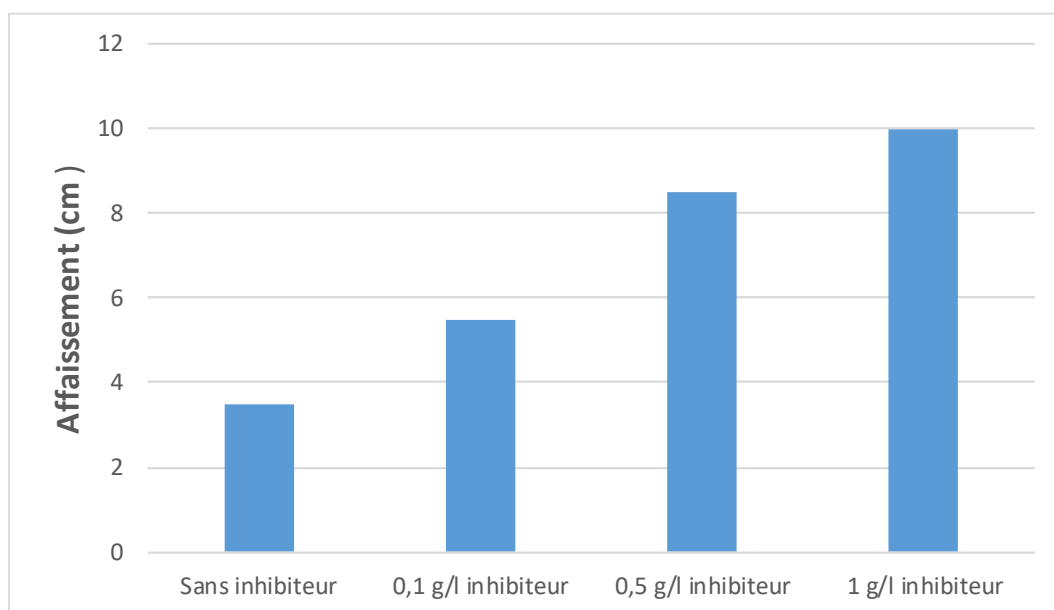
4.3 Effet de l'inhibiteur sur les propriétés du mortier à l'état frais :

4.3.1 Affaissement des mortiers:

Ce travail présente les résultats de l'essai d'affaissement réalisé sur des mortiers formulés avec et sans ajout de l'inhibiteur de corrosion à base d'extrait de fleur de la lavande. L'objectif est d'évaluer son effet à différentes concentrations de 0,1 g/L, 0,5 g/L et 1 g/L sur l'ouvrabilité du mélange.

Tableau 4.2 : Résultats d'affaissement des mortiers avec et sans inhibiteur.

Dosage	H1 (cm)	H2 (cm)	Affaissement (cm)
Sans inhibiteur	15	11,5	3,5
0,1 g/L inhibiteur	15	9,5	5,5
0,5 g/L inhibiteur	15	6,5	8,5
1 g/L inhibiteur	15	5	10

**Figure 4.2 :** Évolution de l'ouvrabilité en fonction de la concentration en inhibiteur.

L'analyse des résultats relatifs à l'affaissement met en évidence une influence significative de l'ajout de l'inhibiteur de corrosion à base d'extrait de fleurs de lavande sur l'ouvrabilité des mortiers étudiés. En l'absence d'inhibiteur, la valeur d'affaissement enregistrée est d'environ 3,5 cm (35 mm), traduisant un mélange relativement peu fluide et peu maniable.

L'introduction progressive de l'extrait de lavande entraîne une augmentation notable de l'affaissement. À une concentration de 0,1 g/L, l'affaissement atteint environ 5,5 cm (55 mm), indiquant une légère amélioration de l'ouvrabilité. Cette tendance devient plus marquée à 0,5 g/L, où la valeur d'affaissement s'élève à environ 8,5 cm (85 mm), ce qui correspond à un mortier plus fluide et présentant une meilleure aptitude à la mise en œuvre. À 1 g/L,

l'affaissement atteint sa valeur maximale d'environ 10 cm (100 mm), traduisant une fluidité élevée du mélange.

