RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université echahid cheikh Larbi Tebessi

Faculté des sciences exactes et des sciences de la nature et de la vie

Département des sciences de la matière

Thèse de doctorat en sciences

Filière: Chimie

Option : Chimie organique

Thème

Valorisation pluridisciplinaire de plante appartenant à la flore locale : extraction, analyses physico-chimiques, activités biologiques et étude électrochimique

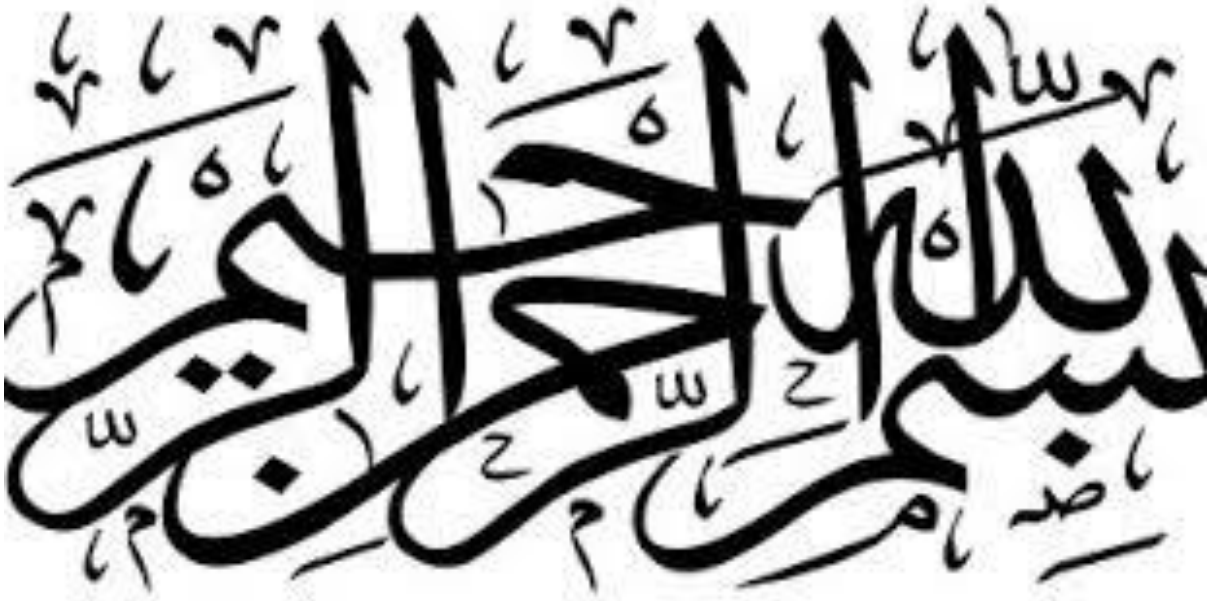
Présentée par

Mme Haouam Chahrazed

Devant le jury composé de :

HARKATI	Brahim	Professeur	Université de Tébessa	Président
BOUDIBA	Sameh	Professeur	Université de Tébessa	Ancadrante
NGENGE TAMFU	Alfred	Docteur	Université de Ngaoundere, Cameroon	Co-encadrant
DAROUI-MOKADDEM	Habiba	MCA	Université Badji Mokhtar, Annaba	Examinatrice
SAOULI	Ibtissam	MCA	Université Badji Mokhtar, Annaba	Examinatrice
DJELLAB	Siham	MCA	Université de Tébessa	Examinatrice
DOUIB	Haiet	MCA	Université de Tébessa	Invitée

Soutenue le : 22 /11 /2025


بسم الله الرحمن الرحيم

DÉDICACES

Je dédie ce travail :

À mes chers parents, ceux qui m'ont encouragé à atteindre le meilleur malgré la difficulté des défis,

À mon époux, Bader-Eddine, à qui revient tout le mérite d'avoir collecté la plante à étudier.

À mes frères : Ismaël, Yahia et Mohammed.

À mes sœurs : Mounira, Ismahene, Fatma et Ibtisam.

À mes trois enfants : Abbes, Rihab et Ritège.

À toute ma famille et ma belle-famille.

À tous mes collègues : enseignants et enseignantes.

Remerciement

Je tiens à exprimer toute ma gratitude envers ***Dieu****, le Tout-Puissant, qui nous a accordé la patience et la force nécessaires pour poursuivre notre chemin vers le succès.*

Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements au ***Professeur BOUDIBA Sameh*** *de l'****Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi, Tébessa****, l'encadrante de ma thèse. Je lui suis profondément reconnaissante pour son encadrement avisé, ses conseils précieux et ses encouragements constants, même face aux difficultés rencontrées. Je la remercie pour sa détermination inébranlable et sa volonté de nous accompagner sans relâche tout au long de ce parcours.*

Cette thèse a été co-encadrée initialement par le ***Professeur BOUDIBA Louiza****, à qui je tiens à exprimer ici mes sincères remerciements et ma profonde gratitude pour son aide et ses encouragements constants. Elle m'a transmis l'amour et la passion pour la recherche. Par la suite, afin de promouvoir les collaborations internationales, le travail a été co-encadré et finalisé par le* ***Docteur NGENGE TAMFU Alfred****.*

Ma profonde gratitude va au ***Docteur Alfred NGENGE TAMFU*** *de l'****École de génie chimique de génie minéral et structurel, Université de Ngondar, Cameron****, mon co-encadrant de thèse, dont les pensées, les écrits et les expertises ont été une source d'inspiration et d'apprentissage pour moi.*

Je tiens avant tout à exprimer ma gratitude aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à nos travaux de recherche en acceptant d'examiner cette thèse et de l'enrichir par leurs remarques et commentaires constructifs.

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements au ***Professeur HARKATI Brahim*** *de l'****Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi, Tébessa****, pour avoir accepté de présider le jury de ma thèse. Son expertise et ses commentaires ont été précieux pour l'examen de mon travail.*

Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à ***Docteur DAROUI-MOKADDEM Habiba*** *de l'****Université Badji Mokhtar, Annaba****, pour avoir accepté d'examiner ma thèse. Son évaluation et ses commentaires ont été précieux pour le perfectionnement de mon travail.*

Je souhaite également exprimer ma gratitude à ***Docteur Ibtissam SAOULI*** *de l'****Université Badji Mokhtar, Annaba****, pour l'intérêt qu'elle a porté à mes travaux de recherche en acceptant*
d'examiner ma thèse de doctorat et de l'enrichir par ses remarques et commentaires constructifs.

Je suis honorée de la présence de ***Docteur Siham DJELAB****, de* ***l'Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi, Tébessa,*** *pour l'intérêt qu'elle a porté aux discussions et aux débats sur mon travail. Sa participation a été précieuse et a contribué significativement à l'enrichissement de mes recherches.*

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements au ***Docteur Haiat DOUIB,*** *de l'****Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi, Tébessa****, pour avoir accepté d'assister à la soutenance de cette thèse en tant qu'invitée.*

Enfin, je souhaite exprimer ma gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail de thèse. Leurs soutiens inconditionnels et leurs expertises ont été des éléments essentiels de ma réussite.

A tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

ملخص

نظرًا للمجموعة واسعة النطاق من التطبيقات البيولوجية وغيرها، مثل تعزيز جهاز المناعة للكائنات الحية أو حماية البيئة، تتمحورأعمال هذه الأطروحة بشكل أساسي حول تقييم بعض الأنشطة البيولوجية لمستخلصات البوليفينول ل: الخياطة او المرتقئة (*Sanguisorba minor* L.) مثل الاستشعار بالنصاب(Quorum sensing) ، مما قد يساهم في تقليل الاعتماد على المضادات الحيوية وتعزيز تطوير الأساليب العلاجية المستدامة. سمحت التحليلات التي تم إجراؤها بواسطة كاشف مجموعة الصمامات الثنائية (DAD) باستخدام الكروماتوغرافيا السائلة عالية الأداء (HPLC، HPLC-DAD) بتحديد كمية الثلاثة عشر مركب فينولي الموجودة في مستخلص خلات الإيثيل (EAE)، تسعة في مستخلص ثنائي كلورو الميثان (EDCM)، سبعة في المستخلص المائي (EAQ) وأربعة في مستخلص البوتانول (EB). أظهرت مستخلصات AE وDCM نشاطًا قويًا مضادًا للأكسدة، متجاوزًا نشاط المراجع (BHA وα-tocophérol) في اختبارات DPPH وCUPRAC وABTS. في اختبار ABTS، أظهر مستخلص اسيتات الايثيل EAE (IC50 = 9.27 ± 0.33 µg/mL) نشاطًا أعلى مقارنة بألفا-توكوفيرول (IC50 = 35.50 ± 0.55 µg/mL) و (IC50 = BHA (12.70 ± 0.10 µg/mL وهذه الخصائص الملفتة تسلط الضوء على استعمالات واعدة ومحتملة لهذه النبتة كمادة حافظة للطعام. عند تركيز 200 ميكروجرام/مل، أظهرت جميع المستخلصات نشاطاً قوياً في تثبيط الإنزيمات، مما يشير إلى قدرتها المحتملة على على إبطاء تدهور الأعصاب وارتفاع مستوى الجلوكوز في الدم. بالإضافة إلى ذلك، أضهرت قيم التثبيط الأدنى للتركيز (CMI) التي تتراوح بين 0.312 ميكروجرام/مل و1.25 ميكروجرام/مل، لجميع المستخلصات تثبيطًا جيدًا للأغشية الحيوية ضد المكورات العنقودية الذهبية (*Staphylococcus aureus*) والإشريكية القولونية (*Escherichia coli*). علاوة على ذلك، فإن هذه المستخلصات أثبتت أيضًا تثبيطًا قويًا لتكوين الفيولاسين في كروموباكتيريوم فيولاسيوم CV12472 وCV026. نظرا للنشاط المضاد للأكسدة المميزللمستخلصات المدروسة، من المهم اختبار هذه المستخلصات كإضافات خلال تغليف الفولاذ المزدوج (E24-2) بالزنك بواسطة التحليل الكهربائي، لحمايته ضد التآكل في ماء البحر. تم إستخدام ثلاث طرق كيميائية وكهروكيميائية (الاستقطاب الديناميكي، التحليل الطيفي للمقاومة الكهروكيميائية (EIS) وقياس النقصان في الوزن) وقد أضهرت فعالية تثبيطية للتآكل بنسبة 97,59٪. تم تحليل جودة التغطية بمساعدة المجهر البصري المستقطب. توضح المسامية والالتصاق أن التغطية كانت كثيفة ومتجانسة في وجود مختلف المستخلصات المدروسة والمستخدمة كإضافات بتركيز محدد. من ناحية أخرى، فإن إضافة الستخلص البوتانولي يسمح لك بملاحظة لمعان ملحوظ لهذه الطبقة.

الكلمات المفتاحية

Sanguisorba minor L. ؛ HPLC-DAD ؛ النشاط المضاد للأكسدة ؛ كشف إستشعار النصاب ؛ مكافحة العناقيد الحيوية ؛ النشاط الإنزيمي ؛ الترسيب الكهربائي ؛ إضافات ؛ تثبيط التآكل.

Given the wide range of biological applications and other uses, including bolstering the immune system of living organisms and the environment preservation, the primordial focus of this thesis was to assess the effectiveness of polyphenolic extracts from *Sanguisorba minor* L. (S. minor) in biological activities as quorum sensing. This research could potentially reduce reliance on antibiotics and promote more sustainable treatment methods. The analyses carried out by HPLC-DAD quantified thirteen phenolic compounds in the ethyl acetate extract (EAE), nine in the dichloromethane extract (DCME), seven in the aqueous extract (AQE), and four in the butanolic extract (BE). It is important to highlight that EA and DCM extracts showed strong antioxidant activity, exceeding the standards (BHA and α-tocopherol) in DPPH, CUPRAC, and ABTS tests. In the ABTS test, EAE (IC50 = 9.27 ± 0.33 µg/mL) was more active than α-tocopherol (IC50 = 35.50 ± 0.55 µg/mL) and BHA (IC50 = 12.70 ± 0.10 µg/mL), suggesting the potential application of S. minor as a food preservative. At 200 µg/mL concentration, all extracts exhibited potent enzyme inhibitory activity, suggesting their potential ability to slow neurodegeneration and hyperglycemia. Furthermore, at minimum inhibitory concentration (MIC) values ranging from 0.312 mg/mL to 1.25 mg/mL, all the fractions exhibited good biofilm inhibition against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*. In addition, these extracts also showed strong inhibition of violacein formation in *Chromobacterium violaceum* CV12472 and CV026. Due to their exceptional antioxidant properties, evaluating these extracts as additives in the Zn electrodeposition coating of mild steel (E24-2) is important to protect it from seawater corrosion. Three types of chemical and electrochemical methods (potentiodynamic polarization, electrochemical impedance spectroscopy (EIS), and weight loss measurement) highlighted an inhibitory efficiency of 97.59%. The quality of the coating was analyzed using polarizing optical microscopy. The calculated porosity and tested adhesion demonstrated that the coating was dense and homogeneous in the presence of the different investigated extracts at a specific concentration. Furthermore, the addition of BE allowed to note the remarkable brilliance of this layer.

Keywords

Sanguisorba minor L.; HPLC-DAD; antioxidant activity; quorum detection; antibiofilm; enzymatic activity; corrosion inhibition.

RÉSUMÉ

En raison du vaste éventail d'applications biologiques et autres, telles que le renforcement du système immunitaire des organismes vivants ou la protection de l'environnement, les travaux de cette thèse ont principalement visé l'évaluation des extraits polyphénoliques de *Sanguisorba minor* L. (S. minor) dans des activités biologiques telles que la lutte contre le quorum sensing, ce qui pourrait contribuer à réduire la dépendance aux antibiotiques et à promouvoir des méthodes de traitement plus durables. Les analyses réalisées par HPLC-DAD ont permis de quantifier treize composés phénoliques dans l'extrait d'acétate d'éthyle (EAE), neuf dans l'extrait de dichlorométhane (EDCM), sept dans l'extrait aqueux (EAQ) et quatre dans l'extrait butanolique (EB). Il est important de souligner que les extraits d'EA et de DCM ont montré une forte activité antioxydante, dépassant les standards (BHA et α-tocophérol) dans les tests DPPH, CUPRAC et ABTS. Dans le test ABTS, l'EAE (IC50 = 9,27 ± 0,33 μg/mL) a été plus actif que l'α-tocophérol (IC50 = 35,50 ± 0,55 μg/mL) et le BHA (IC50 = 12,70 ± 0,10 μg/mL), suggérant l'application potentielle de S. minor en tant que conservateur alimentaire. À une concentration de 200 μg/mL, tous les extraits ont présenté une puissante activité inhibitrice des enzymes, suggérant leur capacité potentielle à ralentir la neurodégénérescence et l'hyperglycémie. Par ailleurs, à des valeurs de concentration minimale inhibitrice (CMI) variant de 0,312 mg/mL à 1,25 mg/mL, toutes les fractions ont présenté une bonne inhibition du biofilm contre le *Staphylococcus aureus* et l'*Escherichia coli*. De plus, ces extraits ont également montré une forte inhibition de la formation de violaceine chez les *Chromobacterium violaceum* CV12472 et CV026.

En tenant compte de la remarquable activité antioxydante, il est crucial de tester ces extraits en tant qu'additifs dans le revêtement de l'acier doux (E24-2) par électrodéposition de Zn, afin de le protéger contre la corrosion dans l'eau de mer. Les mesures chimiques et électrochimiques effectuées par trois méthodes (la polarisation potentiodynamique, la spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS) et la mesure de perte en poids) soulignaient une efficacité inhibitrice de 97,59 %. La qualité du revêtement a été analysée à l'aide de la microscopie optique polarisante. La porosité calculée et l'adhérence testée ont démontré que le revêtement était dense et homogène en présence des différents extraits investigués à une concentration spécifique. Par ailleurs, l'ajout de l'EB a permis de noter une brillance remarquable de cette couche.

Mots-clés

Sanguisorba minor L. ; HPLC-DAD ; activité antioxydante ; détection du quorum ; antibiofilm ; activité enzymatique ; électrodéposition ; additifs ; inhibition de la corrosion.

TABLE DE MATIÈRES

DÉDICACES	
REMERCIEMENTS	
ملخص	
ABSTRACT	
RÉSUMÉ	
TABLE DE MATIÈRES	
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES	
LISTE DE FIGURES	
LISTE DE SCHÉMAS	
LISTE DES TABLEAUX	
INTRODUCTION GÉNÉRAL	**1**
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	**5**
Chapitre I : Synthèse Bibliographique	**7**
I. Généralité sur la plante investiguée	**7**
I. 1. Aspect botanique et répartition géographique de la famille des Rosacées	**7**
I. 2. Genre Sanguisorba	**8**
I. 3. *Sanguisorba minor* L.	**9**
I. 4. Utilisations traditionnelles de *Sanguisorba minor* L.	**9**
I. 5. Activités pharmacologiques de *Sanguisorba minor* L.	**10**
II. Activité antioxydante	**11**
II.1. Définition d'activité antioxydant	**11**
II. 2. Radical libre	**12**
II. 3. Dommages biochimiques	**12**
II.3. 1. Dommages oxydatifs des protéines	**12**
II. 3. 2. Dommages oxydatifs sur l'ADN	**13**
II. 3. 3. Oxydation des lipides	**13**
II. 3. 4. Antioxydants	**14**
II. 3. 5. Méthodes d'évaluation de l'activité antioxydante	**14**
II. 3. 5. 1. Méthode de DPPH	**15**
II. 3. 5. 2. Mesure de l'activité antioxydante par le test ABTS	**15**
II. 3. 5. 3. Essai du β-carotène	**16**
II. 3. 5. 4. Réduction ferreuse (FRAP)	**16**
II. 3. 5. 5. Méthode H_2O_2	**17**
II. 2. 5. 6. Méthodes CUPRAC	**17**
II. 2. 5. 7. Activité chélatrice du fer	**17**
III. Activité anti-enzymatiques	**18**

III. 1. Maladie Alzheimer et l'activité anticholinesteraze	**18**
III. 1.1. Définition de la maladie Alzheimer	**18**
III. 1.2. Principales causes de l'Alzheimer	**19**
III.1. 2.1. Formation des plaques amyloïdes	**19**
III. 1. 2. 2. Dégénérescence neuro-fibrillaire	**20**
III. 1. 3. Inhibition de l'AChE et BChE par les substances naturelles	**20**
III. 1. 4. Inhibition de l'AChE et BChE par les composés phénoliques	**21**
III. 5. Activité antidiabétique	**22**
III. 5. 1. Définition de diabète	**22**
III. 5. 2. Mécanisme d'inhibition de l'alpha amylase et alpha glucosidase	**23**
III. 5. 3. Inhibition de l'α-glucosidase et l'α-amylase par les composés bioactives	**24**
IV. Activité antibactérienne	**24**
IV. 1. Biofilm bactérien	**24**
IV. 1. 1. Formation des biofilms	**25**
IV. 1. 2. Résistance des biofilms	**27**
IV. 1. 3. Inhibition des polyphénols contre les biofilms	**27**
IV. 2. Activité anti-quorum-sensing (quorum quenching)	**28**
IV. 2. 1. Définition de quorum sensing	**28**
IV. 2. 2. Molécules impliquées dans quorum sensing	**28**
IV. 2. 3. Mécanisme de QS chez gram positif	**28**
IV. 2. 4. Mécanisme de quorum sensing chez le gram négatif	**29**
IV. 2. 5. Activité du QQ	**30**
IV. 2. 6. Inhibition de la production de violacéine chez *C. violaceum* CV12472	**31**
IV. 2. 7. Inhibition de la motilité par essaimage sur *P. aeruginosa* PA01	**31**
V. Corrosion : causes, conséquences et stratégies de prévention	**32**
V. 1. Définition	**32**
V. 2. Types de corrosion	**33**
V. 2. 1. Corrosion uniforme	**33**
V. 2. 2. Corrosion localisée	**34**
V. 2. 3. Corrosion par piqûre	**34**
V. 2. 4. Corrosion galvanique	**35**
V. 2. 5. Corrosion caverneuse	**36**
V. 2. 6. Corrosion inter-granulaire (CIG)	**37**
V. 2. 7. Corrosion sélective	**37**
V. 2. 8. Corrosion sous contrainte	**38**
V. 2. 9. Facteurs de corrosion	**39**
V. 2. 10. Corrosion des aciers en milieu maritime	**39**
V. 3. Prévention de la corrosion	**39**
V. 4. Électrodéposition	**40**
V. 4. 1. Fonctionnement	**40**
V. 4. 2. Cinétique	**41**
V. 4. 2. 1. Nucléation	**41**

V. 4. 2. 2. Croissance	**42**
V. 4. 2. 3. Impact des additives	**42**
V. 4. 3. Principes fondamentaux de la réaction de galvanoplastie	**42**
V. 4. 4. Variétés de revêtements disponibles	**43**
V. 4. 4. 1. Protecteurs	**43**
V. 4. 4. 2. Décorative	**44**
V. 4. 5. Facteurs dominant l'électrodéposition	**44**
V. 4. 5. 1. Concentration	**44**
V. 4. 5. 2. Densité du courant	**44**
V. 4. 5. 3. Éléments constitutifs du bain électrolytique	**44**
V. 4. 5. 4. Température	**45**
V. 4. 5. 5. pH du bain	**45**
V. 4. 5. 6. Additifs	**45**
V. 4. 5. 6. 1. Additifs écologiques d'origine végétale	**46**
V. 4. 5. 6. 2. Catégorisation des additifs	**46**
a) Niveleurs	**46**
b) Azurant et mouillant	**46**
c) Polisseur-lustrant	**47**
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	**48**
Chapitre II : Matériels et méthodes	**59**
1re partie : Étude de l'activité biologique	**59**
II. 1. Matière végétale	**59**
II. 2. Screening phytochimique	**59**
II. 2. 1. Macération à l'eau distillée	**59**
II. 2. 1. 1. Recherche des saponosides	**59**
II. 2. 1. 2. Recherche d'amidons	**59**
II. 2. 1. 3. Recherche des tanins galliques	**59**
II. 2. 1. 4. Recherche des anthocyanes	**60**
II. 2. 2. Macération à l'éthanol	**60**
II. 2. 2. 1. Recherche des flavonoïdes	**60**
II. 2. 2. 2. Recherche des tanins catéchiques	**60**
II. 2. 2. 3. Recherche des composés réducteurs	**60**
II. 2. 2. 4. Recherche des coumarines	**60**
II. 2. 2. 5. Recherche des stérols et des tri terpènes	**60**
II. 2. 2. 6. Recherche d'hétérosides	**61**
II. 2. 3. Recherche des alcaloïdes	**61**
II. 3. Méthode d'extraction des polyphénols	**61**
II. 4. Analyse des extraits phénoliques par HPLC-DAD	**62**
II. 5. Méthodes d'évaluation de l'activité antioxydante	**63**
II. 5. 1. FRAP (Ferric reducing antioxidant power)	**63**
II. 5. 2. Piégeage du radical libre DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazil)	**64**