Des observations similaires ont été reportées dans les études précédentes portant sur l'extrait de peau d'orange et de grenade (Belarbi, 2024), ceci suggère que les éléments phytochimiques issus de l'extraction de fleurs de lavande ont eu un effet plastifiant montrant une meilleure ouvrabilité du mortier.

4.4 Effet de l'inhibiteur sur les propriétés du mortier à l'état durci :

4.4.1 Pesée hydrostatique :

Cette étude analyse l'influence d'un inhibiteur de corrosion à base d'extrait de lavande, utilisé à différentes concentrations, sur la masse volumique des échantillons à 7 et 28 jours. Elle vise à évaluer l'effet du dosage et de la durée de cure sur la densité du matériau, ainsi qu'à comparer les échantillons avec et sans inhibiteur.

Tableau 4.3 : Résultats de la pesée hydrostatique.

Durée	Dose d'inhibiteur	Msec (g)	Mhumide (g)	ρ (g/cm ³)
7 jours	Sans inhibiteur	473,13	272,2	2,35
	0,1 g/L	464,5	266,7	2,34
	0,5 g/L	456,1	262,3	2,32
	1 g/L	442,4	254,6	2,31
28 jours	Sans inhibiteur	474,13	271,7	2,33
	0,1 g/L	464,2	266,1	2,34
	0,5 g/L	456,2	261,6	2,34
	1 g/L	444	254,7	2,34

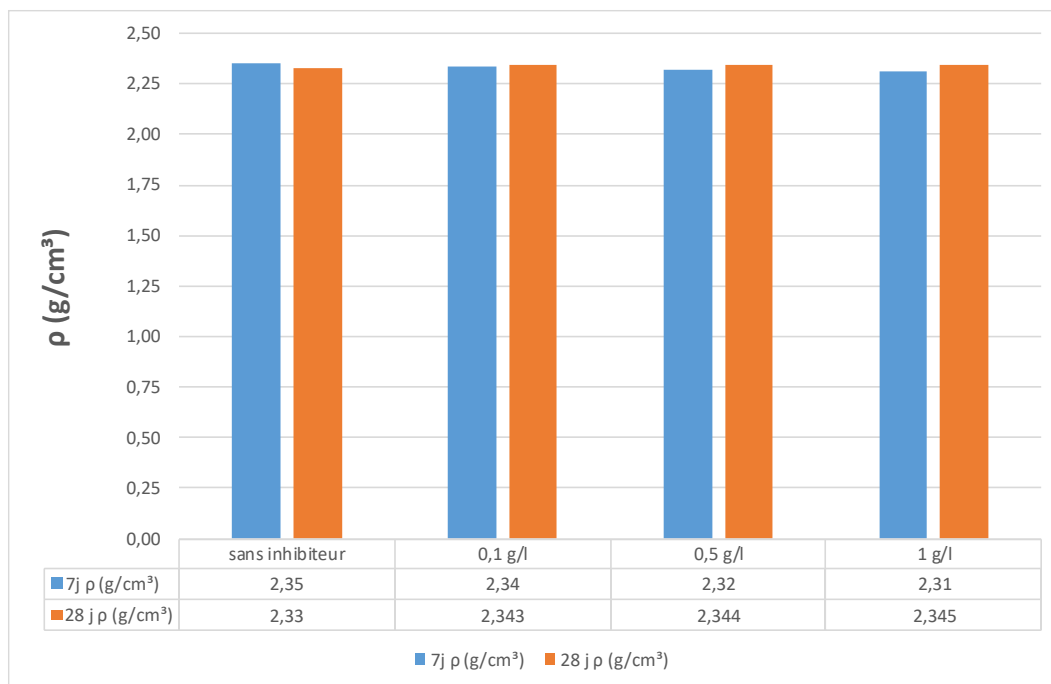


Figure 4.3 : Effet de l'inhibiteur de corrosion à base de lavande sur la masse volumique.