II. 5. 3. Test de blanchissement du β-carotène	**64**
II. 5. 4. Test ABTS	**65**
A) Préparation de deux solutions mères 1 et 2	**65**
B) Préparation de la solution ABTS	**65**
C) Protocole de test ABTS	**65**
II. 5. 5. CUPRAC	**66**
II. 5. 6. Processus de piégeage du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2)	**66**
II. 5. 7. Test de chélation du fer ferreux	**66**
II. 6. Dosages des extraits polyphénoliques	**67**
II. 6. 1. Teneur totale en phénols et flavonoïdes	**67**
II. 6. 2. Dosage des tanins condensés	**67**
II. 6. 3. Détermination des anthocyanes totaux	**68**
II. 7. Activité quorum quenching	**68**
II. 8. Méthode d'inhibition de la violacéine utilisant *C. violaceum* CV12472	**68**
II. 9. Inhibition de la motilité par essaimage de *P. aeruginosa* PA01	**69**
II. 10. Test d'activité antibiofilm	**69**
II. 11. Activité enzymatique	**69**
II. 11. 1. Test d'inhibition de l'alpha-amylase	**69**
II. 11. 2. Test d'inhibition de l'α-glucosidase	**70**
II. 11. 3. Activité anti-cholinestérase	**70**
2^{me} Partie : Étude de l'activité anticorrosive par revêtement métallique	**70**
II. 12. Réalisation du revêtement	**71**
II. 12. 1. Plaque de zinc	**71**
II. 12. 2. Milieu corrosif	**71**
II. 12. 3. Montage expérimental pour réaliser l'électrodéposition	**72**
II. 12. 4. Appareils et instruments utilisés	**72**
II. 12. 5. Procédé d'électrodéposition	**72**
II. 12. 6. Facteurs influençant le dépôt électrolytique	**73**
II. 12. 6. 1. Agitation de l'électrolyte	**73**
II. 12. 6. 2. pH du bain	**73**
II. 12. 6. 3. Densité de courant	**73**
II. 12. 6. 4. Concentration	**73**
II. 12. 7. Méthodes d'estimation des facteurs d'inhibition	**74**
II. 12. 7. 1. Gravimétrie	**74**
II. 12. 7. 2. Méthodes électrochimiques	**74**
a) Montage expérimental	**74**
b) Suivi du potentiel en circuit ouvert	**76**
c) Courbes de polarisations	**76**
d) Impédance électrochimique	**77**
II. 12. 8. Estimation du revêtement	**78**
II. 12. 8. 1. Évaluation de l'épaisseur du revêtement	**79**
II. 12. 8. 2. Évaluation de la brillance	**80**

II. 12. 8. 3. Aspects des revêtements des surfaces métalliques	**81**
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	**82**
Chapitre III. Résultats et discussions	**86**
III. 1. Rendements des extraits obtenus	**86**
III. 2. Révélation Phytochimique (Screening)	**87**
III. 3. Teneur totale en polyphénols, flavonoïdes, tanins et anthocyanes	**87**
III. 4. Identification et quantification des composés phénoliques par HPLC-DAD	**88**
III. 5. Activité biologique	**91**
III. 5. 1. Activité antioxydante	**91**
III. 5. 2. Activités anti cholinestérase et antidiabétiques du *S. minor*	**92**
III. 5. 3. Inhibitions de la violacéine et du quorum-sensing (QS)	**93**
III. 5. 4. Inhibition de la motilité par essaimage sur *P. aeruginosa* PA01	**94**
III. 5. 5. Propriétés antimicrobiennes et antibiofilm	**95**
III. 6. Résultats d'HPLC-DAD, et des activités biologiques	**96**
III. 7. Résultats et discussions des études d'électrodéposition	**99**
III. 7. 1. Affinement des paramètres de revêtement	**99**
II. 7. 1. 1. Influence de la durée de revêtement	**99**
III. 7. 1. 2. Impact du pH de la solution	**101**
III. 7. 1. 3. Effet du courant sur le dépôt d'électrodéposition	**103**
III. 7. 1. 4. Influence des proportions des additifs	**105**
III. 7. 2. Investigation de l'efficacité anti corrosion des substrats métalliques traités en présence des extraits de *Sanguisorba minor* L	**116**
III. 2. 1. Étude électrochimique	**116**
III. 2. 1. 1. Mesures de polarisation potentiodynamique	**116**
III. 2. 1. 2. Spectroscopie d'impédance électrochimique (S.I.E)	**118**
III. 2. 1. 3. Analyse gravimétrique	**122**
RÉFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	**126**
CONCLUSION GÉNÉRALE	**130**

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Abréviation	Signification
ASTM D3359	American Society for Testing and Materials (ASTM): Société américaine pour les essais et les matériaux qui est une organisation de normalisation internationale. **ASTM D3359 :**Méthode standard utilisée pour tester la résistance à l'adhérence des revêtements
AI	Auto inducteur
APP	Amyloid Precursor Protein
ABTS	Acide 2,2'-azinobis (3-éthylbenzothiazoline-6-Sulfonique)
AChE	Acétylcholinestérase
AHL	Acyl Homosérine Lactone
API 5L-X60	The American Institute Piping Products stocks API 5L pipe ingrades B and X42 – X120 **API :** American Petroleum Institute, qui établit des normes pour les industries pétrolières et gazières. **5L :** Spécification pour les tuyaux de ligne en acier utilisés dans les systèmes de transport de pétrole, gaz et eau. **X60 :** Le "X" indique une classe de résistance, et le nombre "60" représente la résistance minimale à la traction du matériau
BChE	Butyrylcholinestérase
BHA	Butylhydroxyanisole
BHT	Butylhydroxytoluène
AI	Auto inducteur
EAQ	Extrait aqueux
EDCM	Extrait dichlorométhane
EAE	Extrait acétate d'éthyle
EM	Extrait méthanolique
BHT	Butylhydroxytoluène
BChE	Butyrylcholinestérase
Bouillon LB	Bouillon Luria–Bertani
EB	Extrait butanolique
BuOH	Butanol
ChAT	Enzyme choline acétyltransférase
ChI	Inhibiteurs du cholinestérase
CMI	Concentration minimale inhibitrice
CJB	Centre de Recherche Botanique
CV	Chromobacterium de violacéine
ChI	inhibiteurs du cholinestérase
ChAT	Enzyme choline acetyltransferase
CJB	Conservatory and Botanical Garden of the City of Geneva.
CUPRAC	Cupric Reduction Antioxydant Capacity

EACh	Enzyme Acetylcholinesterase
EBCh	Enzyme la butyrylcholinestérase
F-C	Folin-Ciocalteu
FRAP	Ferric Reducing Antioxidant Power
GU	Unités de brillance
HPLC-DAD	High-performance liquid chromatography with diode-array detection (Chromatographie liquide haute performance avec détection par barrette de diodes)
HSL	Homosérine lactone
ES	Extrait sec
EAG	Équivalent d'acide gallique
ECG	Équivalent en cyanidine-3-galactoside (ECG).
EQ	Équivalent quercétine
EC	Équivalent en catéchine
IQS:	Inhibition quorum sensing
v/v	Volume par volume
DCME	Extrait de dichlorométhane
DNSA	Acide 3,5-dinitrosalicylique
EAE	Extrait d'acétate d'éthyle
DTNB	Acide 5,5-dithio-bis (2-nitrobenzoïque)
LC	Liquid chromatography
MA	Maladie d'Alzheimer
MEB	Microscopie électronique à balayage
BHT	Butylhydroxytoluène
p-NPDG	p-nitrophényl-β-D-glucopyranoside
NT	Non testé
NFT	Neuro Fibrillary Tangles
MHB	Bouillon Mueller-Hinton
PA	*Pseudomonas aeruginosa*
QQ	Quorum quenching
QSI	inhibiteurs du QS
QS	Quorum sensing
QAC	Composés d'ammonium quaternaire
ROS	Reactive oxygen species
RNS	Reactive nitrogen species
SH	Fonction sulfhydryle
SE	Sans extrait
OCP	Potentiel en Circuit Ouvert
TPTZ	Tripyridyltriazine
TPT	Teneur en polyphénols totaux
TFT	Teneur en flavonoïdes totaux
TA	Teneur en anthocyanes
TTC	Teneur en tanin condensé

LISTES DE SYMBOLES

Symbole	Signification	Unités
$\mathbf{V_{corr}}$	Vitesse de corrosion	$mg/cm^2.h$
T	Température	°C, K
t	Temps	h
s	Surface de l'électrode	cm^2
θ	Taux de recouvrement	-
C	Concentration	g/L
EI	Efficacité inhibitrice	%
$\mathbf{i_{corr}}$	Densité de courant de corrosion	mA/cm^2
$\mathbf{E_{corr}}$	Potentiel de corrosion du substrat revêtu	mV
βa	Coefficient de TAFEL anodique	mV/dec
βc	Coefficient de TAFEL cathodique	mV/dec
Ea	Energie d'activation	kJ/mol
R	Constante des gaz parfaits	J/K.mol
$\mathbf{R^2}$	Coefficient de corrélation	-
K	Constante d'équilibre de la réaction	-
$\Delta \mathbf{G}^{\mathbf{0}}_{\boldsymbol{ads}}$	Energie d'adsorption libre	kJ/mol
$\Delta \mathbf{H}^{\mathbf{0}}_{\boldsymbol{ads}}$	L'enthalpie standard d'adsorption	kJ/mol
Rtc	Résistance de transfert de charge	$\Omega.cm^2$
Cdc	Capacité de la double couche	mF/cm^2
Rs	Résistance de la solution	$\Omega.cm^2$
Z	Impédance	$\Omega.cm^2$
$\boldsymbol{Rp^0}$	Résistances de polarisation sans l'ajout d'additifs	$(\Omega.cm^2)$
$\boldsymbol{Rp}$	Résistances de polarisation avec l'ajout d'additifs	$(\Omega.cm^2)$
$\mathbf{C_{dl}}$	Capacité de double couche	$\left(\frac{\mu F}{cm^2}\right)$
Rps	Résistance de polarisation du substrat non revêtu	$\Omega.cm^2$
$\Delta \boldsymbol{Ecorr}$	Potentiel de corrosion	mV
$\mathbf{E_{corrFe}}$	Potentiel de corrosion du fer	V
Eocp	Énergie de Potentiel de Circuit Ouvert	mV

LISTE DE FIGURES

Figure 1 : Apparence morphologique de la plante *Sanguisorba minor* L.	9
Figure 2 : Formation des radicaux libres	12
Figure 3 : Configuration des lésions de l'ADN induites par les effets directs et indirects des rayonnements ionisants	13
Figure 4 : Antioxydant et le radical libre	14
Figure 5 : Transformation de $DPPH^{\bullet}$ vers DPPHH	15
Figure 6 : Transformation de ABTS vers $ABTS^{+\bullet}$	16
Figure 7 : Réaction de réduction du réactif CUPRAC	17
Figure 8 : Mécanisme d'action des inhibiteurs de l'acétylcholinestérase dans la MA	19
Figure 9 : Inhibiteurs naturels de l'AChE qui empêchent la dégradation de l'ACh	21
Figure 10 : Rôle des polyphénols bioactifs dans la neurodégénérescence et la neuroprotection	22
Figure 11 : Inhibiteurs de l'α-amylase et de l'α-glucosidase présents dans les aliments céréales	24
Figure 12 : Définition de biofilm	25
Figure 13 : Étapes de formation de biofilm	26
Figure 14 : Principale molécule signal du QS des bactéries gram-négatives (N-Acyle Homosérine Lactone, AHL)	28
Figure 15 : Mode d'action général du QS chez les bactéries gram-positive	29
Figure 16 : Mécanisme typique de détection du quorum gram-négatif	29
Figure 17 : Diagramme de Pourbaix du fer (Fe)	33
Figure 18 : Corrosion uniforme	34
Figure 19 : Illustration de la corrosion par piqure	34
Figure 20 : Corrosion galvanique	35
Figure 21 : Corrosion caverneuse	36
Figure 22 : Corrosion inter-granulaire	37
Figure 23 : Aspect de la corrosion sélective	38
Figure 24 : Corrosion sous contrainte	38
Figure 25 : Méthode d'extraction des polyphénols à partir de *Sanguisorba minor* L.	62
Figure 26 : Mécanisme réactionnel intervenant lord du test FRAP	63
Figure 27 : Réduction des radicaux ABTS par le persulfate de potassium	66
Figure 28 : Surface de revêtement et surface enduite de résine époxy	71
Figure 29 : Dispositif d'électrodéposition	72
Figure 30 : Supports recouverts	73
Figure 31 : Dispositif qui sert aux études électrochimiques	75
Figure 32 : Image d'une électrode de référence au calomel saturée en KCl	75
Figure 33 : Photo d'une électrode auxiliaire	76

Figure 34 : Variation du potentiel de corrosion durant l'immersion du métal dans le milieu corrosif	76
Figure 35 : Détermination des paramètres électrochimique à partir des droites de Tafel	77
Figure 36 : Tracé de l'impédance électrochimique dans le plan complexe (plan de Nyquist)	78
Figure 37 : Évaluation de l'adhérence	79
Figure 38 : Analyse des angles de réflexion de la lumière avec le Poly gloss	80
Figure 39 : Poly mètre de brillance	80
Figure 40 : Microscope optique polarisant	81
Figure 41 : Histogramme des rendements des extraits poly phénoliques de *Sanguisorba minor*	86
Figure 42 : Chromatogrammes HPLC des composés phénoliques : (A) standards, (B) EDCM, (C) EAE, (D) EB et (E) EAQ de *Sanguisorba minor*	89
Figure 43 : Structures des composés phénoliques extraits de différentes fractions de *Sanguisorba minor*	90
Figure 44 : (A) Inhibition de la violacéine contre *C. violaceum* CV12472 ; (B) inhibition de la détection du quorum contre *C. violaceum* CV026 ; (C) contrôle d'inhibition de la détection du quorum ; (D) inhibition de la motilité contre *P. aeruginosa* PA01	95
Figure 45 : Courbes de polarisation potentiodynamique pour les aciers non traités et traités, en présence et en absence de diverses concentrations d'EB.	117
Figure 46 : Courbes de polarisation potentiodynamique pour les aciers non traités et traités, en présence et en absence de diverses concentrations d'EM	117
Figure 47 : Courbes de polarisation potentiodynamique pour les aciers non traités et traités, en présence et en absence de diverses concentrations d'EAE	117
Figure 48 : Courbes de polarisation potentiodynamique pour les aciers non traités et traités, en présence et en absence de diverses concentrations d'EDCM	118
Figure 49 : Courbe d'impédance électrochimique des substrats traités, avec et sans l'ajout de diverses concentrations d'EM	119
Figure 50 : Courbe d'impédance électrochimique des substrats traités, avec et sans l'ajout de diverses concentrations d'EB	119
Figure 51 : Courbe d'impédance électrochimique des substrats traités, avec et sans l'ajout de diverses concentrations d'EAE	119
Figure 52 : Courbe d'impédance électrochimique des substrats traités, avec et sans l'ajout de diverses concentrations d'EDCM	120
Figure 53 : Évolution de la corrosion des échantillons non revêtus et revêtus, avec et sans l'incorporation des extraits testés, en fonction du temps	125

LISTE DE SCHÉMAS

Schéma 1 : Mécanisme de la corrosion uniforme	34
Schéma 2 : Mécanisme de la corrosion par piqure	35
Schéma 3 : Mécanisme de la corrosion galvanique	36
Schéma 4 : Mécanisme de la corrosion caverneuse	36
Schéma 5 : Mécanisme de corrosion inter-granulaire	37
Schéma 6 : Mécanisme de la corrosion sélective	38
Schéma 7 : Mécanisme de la corrosion sous contrainte	38
Schéma 8 : Étapes de nucléation d'un métal durant une électrodéposition	42
Schéma 9 : Principes fondamentaux de la réaction de galvanoplastie	43

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Quelques composés d'origine végétale qui ont des effets contre la MA	22
Tableau 2 : Quelques inhibiteurs d'exploration de quorum avec quorum prouvé	30
Tableau 3 : Constitution chimique de l'acier doux de nuance **E24-2**	71
Tableau 4 : Indicateurs de brillance	79
Tableau 5 : Résultats des tests phytochimique effectués sur les extraits de la plante	87
Tableau 6 : TPT, TFT, TTC et TA contenues dans les fractions de *S. minor*	88
Tableau 7 : Composition phénolique des extraits de *S. minor* par HPLC-DAD	91
Tableau 8 : Activités antioxydants des extraits de *S. minor* par différentes méthodes	92
Tableau 9 : Activités anti cholinestérase et antidiabétiques des extraits de *S. minor*	93
Tableau 10 : Inhibition de la production de violacéine chez *C. Violaeum* CV12472 par les extraits de *S.mior*	94
Tableau 11 : Zones d'inhibition du quorum sensing chez *C. violaceum* CV12472 par les extraits de *S. minor*	94
Tableau 12 : Inhibition de la motilité en essaimage sur *P. aeruginosa* PA01 par les extraits de *S. minor*	95
Tableau 13 : Activités antimicrobiennes (CMI) et antibiofilm des fractions de *S. minor*	96
Tableau 14 : Effet du temps de l'étape d'électrodéposition sur la qualité des revêtement des substrats en acier	100
Tableau 15 : Effet de la fluctuation du pH sur le dépôt électrolytique de zinc	102
Tableau 16 : Effet de l'intensité du courant sur le procédé d'électro zingage de l'acier examiné	103
Tableau 17 : Caractéristiques du revêtement lors de l'utilisation de différente concentrations d'extraits comme additifs dans le bain électrolytique (pH=3.5 ; I= 0.08 A t=30 min ; agitation = 1 tour/s)	106
Tableau 18 : Paramètres d'impédance électrochimique et valeurs d'efficacité inhibitrice pour les substrats revêtus en présence et en absence de différentes concentrations d'extraits	120
Tableau 19 : Paramètres de la corrosion dérivée des observations sur la réduction de poid de l'acier recouvert en présence des extraits analysés	122

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La Terre et tout ce qu'elle englobe ont été créés pour servir l'homme, et l'une des caractéristiques les plus remarquables de notre planète est sa couverture verte. Les plantes ont été utilisées dans divers aspects de la vie dès la présence de l'homme sur Terre, que ce soit pour l'alimentation, les remèdes, la construction, la confection de vêtements, et bien plus encore. Cette utilisation a continué à évoluer avec les progrès technologiques et scientifiques. Effectivement, des milliers d'études ont été menées pour évaluer les bienfaits et les différentes activités des espèces végétales. Les ressources végétales sont utilisées de manière extensive dans divers domaines, notamment pour traiter diverses affections médicales ainsi que pour la fabrication de produits cosmétiques. En médecine, elles sont employées pour soulager les symptômes, renforcer le système immunitaire et traiter des maladies telles que le diabète [1], les cancers [2] et les maladies neurologiques comme l'Alzheimer et le Parkinson [3]. Certaines plantes sont également étudiées pour leurs propriétés antivirales potentielles contre le coronavirus [4]. En outre, elles sont intégrées dans la fabrication de produits cosmétiques et d'hygiène, tels que les pommades, les lotions, les savons et les détergents [5], grâce à leurs propriétés antioxydantes et antimicrobiennes. Ces applications mettent en valeur le potentiel thérapeutique et cosmétique de ces ressources inépuisables.

Il convient de souligner que les propriétés de cette richesse naturelle biodégradable et peu coûteuse contribuent également à l'industrie, notamment dans les secteurs du mobilier, du textile, des pneus, ainsi que dans d'autres domaines tels que la prévention de la corrosion des aciers [6], sans négliger bien sûr leur rôle essentiel dans le domaine de l'énergie, que ce soit dans le secteur du pétrole [7], du gaz [8], de la biomasse [9] du charbon [10] ou de l'électricité [11].

("**الَّذِي جَعَلَ لَكُمْ مِنَ الشَّجَرِ الْأَخْضَرِ نَارًا فَإِذَا أَنْتُمْ مِنْهُ تُوقِدُونَ** "الآية 79 من سورة ياسين)

Certaines plantes sont riches en composés antioxydants tels que les flavonoïdes, les anthocyanes, les tanins, les acides phénoliques, les vitamines, les caroténoïdes, les lignanes, les terpènes et les triterpènes, ce qui les rend utiles comme sources de principes actifs et de remèdes contre diverses maladies. Les antioxydants d'origine végétale sont fortement préconisés pour leur capacité à inhiber les agressions oxydatives en réduisant les radicaux libres. Parallèlement, la résistance aux antimicrobiens (RAM) est devenue un problème majeur de santé publique, menaçant la prévention et le traitement efficace de nombreuses infections causées par des bactéries, des virus, des champignons et des parasites, en rendant inefficaces les médicaments couramment utilisés pour leur traitement [12]. La résistance aux agents antibactériens s'explique notamment par la formation de biofilms bactériens, structures complexes composées d'amas cellulaires enrobés de polymères

extracellulaires [13] qui limitent l'efficacité des traitements. Par ailleurs, les bactéries déploient une stratégie de défense sophistiquée via le *quorum sensing* (QS) : ce système de communication interbactérien, régulé par des signaux chimiques, coordonne des comportements collectifs tels que la production de nutriments, l'adaptation métabolique ou la modulation de la densité populationnelle [14].

Face à ces mécanismes de résistance polymorphes, plusieurs recherches explorent activement les plantes médicinales comme source prometteuse de molécules antibactériennes capables d'inhiber à la fois les biofilms et les voies de signalisation bactériennes. Les résultats obtenus de ces recherches mettent en évidence que certaines plantes renferment des composés connus pour leur capacité à inhiber l'activité des molécules de signalisation AHL (auto-inducteurs d'acyl-homosérine lactone) dans les processus de QS, perturbant ainsi ce mécanisme essentiel chez les bactéries. Ces composés naturels présentent des perspectives prometteuses pour le développement de nouveaux agents antibactériens et l'exploration de stratégies innovantes contre les infections bactériennes. Des organismes tels que *Chromobacterium violaceum* et *Pseudomonas aeruginosa* PA01 constituent des modèles biologiques bien établis, permettant d'évaluer le QS et d'identifier les inhibiteurs tout en approfondissant notre compréhension des mécanismes de sa détection [15].

D'autre part, des activités biologiques récentes sur les plantes ont mis en lumière leur capacité antidiabétique in vitro à réduire l'hyperglycémie sanguine. Plusieurs études ont démontré que certaines plantes possèdent des propriétés inhibitrices de l'activité des enzymes digestives, telles que l'α-amylase ou l'α-glucosidase, impliquées dans la dégradation des glucides complexes en sucres simples dans le tube digestif, facilitant ainsi leur absorption par l'organisme [16]. En inhibant ces enzymes, la digestion des glucides est retardée, prolongeant le temps de résorption, ce qui induit une diminution de la glycémie plasmatique [17].

Les agents actifs d'origine végétale démontrent une efficacité remarquable qui dépasse largement le domaine de la thérapie des maladies, s'étendant notamment à l'identification d'inhibiteurs de corrosion. De nombreuses études ont mis en lumière le potentiel de certains composés à inhiber la corrosion, mais bien que les composés synthétiques soient efficaces, ils présentent souvent des risques pour les êtres vivants et l'environnement. En revanche, les composés naturels offrent une alternative polyvalente et plus respectueuse de l'environnement, ce qui les rend particulièrement intéressants pour diverses applications industrielles et écologiques [6, 18].