Les résultats de l'essai de pesée hydrostatique montrent que la masse volumique du mortier est stable, avec des valeurs variant entre 2,31 et 2,35 g/cm³. À 7 jours, on remarque une très légère baisse de la masse volumique avec l'ajout de l'inhibiteur. Cependant, après 28 jours, les valeurs augmentent et deviennent même meilleures que celles de l'échantillon témoin. Cela montre que l'extrait fleurs de lavande ne dégrade pas la structure interne du mortier et conserve ses propriétés physiques. Ce résultat est en bon accord avec la littérature (Brixi et al., 2021) (Kooshkaki and Eskandari-Naddaf, 2019).

4.4.2 Résistance à la compression :

La résistance mécanique à la compression des mortiers confectionnés avec différentes concentrations d'extrait de fleurs de lavande, mesurée à 7, 28 et 90 jours de durcissement, a conduit aux résultats présentés dans la figure 4.5 et le tableau 4.4.

Le mortier témoin (blanc) présente une résistance de 23,77 MPa à 7 jours, qui augmente à 36,58 MPa à 28 jours puis atteint 39,65 MPa à 90 jours, traduisant l'hydratation progressive du ciment.

Pour le dosage de 0,1 g/L, une amélioration de la résistance est observée au jeune âge avec 28,77 MPa à 7 jours et 38,61 MPa à 28 jours. Cependant, la résistance reste presque stable à 90 jours (38,68 MPa).

Le dosage de 0,5 g/L présente des valeurs proches de celles obtenues à 0,1 g/L. Les résistances enregistrées sont 28,58 MPa à 7 jours, 37,9 MPa à 28 jours et 38,76 MPa à 90 jours. Cette légère diminution à long terme peut être liée à un effet retardateur partiel de certains composés organiques présents dans l'extrait végétal.

Le dosage de 1 g/L donne les meilleures performances mécaniques avec 31,75 MPa à 7 jours, 42,04 MPa à 28 jours et 48,79 MPa à 90 jours. Cette amélioration importante peut être expliquée par une meilleure densification de la matrice cimentaire et une réduction de la porosité, favorisant ainsi le développement des produits d'hydratation.

L'augmentation de la résistance jusqu'à 90 jours s'explique par la poursuite des réactions d'hydratation du ciment, notamment celles des silicates de calcium (C_3S et C_2S), qui produisent progressivement davantage de gel C-S-H responsable de la résistance mécanique. Dans le cas du ciment CEM II A-P, la présence d'ajouts minéraux pouzzolaniques contribue également aux réactions secondaires avec la portlandite $Ca(OH)_2$, ce qui améliore la compacité de la pâte cimentaire et permet le développement continu des résistances mécaniques à long terme. Cette amélioration du comportement mécanique est dans un accord très élevé avec les résultats de (Junaid Ahmed et al., 2026) qui montrent que les extraits végétaux fonctionnent comme des agents durables qui augmentent la résistance à la compression par la densification de la microstructure.

Tableau 4.4 : Résultats de la résistance à la compression (R_c).

Durée	Dose d'inhibiteur	Échantillon 1	Échantillon 2	Échantillon 3
7 jours	Sans inhibiteur	$R_c=23,77$ MPa	$R_c=17,08$ MPa	$R_c=30,15$ MPa
	0,1 g/L	$R_c=29,64$ MPa	$R_c=28,89$ MPa	$R_c=27,78$ MPa
	0,5 g/L	$R_c=29,83$ MPa	$R_c=28,13$ MPa	$R_c=27,78$ MPa

	1 g/L	Rc=31,06 MPa	Rc=30,82 MPa	Rc=32,60 MPa
28 jours	Sans inhibiteur	Rc=37,76 MPa	Rc=35,34 MPa	Rc=36,65 MPa
	0,1 g/L	Rc=43,55MPa	Rc=35,43 MPa	Rc=36,84MPa
	0,5 g/L	Rc=37,60 MPa	Rc=35,81 MPa	Rc=40,30MPa
	1 g/L	Rc=41,06 MPa	Rc=42,08 MPa	Rc=42,97MPa
90 jours	Sans inhibiteur	Rc=39,88 MPa	Rc=35,80MPa	Rc=43,29MPa
	0,1 g/L	Rc=43,05MPa	Rc=39,28MPa	Rc=37,73MPa
	0,5g/L	Rc=37,40MPa	Rc=32,38MPa	Rc=46,51MPa
	1g/L	Rc=47,91MPa	Rc=48,18MPa	Rc=50,30MPa