Plusieurs techniques analytiques, incluant des méthodes chromatographiques telles que l'HPLC-DAD, la LC-MS et la GC-MS, ont été employées pour identifier et caractériser la

composition chimique des extraits et huiles végétales, permettant ainsi d'établir un lien entre leurs composés actifs et les propriétés biologiques (antioxydantes, antimicrobiennes, etc.) observées lors des études expérimentales mentionnées précédemment.

Dans le but de mettre en valeur la flore algérienne et de contribuer aux axes de recherche actuels, notre étude porte sur la *Sanguisorba minor* L. (الخياطة- المرتقئة), une espèce prisée pour ses feuilles aromatiques utilisées en cuisine et riche en principes actifs bénéfiques, notamment une quantité importante de polyphénols aux propriétés antioxydantes, antitumorales et antibactériennes significatives, ce qui en fait une ressource d'intérêt pour les études phytochimiques et médicinales [19].

Le manuscrit comprend trois chapitres, dont le premier est centré sur la présentation de :

- Une synthèse bibliographique approfondie sur les plantes, mettant en lumière leurs activités biologiques et anti-corrosives.
- Une étude approfondie sur la famille des Rosaceae, incluant une analyse botanique et géographique, sera présentée avec un focus particulier sur le genre Sanguisorba. Cette étude mettra en lumière les avantages thérapeutiques associés à Sanguisorba ainsi que les recherches antérieures menées sur ce genre, offrant ainsi une compréhension exhaustive de ses propriétés et de son potentiel scientifique.
- Une étude des différentes méthodes antioxydantes, telles que le β-carotène, le DPPH, l'ABTS, le CUPRAC, la chélation des métaux, le peroxyde d'hydrogène et le FRAP, permet d'évaluer le pouvoir antiradicalaire.
- Une étude approfondie sur les activités anti-enzymatiques implique l'utilisation de quatre enzymes clés : l'acétylcholinestérase, la butyrylcholinestérase, l'α-glucosidase et l'α-amylase. Cette recherche explore également l'activité antibactérienne, la formation de biofilms et la résistance aux médicaments. De plus, elle examine l'effet du quorum quenching des polyphénols et l'influence du QS chez les bactéries, en se concentrant sur deux espèces modèles : *Chromobacterium violaceum* et *Pseudomonas aeruginosa* PA01.
- Une étude sur la corrosion et ses divers types, ainsi que sur les propriétés inhibitrices contre la corrosion des extraits et huiles végétaux obtenus à partir de plantes.

Pour décrire les méthodes expérimentales utilisées dans le cadre de la valorisation des activités biologiques et anticorrosion des extraits investigués, voici un aperçu des approches générales qui seront abordées dans un deuxième chapitre :

- Les méthodes d'extraction des extraits polyphénoliques investiguées, la détermination des polyphénols constituant ces extraits par HPLC-DAD, ainsi que la quantification des teneurs en polyphénols, flavonoïdes et anthocyanes par des méthodes de dosage colorimétriques.
- Les méthodes in vitro pour évaluer l'activité antioxydante incluent notamment les essais de piégeage des radicaux $DPPH^{\bullet}$, $ABTS^{\bullet+}$, Fe^{+3}-TPTZ, la capacité antioxydante réductrice cuprique (CUPRAC), les tests avec H_2O_2, la chélation des métaux et l'assay de l'acide β-carotène-linoléique.
- Les méthodes expérimentales pour évaluer les activités anti-enzymatiques.
- Cette étude évalue l'activité antibactérienne, la capacité d'éliminer les biofilms et le potentiel d'inhibition de la détection du quorum d'un composé.

Le troisième chapitre est consacré à l'évaluation et à la discussion des résultats expérimentaux obtenus.

Nous concluons ce manuscrit par une conclusion générale et quelques perspectives envisagées pour l'avenir.

RÉFÉRENCES

[1] Kooti, W., Farokhipour, M., Asadzadeh, Z., Ashtary-Larky, D., & Asadi-Samani, M. (2016).The role of medicinal plants in the treatment of diabetes: A systematic review. *Electronic Physician*, *8*(1), 1832-1842.

[2] Iqbal, J.; Abbasi, B.H.; Batool, R.; Mahmood, T.; Ali, B.; Khalil, A.T.; Kanwal, S.; Shah, A.; Ahmad, 2018, R. Potential phytocompounds for developing breast cancer therapeutics: Nature's healing touch. Eur. J. Pharmacol. 827, 125–148.

[3] Muhammad, HasnainJ, ShahF, SajjadAli Sh, SumairaSh, MuhammadN, Muhammad, Muhammad, Faheem.J, Suliman.S, (2021)*In vitro* examination of anti-parasitic, anti-Alzheimer, insecticidal and cytotoxic potential of *Ajuga bracteosa* Wallich leaves extracts Saudi Journal of Biological Sciences Volume 28, Issue 5, , Pages 3031-3036.

[4] Kim, H. Y, Shin, H.S , Park, H. , Kim, Y. C. , Yun, Y. G. , Park, S. , … Kim, K. (2008). In vitro inhibition of coronavirus replications by the traditionally used medicinal herbal extracts, Cimicifuga rhizoma, Meliae cortex, Coptidis rhizoma, and Phellodendron cortex. *Journal of Clinic, al Virology*, 41(2), 122–128. 10.1016/j.jcv.2007.10.011.

[5] Thibane, V., Ndhlala, A., Abdelgadir, H., Finnie, J., & Van Staden, J. (2019).
The cosmetic potential of plants from the Eastern Cape Province traditionally used for skincare and beauty. *South African Journal of Botany*, *122*, 475-483.

[6] Hanini, K., Merzoug, B., Boudiba, S., Selatnia, I., Laouer, H., & Akkal, S. (2019). Influence of different polyphenol extracts of Taxus baccata on the corrosion process and their effect as additives in, *14*, and 100189.

[7] Manna, J., Jha, P., Sarkhel, R., Banerjee, C., Tripathi, A., & Nouni, M. (2021). Opportunities for green hydrogen production in petroleum refining and ammonia synthesis industries in India. *International Journal of Hydrogen Energy*, *46*(77), 38212-38231.

[8] Petlum A., Paengkoum P., Liang J. B., Vasupen K., Paengkoum S. (2019) Molecular weight of condensed tannins of some tropical feed-leaves and their effect on *in vitro* gas and methane production. *Animal Production Science* 59, 2154-2160.

[9] McKendry, P., (2001). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. Bioresource Technology 83 (1), 37–46.

[10] Michel, G., & Kendall, M. D. (2013). Charcoal Production through Distillation of Wood, perhaps the Key to the Deforestation of Haiti. *Journal of Haitian Studies*, *19*(1), 282-287.

[11] Helder, M., Chen, S., Strik, T. B., Hamelers, V. M., Buisman, J. N., & Potting, J. (2013). Electricity production with living plants on a green roof: Environmental performance of the plant-microbial fuel cell. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, *7*(1), 52-64.

[12] Zampini I.C., Vattuone M.A., Isla M.I. (2005). Antibacterial activity of *Zuccagnia punctata* Cav. ethanolic extracts. *Journal of Ethnopharmacology*, 102, 450-456.

[13] Alam, K., Farraj, D. A. A., Mah-e-Fatima, S., Yameen, M. A., Elshikh, M. S., Alkufeidy, R. M., Mustafa, A. E. Z. M., Bhasme, P., Alshammari, M. K., Alkubaisi, N. A., Abbasi, A. M., & Naqvi, T. A. (2020). Anti-biofilm activity of plant derived extracts against infectious pathogen-Pseudomonas aeruginosa PAO1. *Journal of Infection and Public Health*, *13*(11), 1734-1741.

[14] Rutherford S.T., Bassler B.L. (2012). Bacterial quorum sensing: its role in virulence and possibilities for its control. *Cold Spring Harb. Perspect. Med*, 2:1-25.

[15] Noumi E., Merghni A., MalreshidiM., HaddadO., Akmadar G., De Martino L., Mastouri M., Ceylan O., Snoussi M., Al-SieniA. (2018). *Chromobacterium violaceum* and *Pseudomonas aeruginosa* PA01: Models for evaluating anti-quorum sensing Activity of *Melaleuca alternifolia* essential oil and its main component terpinen-4-ol. *Molecules*, 23, 2672.

[16] Ihcen Khacheba, Amar Djeridane, Mohamed Yousfi, (2014)."Twenty Traditional Algerian Plants Used in Diabetes Therapy as Strong Inhibitors of α-Amylase Activity", International Journal of Carbohydrate Chemistry, vol. 2014, Article ID 287281, 12 pages,.

[17] I.Rhabasa-Lhoret R., Chiasson J.L. -Glucosidase inhibitors. In: Defronzo, R.A., Ferrannini E., Keen H., Zimmet P, (Eds.), (2014). International Textbook of Diabetes Mellitus, vol. 1, third ed. John Wiley & Sons Ltd., UK. 2004; pp 901–914 International Journal of Carbohydrate Chemistry 2014;: 12.

[18] Boudiba, S., Hanini, K., Selatnia, I., Saouane, A., Hioun S., and M., Benahmed, M. (2019). Experimental, theoretical and mathematical studies of *Echium italicum* L. extract as a corrosion inhibitor for carbon steel in acidic medium. Materials Research Express 6, 086546.

[19] Ceccanti, C., Landi, M., Rocchetti, G., Miras Moreno, M. B., Lucini, L., Incrocci, L., Pardossi, A., & Guidi, L. (2019). Hydroponically Grown Sanguisorba minor Scop: Effects of Cut and Storage on Fresh-CutProduce.*Antioxidants*, *8*(12), 631.

CHAPITRE I
Synthèse Bibliographique

I. Généralité sur la plante investiguée

I. 1. Aspect botanique et répartition géographique de la famille des Rosacées

Les Rosaceae, ou Rosacées, sont une famille botanique d'une grande importance, à la fois en termes de nombre d'espèces et de diversité végétative et florale de ses membres. Cette famille compte 100 genres et 3000 espèces, et elle est la troisième famille de plantes la plus intéressante dans l'évolution de l'économie des régions tempérées [1]. Elle regroupe des plantes fruitières, à noix, ornementales, aromatiques, herbacées et ligneuses. Pour être consommées par l'homme, les plantes de la famille des Rosaceae exigent des cultures comestibles telles que la pomme, la fraise, la poire, la pêche, la prune, l'amande, la framboise, la cerise aigre et la cerise douce. En outre, certaines espèces non comestibles appartenant aux Rosacées ont une valeur décorative, notamment la rose, l'aubépine, le clou de girofle, la pyracanthe et le cotonéaster. Il est important de souligner que les espèces de plantes de cette famille sont identifiées par leur taux en constituants phénoliques, qui constituent une classe potentiellement bioactive reconnue [2]. Parmi ces composés bioactifs, on peut citer l'acide L-ascorbique, la quercétine, le kaempférol, la myricétine, l'acide p-coumarique, l'acide gallique et l'acide ellagique.

Les huiles et les extraits de ces espèces sont connus pour leurs fortes activités pharmacologiques : par exemple, l'huile de rose possède des propriétés anti-VIH (virus de l'immunodéficience humaine), antibactériennes et antioxydantes [3]. Les deux extraits aqueux des feuilles d'*Aegle marmelos* et d'*Aigremoine eupatoria* ont démontré une activité hypoglycémiante en stimulant la sécrétion d'insuline [4].

D'autres études indiquent que les principes actifs de la plante *Syzygium aromaticum*, tels que l'eugénol et la myricétine-0-caféoylquinique, ont diverses activités, notamment des propriétés analgésiques, stimulantes et carminatives. Il est également possible qu'ils agissent en tant qu'inhibiteurs potentiels de la protéase principale (Mpro) du COVID-19 [5]. La plupart des plantes de cette famille sont largement utilisées dans l'alimentation grâce à leur richesse en éléments nutritifs tels que l'acide ellagique, que l'on retrouve dans les fruits du genre Rubus (framboise, chicouté, ronce arctique, mûre et mûre de Boysen), la fraise (Fragaria), l'ananas (*Ananassa duchesne ex Weston*), la grenade, le muscat (*Vitis rotundifolia Michx*.) et des fruits tropicaux tels que le camucamu (*Myrciaria dubia* (Kunth) *McVaugh*). L'acide ellagique peut jouer un rôle dans la modulation de nombreuses voies de signalisation cellulaire pour prévenir, atténuer ou ralentir l'évolution de maladies chroniques, notamment les maladies cardiovasculaires [6], les maladies neurodégénératives [7], le diabète [8] et les cancers [9]. D'autres recherches ont démontré que les huiles extraites des graines de l'abricot sauvage (*Prunus armeniaca*), de l'abricot sibérien (*Prunus sibirica*) et de l'amandier doux (*Prunus amygdalus)* sont efficaces pour être utilisées comme biodiesel [10].

Les Rosacées sont composées de différents types de fruits très particuliers, tels que les drupes, les pépins, les drupes lettes et les akènes. Selon les classifications, les Rosaceae ont été divisées en quatre sous-familles basées sur les différents types de fruits, notamment Rosoideae (plusieurs pistils apocarpes mûrissent en akènes), Amygdaloideae / Prunoideae (un seul pistil monocarpellé mûrit en drupe), Spiraeaoideae (le gynécée se compose de deux ou plusieurs pistils apocarpes qui mûrissent en follicules) et Maloideae / Pomoideae (l'ovaire est inférieur et composé, le réceptacle floral étant un tissu charnu comestible) [2]. La phylogénie des Rosaceae a été divisée en trois groupes principaux basés sur les locus nucléaires et chloroplastiques, à savoir Amygdaloideae, Rosoideae et Dryadoideae [2]. L'Amygdaloideae comprend les autres sous-familles telles que les anciennes Amygdaloideae (n = 8) (prune, cerise, abricot, pêche, amande, etc.), Spiraeaoideae (n = 9) (Spiraea, Aruncus, Sorbaria, etc.) Maloideae (n = 17) (pomme, poire, cotonéaster, etc.), Rosoideae (n = 7) comprend Fragaria, Potentilla, Rosa et Rubus, et Dryadoideae (n = 9) comprend Cercocarpus, Chamaebatia, Dryas et Purshia [11]. Des recherches in vitro et in vivo suggèrent que les régimes riches en fruits et légumes de rosacées peuvent grandement réduire le risque de certaines maladies, telles que le cancer et le diabète [12].

I. 2. Genre Sanguisorba

Le genre Sanguisorba appartient à la famille des Rosacées. Il comprend environ 18 à 34 espèces et sous-espèces à travers le monde, largement répandues dans l'hémisphère Nord. Elles se trouvent notamment en Afrique du Nord, en Europe occidentale et méridionale, en Asie de l'est et en Amérique du Nord [13]. Le genre Sanguisorba est classé dans la sous-famille Sanguisorbinae, est communément appelé pimprenelle. Son nom dérive de "sanguis" qui signifie "sang" et "sorbere" qui signifie "absorber", en raison de ses propriétés pour stopper les saignements et favoriser la cicatrisation des plaies [14]. Ces plantes sont largement utilisées en médecine traditionnelle. La Chine compte sept espèces et six types de Sanguisorba répartis dans le nord et le sud du pays, en particulier dans les provinces du nord-est [15].

La diversité des genres de Sanguisorba a été explorée sur tous les continents, et est distribuée comme suit :

- ✓ *Sanguisorba canadensis* (canada).
- ✓ *Sanguisorba menziesii* (Amérique du nord).
- ✓ *Sanguisorba obtusa* (Asie du sud-est).
- ✓ *Sanguisorba officinalis* (Europe, Asie et en Amérique du Nord).
- ✓ *Sanguisorba minor* (les régions de méditerranée, l'Asie, le nord d'Amérique).
- ✓ *Sanguisorba stipulata* Raf., et *Sanguisorba tenuifolia* Fisch (l'est de l'Asie : la Chine, le Japon, et la Corée)

L'espèce *Sanguisorba officinal* est la plus étudiée de l'espèce *Sanguisorba minor*, ainsi que l'espèce *S. minor* (Figure 1) est rarement explorée [16]. La *S. minor* a été documentée comme une plante médicinale couramment utilisée pour traiter les brûlures causées par l'eau et le feu, les hémorragies hémorroïdaires, l'hémostase, la leucopénie, l'hématochézie et les inflammations [15].

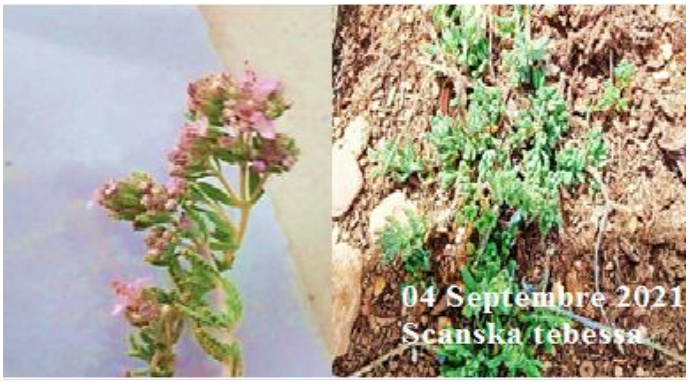


Figure 1 : Apparence morphologique de la plante *Sanguisorba minor* L.

I. 3. *Sanguisorba minor* L.

La *Sanguisorba minor* L., également appelée petite pimprenelle ou salade de pimprenelle, est une plante résistante à la sécheresse. Elle est largement répandue dans la péninsule du Sinaï en Égypte, en Asie, en Europe en Afrique du Nord, et en Amérique. Cette espèce est principalement présente dans les régions arides et semi-arides du bassin méditerranéen. *S. minor* se compose d'herbes vivaces comestibles avec des feuilles pennées et des pétales rouges et verts [17,18]. Plusieurs sous-espèces de *S. minor* ont été identifiées, notamment :

- ✓ *S. minor* ssp. *muricata* : cultivée dans le nord de l'Amérique [18], ses parties aériennes ont des propriétés curatives pour les maladies de la peau et l'eczéma [19].
- ✓ *Sanguisorba minor* subsp. *minor* : présente en Afrique du Nord, en Europe, en Asie et en Amérique du Nord [18].
- ✓ *Sanguisorba minor* subsp. *magnolii*: originaire des pays méditerranéens, elle a été importée en Amérique du Nord depuis l'Espagne et le Portugal dans les années 2000. Elle est cultivée de manière expérimentale et reste rare en Amérique du Nord, mais est utilisée pour les maladies du système urinaire [18].

I. 4. Utilisations traditionnelles de *Sanguisorba minor* L.

Sanguisorba minor L. est caractérisée par ses feuilles comestibles, ce qui encourage à les utiliser comme ingrédient alimentaire. Pour cette raison, ses feuilles sont souvent intégrées dans les salades composées ou utilisées comme aromatisant dans les boissons [17]. En 1633, dans son ouvrage "**Histoire**

générale des plantes", Gérard a décrit différentes préparations médicinales à base de racines de *S. minor*, qui ont été utilisées comme remède pour traiter les plaies, ainsi qu'en interne pour la dysenterie et pour réguler les menstruations [20]. Il existe un proverbe dans le centre de l'Italie qui fait l'éloge de *S. minor* : "L'insalata non è bella se non c'è la pimpinella", ce qui signifie "La salade n'est pas bonne si la 'pimpinella' (*S. minor*) n'est pas là". En raison de sa teneur élevée en polyphénols, *S. minor* est classée comme un aliment à usage médicinal [21]. De plus, les feuilles de *S. minor* ont été utilisées pour rehausser le goût du vin [20]. *S. minor* est également utilisée pour la santé féminine afin de normaliser les menstruations abondantes ou anormales [17]. Avant les combats, les soldats américains buvaient du thé à base de *S. minor* pour prévenir les hémorragies causées par les plaies. *S. minor* a également été utilisé pour soigner les morsures de serpent en Europe du Sud [18].

I. 5. Activités pharmacologiques de *Sanguisorba minor* L.

S. minor comprend une large gamme de composés, incluant des flavonoïdes, des tanins, des triterpènes, des phénols, des terpènes et des acides gras. En particulier, les feuilles et les racines cette espèce renferment une grande variété de constituants tels que l'acide gallique, l'acide ellagique, la (+) catéchine, la lambertianine C, la sanguiine H-10 et le ziyuglycoside II [22]. Cette richesse en composés bioactifs confère de potentielles propriétés, incluant : anti-inflammatoires, antibactériennes, antivirales, antioxydantes, neuroprotectrices, anticancéreuses et antibactériennes à *S. minor* [23]. Elle est utilisée dans la médecine traditionnelle pour soigner diverses maladies telles que la conjonctivite, la fièvre et la diarrhée, sous forme d'infusions et de teintures. De plus, des travaux in vitro sur l'extrait éthanolique de *S. minor* ont également montré une suppression de l'activité de la cyclooxygénase-1 (COX-1) et des enzymes acétylcholinestérases (EACh) [24]. Par ailleurs, les propriétés neuroprotectrices in vitro de cette plante contre la toxicité neuronale du peptide bêta-amyloïde ont été prouvées [24]. D'autres résultats suggèrent que *S. minor* est efficace dans la prévention du dysfonctionnement cognitif induit par la scopolamine et que ces effets protecteurs pourraient être liés à la régulation de l'activité cholinergique et du stress oxydatif. Ainsi, *S. minor* pourrait être envisagé comme une thérapie alternative prometteuse pour les troubles cognitifs. La forte teneur en quercétine-3-glucuronide dans les extraits éthanoliques de *S. minor* augmente l'activité antitumorale, et ce composé traduit la suppression in vitro de la migration des cellules cancéreuses par des mécanismes médiés par la plasmine [25]. En effet, des études significatives ont démontré que les extraits de *Sanguisorba officinalis* inhibent fortement la croissance des cellules de mélanome B16F10 et que ce composé possède une activité anticancéreuse par son action anti-prolifération sur les cellules de mélanome [26]. Dans le cadre de recherches visant à sélectionner des agents anti-SIDA d'origine naturelle, des extraits éthanoliques et aqueux de 15 plantes médicinales largement utilisées dans la médecine populaire ont été testés. Cependant, seuls les extraits

de *Tuberaria lignosa* et de *Sanguisorba minor magnolii* ont présenté une activité anti-VIH dans un test MTT in vitro. Les extraits aqueux de ces plantes ont démontré des effets anti-SIDA à des concentrations allant de 12,5 à 50 µg/mL et à 50 µg/mL (aucune cytotoxicité appréciable n'a été observée pour ces deux extraits à ces concentrations) [27].

II. Activité antioxydante

II. 1. Définition de l'activité antioxydant

La consommation de produits contenant des antioxydants synthétiques tels que le parabène [28], le butylhydroxyanisole (BHA), le butylhydroxytoluène (BHT) [29], le β-carotène et l'alpha-tocophérol (vitamine E) [30, 31], présents dans l'alimentation, les cosmétiques et les médicaments, soulève des inquiétudes quant à leur impact sur la santé. Ces substances sont associées à des risques potentiels tels que des effets cancérigènes, des perturbations endocriniennes et d'autres problèmes de santé. Par conséquent, il est essentiel de réévaluer leur utilisation pour prévenir ces effets néfastes. Cela incite les scientifiques à explorer des alternatives antioxydantes plus sûres et efficaces, notamment issues du règne végétal, afin de réduire les risques pour la santé humaine.