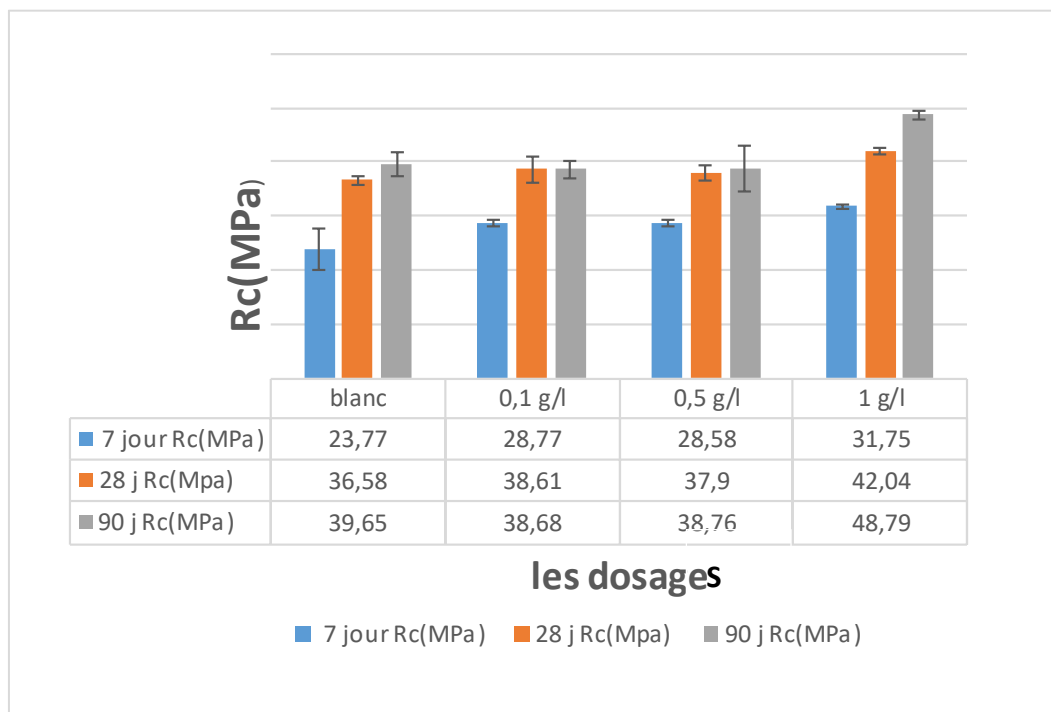


Figure 4.4 : Résistance à la compression des mortiers utilisés avec et sans l'extrait de fleurs la lavande.

4.5 Conclusion :

Les résultats obtenus dans ce chapitre sont présentés comme suit :

- Les essais électrochimiques ont montré qu’une concentration de 0,05 g/L en extrait de fleurs de lavande au contact de l’acier immergé dans une SSPB en présence de 0,05M de NaCl permet de stabiliser son potentiel de corrosion et d’augmenter significativement sa résistance à la polarisation ; ce qui correspond à la formation d’un film protecteur sur sa surface.
- En revanche, des concentrations plus élevées provoquent une instabilité électrochimique et engendrent une chute de l’efficacité inhibitrice.
- L’extrait de fleurs de lavande améliore l’ouvrabilité des mortiers, avec un affaissement atteignant 10 cm à 1 g/L.
- À l’état durci, la présence de l’extrait des fleurs de lavande a amélioré la résistance à la compression des mortiers, avec une résistance maximale de 48,79 MPa à 90 jours pour la concentration de 1 g/L.
- L’effet de cet inhibiteur à l’état frais a permis une meilleure hydratation du ciment offrant ainsi une microstructure plus dense. La pesée hydrostatique montre que la masse volumique a augmenté à 28 jours, passant de 2,333 g/cm³ sans inhibiteur à 2,345 g/cm³ avec 1 g/L l’extrait de fleurs de lavande, ce qui prouve que le mélange est devenu plus solide et moins poreux.
- Enfin, l’extrait de fleurs de lavande, apparaît comme une alternative conjuguant écologie et efficacité pour la protection des armatures en milieu contaminé par les chlorures, tout en améliorant la résistance mécanique des matériaux cimentaires étudiés.

Conclusion générale :

L'analyse bibliographique met en évidence que les composés organiques naturels extraits des plantes constituent des inhibiteurs efficaces de la corrosion des aciers en milieu alcalin en présence de chlorures. Néanmoins, la majorité des travaux réalisés jusqu'à présent s'intéresse essentiellement à des plantes à usage noble ou à forte valeur économique, tandis que l'utilisation de sources végétales alternatives pour la protection contre la corrosion en milieux alcalins chargés en chlorures reste encore peu explorée.

Suite à la sélection d'un procédé d'extraction fondé sur les données de la littérature, une démarche expérimentale a été adoptée afin d'étudier l'efficacité inhibitrice des fleurs de lavande dans un environnement alcalin représentatif des conditions des pores du béton ou du mortier.

L'étude a été réalisée à l'aide de méthodes électrochimiques, notamment la mesure du potentiel à circuit ouvert (PCO) ainsi que la résistance de polarisation (R_p). En complément, des essais physiques et mécaniques ont été effectués, afin d'évaluer l'influence de l'extrait sur les propriétés du matériau.

- Les essais électrochimiques montrent que l'extrait de fleurs de lavande (*Lavandula*) est un inhibiteur très efficace dans un milieu alcalin simulant les pores du béton contenant 0,05M de NaCl. Les résultats de la résistance de polarisation (R_p) indiquent une efficacité de 95,79 %, ce qui confirme sa bonne protection contre la corrosion dans ces conditions.
- La concentration optimale de l'extrait de lavande pour assurer une protection maximale contre la corrosion est de 0,05 g/L, pour laquelle l'efficacité inhibitrice est maximale.
- L'analyse bibliographique met en évidence que les composés organiques naturels extraits des plantes constituent des inhibiteurs efficaces de la corrosion des aciers en milieu alcalin en présence de chlorures. Néanmoins, la majorité des travaux réalisés jusqu'à présent s'intéresse essentiellement à des plantes à usage noble ou à forte valeur économique, tandis que l'utilisation de sources végétales alternatives pour la protection contre la corrosion dans des milieux alcalins chargés en chlorures reste encore peu explorée.

- L'ajout de l'inhibiteur de corrosion à base de lavande augmente clairement l'affaissement du mortier, passant de 3,5 cm sans inhibiteur à environ 10 cm avec 1 g/L. Cela montre que la lavande améliore la maniabilité du mélange frais en le rendant plus fluide et plus facile à mettre en œuvre.

Dans la continuité de ce travail, plusieurs perspectives de recherche peuvent être envisagées afin d'améliorer et d'optimiser les performances des inhibiteurs naturels, notamment à base d'extrait de fleurs de lavande, dans la protection contre la corrosion des armatures dans le béton nous pouvons citer :

- Influence sur le temps de prise : analyser si la lavande retarde ou accélère les temps de prise du ciment, ce qui est important pour l'exécution sur chantier.
- Effectuer des essais électrochimiques sur des échantillons d'acier noyés dans des mortiers et/ou bétons, formulés avec des extraits de fleurs de lavande afin d'évaluer leurs efficacités dans des conditions réelles.
- Evaluer les paramètres de durabilité à savoir la porosité accessible à l'eau, le coefficient de diffusion des chlorures, la perméabilité au gaz et la carbonatation du béton formulé avec des extraits de fleurs de lavande.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

AFNOR, 2022. *NF EN 206+A2/CN : Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206*. Saint-Denis : AFNOR Éditions.

Barnes, R., 2006. *Corrosion of Steel in Concrete: Investigation and Repair*. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons.

Batirama, 2009. Bien commander un béton prêt-à-l'emploi [en ligne]. *Batirama*. Disponible sur : <https://www.batirama.com/article/979-bien-commander-un-beton-pret-a-l-emploi.html> [Consulté le 27 février 2026].