L'intérêt pour les antioxydants naturels a considérablement augmenté en raison de leurs propriétés curatives. La recherche scientifique se concentre sur l'extraction, l'identification et la quantification des constituants bioactifs issus de sources naturelles, notamment les plantes médicinales et les denrées alimentaires agricoles.

Le stress oxydant désigne l'incapacité du corps à se défendre contre les espèces réactives d'oxygène (ERO) en raison de la perturbation de l'équilibre endogène entre les deux. Ce déséquilibre peut avoir de graves conséquences structurelles et fonctionnelles et conduire à plusieurs maladies indésirables telles que le cancer, le diabète, Alzheimer, le vieillissement prématuré de la peau, les rhumatismes et les maladies cardiovasculaires [32]. Ce déséquilibre dans le corps est issu de l'apparition de métabolites partiellement réduits et hautement réactifs de l'O_2, qui peut former des ERO. Parmi ces espèces réactives, il y a des composés radicalaires appelés les radicaux libres primaires, qui résultent de la réduction de l'oxygène. D'autres types résultent de l'oxydation des radicaux libres primaires et forment des radicaux secondaires. L'ensemble des radicaux libres primaires et secondaires est souvent appelé ERO [33].

II. 2. Radical libre

Les radicaux libres sont des produits issus du métabolisme cellulaire normal, souvent générés lors de la respiration et de processus oxydatifs. Ils sont définis comme des atomes ou molécules possédant

un ou plusieurs électrons non appariés dans leur couche de valence ou orbite extérieure, ce qui leur confère une grande instabilité et réactivité chimique. Les radicaux libres sont également produits en réponse à divers facteurs externes tels que le stress, le tabagisme, l'exposition solaire excessive et la pollution. Le nombre impair d'électrons d'un radical libre le rend stable, mais sa durée de vie est courte et il réagit très facilement. En raison de leur grande réactivité, ils peuvent arracher des électrons à d'autres composés pour atteindre la stabilité. Ainsi, lorsque la molécule attaquée perd son électron, elle devient elle-même un radical libre, entraînant ainsi une réaction en chaîne qui peut endommager la cellule vivante, les protéines et l'ADN. Ces dommages contribuent, à long terme et en fonction du capital génétique individuel, au vieillissement des tissus en l'absence d'un apport adéquat en antioxydants [34].

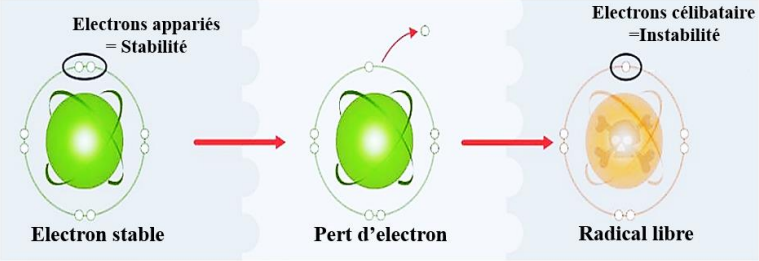


Figure 2 : Formation des radicaux libres [35].

Les radicaux libres sont divisés en deux espèces réactives de l'oxygène (ROS) et de l'azote réactif (RNS), provenant à la fois de sources endogènes (mitochondries, peroxysomes, réticulum endoplasmique, cellules phagocytaires, etc.) et de sources exogènes (pollution, alcool, fumée de tabac, métaux lourds, métaux de transition, solvants industriels, pesticides, certains médicaments tels que l'halothane, le paracétamol et la radiothérapie). Les exemples de radicaux incluent : le radical superoxyde ($O_2^{-\bullet}$), le radical hydroxyle ($OH^{\bullet}$), le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), ainsi que le monoxyde d'azote (NO), la peroxynitrite ($ONOO^{\bullet}$), le dioxyde de nitrogène ($NO_2^{\bullet}$), l'acide hypochloreux (HClO), les radicaux libres soufrés : le radical thiyle ($GS^{\bullet}$), le disulfure ($GSSG^{\bullet-}$) [34].

II. 3. Dommages biochimiques

II. 3. 1. Dommages oxydatifs des protéines

Les protéines subissent des dommages oxydatifs, en particulier celles contenant une fonction sulfhydryle (SH), qui sont les plus réactives aux radicaux libres. Cela peut entraîner l'inactivation des enzymes cellulaires et des protéines de transport. De plus, les protéines peuvent subir des modifications telles que la formation de ponts de tyrosine qui sont caractérisés par leur fluorescence, ainsi que des variations dans quelques acides aminés en cas d'attaques modérées par les radicaux libres [36].

II. 3. 2. Dommages oxydatifs sur l'ADN

L'ADN est une macromolécule très vulnérable aux agressions radicalaires, et cinq principales classes de dommages oxydatifs, provenant des radicaux libre $OH^{\bullet}$, peuvent être générées. Les bases qui composent l'ADN, telles que l'adénine, la thymine, la guanine et la cytosine (A, T, G, C), sont particulièrement sensibles à l'oxydation, en particulier la guanine. L'ADN peut subir des dommages tels que des cassures de brins, des enchaînements croisés entre protéines et ADN, et des modifications de bases nucléiques. Ces dommages oxydatifs peuvent contribuer au développement du cancer au cours de la vie. Les mécanismes oxydatifs ont été reconnus comme jouant un rôle important dans les étapes clés de la carcinogenèse, notamment l'initiation, la promotion et la progression du cancer [37].

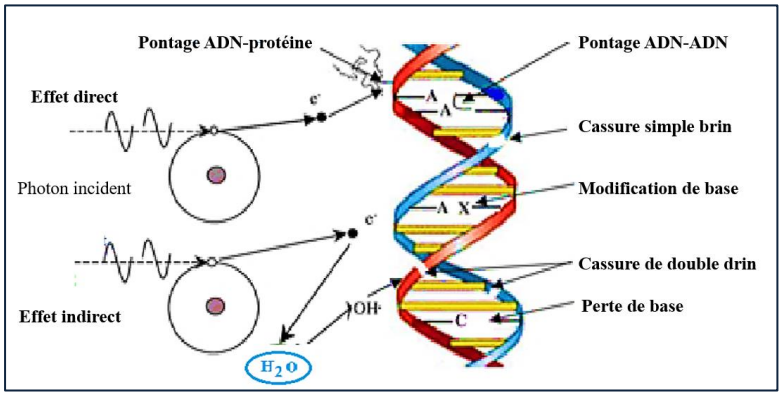


Figure 3 : Configuration des lésions de l'ADN induites par les effets directs et indirects des rayonnements ionisants [37].

II. 3. 3. Oxydation des lipides

La peroxydation lipidique est la dégradation oxydative des acides gras polyinsaturés dans notre organisme. Les dégradations d'origine radicalaire ont la capacité de modifier la structure des lipides, ce qui peut se propager à d'autres types de molécules et produire des aldéhydes toxiques. Les produits de peroxydation lipidique (4-Hydroxynonenal, Malondialdéhyde) sont des fragments dangereux qui peuvent causer des dommages directs aux lipides et être hautement nuisibles pour les cellules. La peroxydation lipidique influence également le processus de vieillissement et est responsable de l'évolution de nombreuses maladies liées à l'âge. Le stress oxydatif est un facteur très puissant et très délétère, qui peut contribuer à l'apparition de diverses maladies chroniques telles que l'asthme, l'athérosclérose, l'arthrite, les maladies cardiaques, l'hyperoxie, les accidents vasculaires, l'hépatite, les traumatismes cérébraux, les pigments d'âge, les dommages de la rétine, les parodontites et les cancers [38].

II. 3. 4. Antioxydants

Les antioxydants sont des molécules qui stabilisent les radicaux libres avant qu'ils n'endommagent les cellules. Lorsqu'ils sont limités dans l'organisme, les dommages peuvent être graves. Cependant, lorsque leur quantité est suffisante, ils peuvent réduire la division cellulaire anormale. Les cellules disposent d'un système de défense antioxydant, composé à la fois de composants enzymatiques et non enzymatiques, pour les protéger contre les dommages oxydatifs. Ces antioxydants peuvent être endogènes, naturellement disponibles ou obtenus de manière exogène pour maintenir un fonctionnement cellulaire normal, en particulier dans des conditions de stress, qui peuvent être apportées par l'alimentation [39].

$$AH + FR^{\bullet} \rightarrow A^{\bullet} + FRH \qquad (1)$$

Où AH représente un antioxydant et $FR^{\bullet}$ un radical libre. Ainsi, la réaction (1) est considérée comme la base du mécanisme d'action classique des antioxydants et explique leur capacité à inhiber ou ralentir de nombreux processus nuisibles induits par les $FR^{\bullet}$ sur les lipides, les protéines ou l'ADN. Ces derniers sont à l'origine de l'apparition de maladies indésirables telles que les maladies neurologiques, cardiovasculaires, les rhumatismes et le cancer [40].

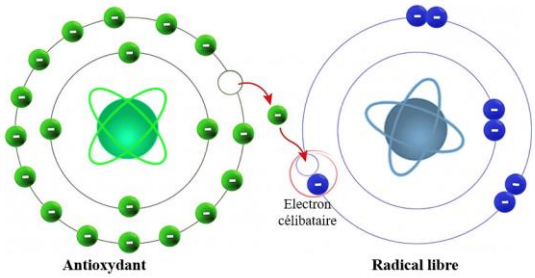


Figure 4 : Antioxydant et le radical libre.

II. 3. 5. Méthodes d'évaluation de l'activité antioxydante

Pour estimer le pouvoir de piégeage des radicaux libres des produits naturels et des composés synthétiques, de nombreuses méthodes ont été exploitées. Ces essais peuvent être divisés en deux catégories : ceux impliquant un déplacement d'électrons et d'autres impliquant un transfert d'atome d'hydrogène vers un radical coloré. Des travaux récents ont mis en évidence 19 méthodes in vitro utilisées pour évaluer l'activité antioxydante [41]. Parmi celles-ci, le test du DPPH est particulièrement répandu en raison de sa simplicité et de sa rapidité (Figure 5). Cependant, il est crucial de combiner plusieurs méthodes fiables, afin d'obtenir une estimation complète et précise de l'activité antioxydante, car chaque méthode évalue différents aspects de cette activité

II. 3. 5. 1. Méthode de DPPH

La molécule 1,1-diphényl-2-picrylhydrazyl (α,α-diphényl-β-picrylhydrazyl, DPPH) est considérée comme un radical libre stable en raison de la délocalisation de l'électron de réserve sur l'ensemble de la molécule, ce qui l'empêche d'être réduit, contrairement à la plupart des autres radicaux libres. Cette délocalisation de l'électron donne également une couleur violet foncé, caractérisée par une bande d'absorption en solution de méthanol centrée autour de 517 nm. Lorsque la solution de DPPH réagit avec une solution d'un substrat (AH) capable de combler le défaut en atomes d'hydrogène, cela mène à la formation de la forme réduite (Figure 5), entraînant un changement de couleur du violet au jaune [42].

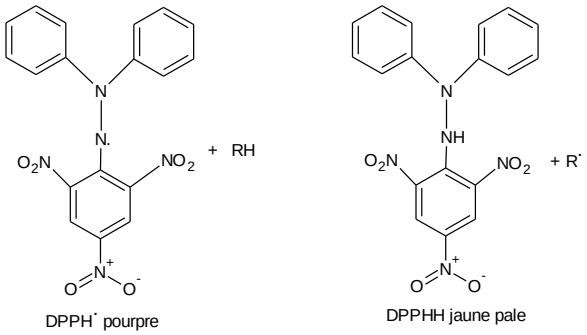


Figure 5 : Transformation de DPPH• vers DPPHH.