Belarbi, M.H., 2024. *Effet des inhibiteurs verts de la région de Tlemcen sur la durabilité des matériaux cimentaires utilisés dans les ouvrages d'art soumis aux milieux marins*. Mémoire de Master. Tlemcen : Université de Tlemcen.

Brazillier, D., Cussigh, F. et Escadeillas, G., 2023. *Approche performantielle de la durabilité des ouvrages en béton: de la qualification en laboratoire au suivi d'exécution*. Paris : Éditions Eyrolles.

Brixi, N.K., 2022. *Les inhibiteurs de corrosion verts appliqués aux ouvrages en béton armé soumis au milieu marin agressif*. Thèse de doctorat. Tlemcen : Université de Tlemcen.

Brixi, N.K., Sail, L. et Bezzar, A., 2021. Application of ascorbic acid as green corrosion inhibitor of reinforced steel in concrete pore solutions contaminated with chlorides. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 36(11), pp. 1-15. Disponible sur : <https://doi.org/10.1080/01694243.2021.1962090> [Consulté le 16 juin 2026].

Cerema, 2024. *Etat des ponts communaux en France* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.cerema.fr/fr/presse/document/etat-ponts-communaux-france-0> [Consulté le 10 mars 2026].

Chryso Canada, 2021. *DCI® Works* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.chryso.ca/blog/how-dci-works-tb-0909/> [Consulté le 10 avril 2026].

Dizaj, E.A., Padgett, J.E. et Kashani, M.M., 2021. A Markov chain-based model for structural vulnerability assessment of corrosion-damaged reinforced concrete bridges. *Figshare* [en ligne]. Disponible sur : <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.5365223.v1> [Consulté le 10 mars 2026].

Flores-Nicolás, A., Flores-Nicolás, M. et Uruchurtu-Chavarín, J., 2021. Corrosion effect on reinforced concrete with the addition of graphite powder and its evaluation on physical-electrochemical properties. *Revista ALCONPAT*, 11, pp. 18–33.

Harouat, A., 2024. *Utilisation de l'extrait de peau de grenade de la région de Tlemcen comme inhibiteur de corrosion dans les bétons soumis au milieu marin agressif*. Thèse de doctorat. Tlemcen : Université de Tlemcen.

Harouat, A., Bezzar, A. et Sail, L., 2024. Pomegranate peel extract as a sustainable corrosion inhibitor on steel in a simulated concrete pore solution and mortar: Experimental and theoretical studies. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 28, pp. 684–717.

Hassoune, M., 2018. *Amorçage de la corrosion des armatures dans le béton exposé au milieu marin : prédiction et prévention par inhibition*. Thèse de doctorat. Tlemcen : Université de Tlemcen.

Héral, B., 2021. *Approche métabolomique pour l'étude du dépérissement de la lavande : application aux composés non-volatils*. Thèse de doctorat. Nice : Université Côte d'Azur.

Holcim, 2015. *Guide pratique du béton : concevoir et mettre en œuvre des bétons durables* [en ligne]. Disponible sur : https://www.holcim.be/sites/belgium/files/documents/guide_pratique-fr.pdf [Consulté le 12 mars 2026].

Hou, B., Li, X., Du, C., Zhang, D., Zheng, M., Xu, W., Lu, D. et Ma, F., 2017. The cost of corrosion in China. *npj Materials Degradation* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.nature.com/articles/s41529-017-0005-2> [Consulté le 07 mars 2026].

Junaid Ahmed, E.S. et Mohan Ganesh, G., 2026. Neem leaf extract as a sustainable green inhibitor for corrosion inhibition in RCC and strength improvement in concrete, in conjunction with spectroscopic characterization and statistical evaluation. *Results in Surfaces and Interfaces*, 23, 100771.

Kooshkaki, A. et Eskandari-Naddaf, H., 2019. Effect of porosity on predicting compressive and flexural strength of cement mortar containing micro and nano-silica by multi-objective ANN modeling. *Construction and Building Materials*, 212, pp. 176–191.

LE PARISIEN, 2018. Pont effondré à Gênes : le bilan s'alourdit à 43 morts [en ligne]. *Le Parisien*. Disponible sur : <https://www.leparisien.fr/faits-divers/genes-le-corps-d-une-42e-victime-decouvert-apres-l-effondrement-du-pont-morandi-18-08-2018-7856646.php> [Consulté le 05 mars 2026].

Lee, S.H., An, L.S. et Kim, H.K., 2025. Risk-based bridge life cycle cost and environmental impact assessment considering climate change effects. *Scientific Reports*, 15, 725.

Liu, C., Liu, Y., Xia, Z., Wang, Z. et Wu, B., 2023. Coconut coir dust extract as a novel green corrosion inhibitor for carbon steel in the chloride-contaminated concrete pore solution. *Journal of Building Engineering*, 82, 108194.

Masri, N., 2019. *Effet des inhibiteurs verts sur les propriétés des matériaux cimentaires utilisés dans les ouvrages d'art soumis aux milieux marins*. Mémoire de Master. Tlemcen : Université de Tlemcen.

Mediachimie, 2022. *Zoom sur quelques aspects de la corrosion des ouvrages d'art* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.mediachimie.org/ressource/zoom-sur-quelques-aspects-de-la-corrosion-des-ouvrages-d-art> [Consulté le 10 mars 2026].

Millard, S.G., Law, D., Bungey, J.H. et Cairns, J., 2001. Environmental influences on linear polarisation corrosion rate measurement in reinforced concrete. *NDT & E International*, 34, pp. 409–417.

NACE International, 2002. *Corrosion Cost and Preventive Strategies in the United States* [en ligne]. Disponible sur : <https://rosap.ntl.bts.gov> [Consulté le 16 avril 2026].

Naderi, R., Bautista, A., Shagñay, S. et Velasco, F., 2024. Licorice (*Glycyrrhiza glabra*) as corrosion inhibitor of carbon steel reinforcing bars in mortar and its synergic effect with nitrite. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 129, pp. 620–633.

Naderi, R., Bautista, A., Velasco, F., Soleimani, M. et Pourfath, M., 2022. Green corrosion inhibition for carbon steel reinforcement in chloride-polluted simulated concrete pore solution using *Urtica Dioica* extract. *Journal of Building Engineering*, 58, 105055.

Nasser, A., 2010. *La corrosion des aciers dans le béton à l'état passif et par carbonatation : Prise en compte des courants galvaniques et des défauts d'interface acier - béton*. Thèse de doctorat. Toulouse : Université de Toulouse.

Pan, C., Chen, N., He, J., Liu, S., Chen, K., Wang, P. et Xu, P., 2020. Effects of corrosion inhibitor and functional components on the electrochemical and mechanical properties of concrete subject to chloride environment. *Construction and Building Materials*, 260, 119724.

Pepenaar, I., 2015. Long-term corrosion behavior of concrete structures in chloride-based industrial environments: Case studies. *Procedia International Structural Engineering & Construction*, Conference (ISEC-8). Sydney, Australie, 23-28 novembre 2015. Fargo: ISEC Press, pp. 883-888. doi: 10.14455/ISEC.res.2015.151.

Pradipta, I., Kong, D. et Tan, J.B.L., 2019. Natural organic antioxidants from green tea form a protective layer to inhibit corrosion of steel reinforcing bars embedded in mortar. *Construction and Building Materials*, 221, pp. 351–362.

Préfecture d'Aomori, 2018. *La maintenance des ponts optimisée par le système de gestion des ressources* [en ligne]. Disponible sur : <http://www.pref.aomori.lg.jp/soshiki/kendo/doro/kyouryou-asset.html> [Consulté le 05 mars 2026].

Sail, L., Ghomari, F., Khelidj, A., Bezzar, A. and Benali, O., 2013. La perte de masse dans l'inhibition de la corrosion d'un acier. *Lebanese Science Journal*, 14(1), pp.87-106.

Song, Z., Donkor, S., Zhang, Y., Liu, Q., Liu, Y., Na, X., Cai, H. et Kwesi Odoom, J., 2023. Adsorption and corrosion inhibition performance of rice bran extract on carbon steel in aqueous chloride solution: Experimental, computational and theoretical studies. *Construction and Building Materials*, 363, 129801.