II. 3. 5. 2. Mesure de l'activité antioxydante par le test ABTS

Cette méthode repose sur l'oxydation de l'ABTS par un agent oxydant tel que le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) ou le persulfate de potassium ($K_2S_2O_8$), en présence d'une enzyme catalyseur telle que la peroxydase ou la myoglobine [41]. Cela produit le radical cationique $ABTS^{+\bullet}$ de couleur bleu-vert. L'addition d'un antioxydant va transformer le radical $ABTS^{+\bullet}$ en ABTS (Figure 6), entraînant un changement de couleur de bleu verdâtre à une teinte plus claire ou transparente. Dans ce cas, l'absorbance est mesurée à une longueur d'onde de 734 nm.

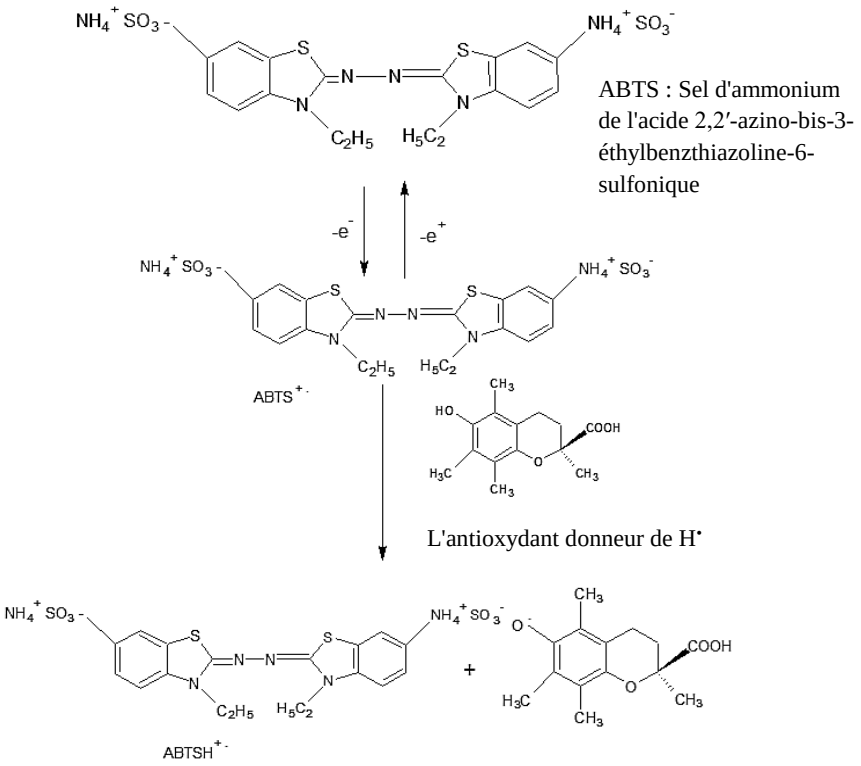


Figure 6 : Transformation de ABTS vers $ABTS^{+\bullet}$.

II. 3. 5. 3. Essai du β-carotène

Cet essai repose sur le changement de couleur du β-carotène, passant du rouge au blanc, résultant de l'oxydation du bêta-carotène par les radicaux peroxyde. Ces radicaux peroxyde sont générés par l'oxydation de l'acide linoléique à une température de 50 °C, ce qui entraîne la disparition de la couleur rouge, pouvant être interprétée par l'absorption spectrométrique à 470 nm. Cette technique consiste à mesurer, à 470 nm, la décoloration du bêta-carotène résultant de son oxydation par les produits de décomposition de l'acide linoléique [41]. La lecture des résultats obtenus dans cette technique n'est pas facilement interprétable, car le bêta-carotène lui-même est un antioxydant.

II. 3. 5. 4. Réduction du fer (FRAP)

Le dosage FRAP dépend de la transformation du tripyridyltriazine ferrique (Fe(III)-TPTZ) en complexe ferreux tripyridyltriazine (Fe(II)-TPTZ) par un agent réducteur. Cela signifie que le Fe(III) est réduit à Fe(II) à un pH bas. Le complexe Fe(II)-TPTZ présente une couleur bleu intense et peut être mesuré à 593 nm. Différentes recherches ont montré que la méthode FRAP est sensible pour évaluer l'activité antioxydante totale des extraits frais, tels que les homogénats végétaux et les produits des plantes médicinales [43].

II. 3. 5. 5. Méthode de l'H_2O_2

Le peroxyde d'hydrogène n'est pas un radical, mais plutôt un composé toxique et corrosif pour les cellules, car il a la capacité de générer des radicaux hydroxyles. Ces espèces chimiques sont très réactives et peuvent facilement réagir avec les substrats organiques tels que les acides aminés, les sucres, les phospholipides et les bases puriques et pyrimidiques de l'ADN. Cette méthode repose sur la diminution de la valeur de l'absorbance dans l'ultraviolet en fonction de la diminution de la concentration de H_2O_2 due à l'action des composés piégeurs. L'absorbance est mesurée à une longueur d'onde de 230 nm [41].

II. 3. 5. 6. Méthodes de CUPRAC

Le test de capacité antioxydante réductrice cuivrique (CUPRAC) est une méthode utilisée pour évaluer la capacité antioxydante des substances. Il repose sur la réduction du cuivre (II) en cuivre (I) en présence d'un réactif appelé néocuproïne (2, 9-diméthyl-1, 10-phénanthroline). Le principe de ce test est fondé sur la transformation des groupes hydroxyles phénoliques en quinones par la réduction du complexe Cu^{2+} (cuivre(II)) avec la néocuproïne. Cette réaction prend généralement environ une heure pour produire un complexe chromogène de Cu^{2+}-Nc, qui est détecté dans l'UV à une longueur d'onde de 450 nm [41].

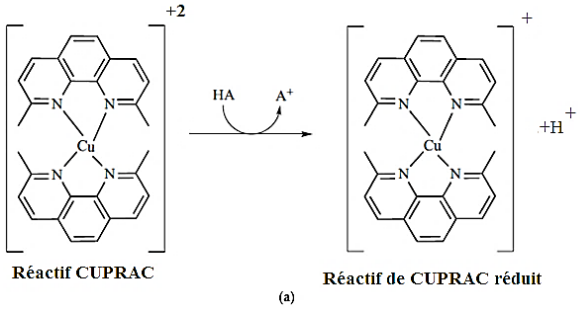


Figure 7 : Réaction de réduction du réactif CUPRAC [44].

II. 3. 5. 7. Activité chélatrice du fer

La méthode de Welch (1990) [45], pour évaluer l'activité de chélation du fer ferreux repose sur la formation du complexe Fer(II)-Ferrozine. Le complexe en question se distingue par une couleur violette intense lorsqu'il n'est pas perturbé. Cependant, la présence d'agents chélatants modifie cette situation en formant des complexes avec les ions métalliques impliqués, ce qui perturbe la formation du complexe initial. Cette perturbation entraîne une diminution notable de l'intensité de la couleur violette, indiquant que les agents chélatants jouent un rôle crucial dans la modification des propriétés optiques du complexe. La mesure de cette réduction de la couleur peut être effectuée en utilisant un spectrophotomètre à la

longueur d'onde spécifique, qui est généralement de 562 nm. En mesurant l'absorbance à cette longueur d'onde, on peut quantifier l'activité de chélation des agents testés sur le fer ferreux [41].

III. Activité anti-enzymatiques

III. 1. Maladie Alzheimer et l'activité anticholinesteraze

III. 1. 1. Définition de la maladie Alzheimer

La maladie d'Alzheimer (MA) est une affection qui provoque la perte de neurones dans des régions localisées du système nerveux, constituant la principale cause de démence chez les personnes âgées [46]. Elle se caractérise par divers symptômes tels que des perturbations de la mémoire et du langage, un dysfonctionnement de l'apprentissage et des déséquilibres comportementaux, qui s'aggravent progressivement [47].

Les causes exactes de la maladie ne sont pas bien déterminées, mais, sur le plan physiopathologique, la MA est caractérisée par l'association de deux principales anomalies neuro-pathologiques cérébrales : les accumulations extracellulaires de peptides bêta-amyloïdes et les agrégats intracellulaires de protéines tau. Ces dépôts forment des plaques toxiques pour les cellules nerveuses, provoquant la dégénérescence neuro-fibrillaire et la désorganisation des neurones [48]. Ces lésions se développent très lentement au fil du temps, débutant dans la région hippocampique avant de s'étendre à l'ensemble du cortex cérébral. Malgré des tentatives approfondies pour comprendre la physiopathologie de la MA, les mécanismes exacts sous-jacents restent peu clairs. La théorie la plus importante postule que, dans cette maladie, la protéine Tau et l'Aβ affectent négativement les cellules neuronales en compromettant l'approvisionnement en énergie et la réponse antioxydante, ce qui entraîne des troubles mitochondriaux et un dysfonctionnement synaptique. L'activité neuronale dépend fortement de l'énergie, et les neurones sont particulièrement sensibles aux perturbations de la fonction mitochondriale [49]. Les examens biochimiques systématiques du cerveau des patients atteints de la maladie ont débuté dans les années 1970. Ces études ont montré que les principales causes de cette maladie sont définies par une altération du fonctionnement neurochimique, notamment des déficits cholinergiques néocorticaux et présynaptiques liés à l'enzyme choline acétyltransférase (ChAT), responsable de la synthèse de l'acétylcholine (ACh).

En raison du rôle essentiel de l'acétylcholine (ACh) dans la fonction cognitive, une hypothèse cholinergique de la MA a été proposée. L'ACh est synthétisée dans le cytoplasme des neurones cholinergiques à partir de la choline et de l'acétyl-coenzyme A par l'enzyme ChAT, puis transportée vers les vésicules synaptiques par le transporteur vésiculaire d'acétylcholine. Dans le cerveau, l'ACh est impliquée dans plusieurs processus physiologiques tels que la mémoire, la vigilance, le traitement des

données sensorielles, l'acquisition de connaissances et d'autres fonctions critiques. Il a été observé que la détérioration des neurones cholinergiques se produit dans la maladie d'Alzheimer, entraînant une altération de la fonction cognitive et une perte de mémoire [50].

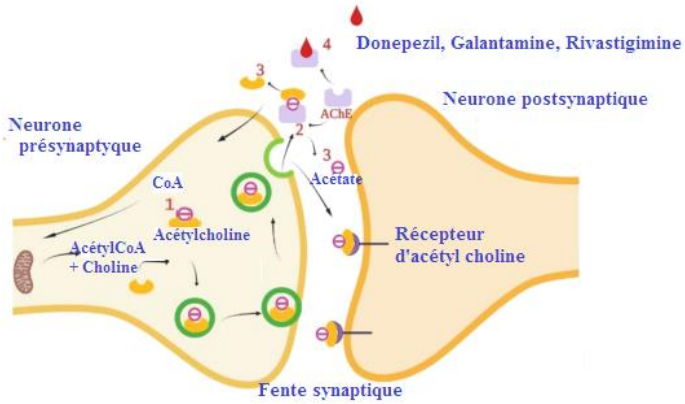


Figure 8 : Mécanisme d'action des inhibiteurs de l'acétylcholinestérase dans la MA.

(1) Ach: le neurotransmetteur est formé de choline et d'acétyle Co.

En présence de choline acétyltransferase, (2) l'ACh est transportée via la vésicule synaptique dans la fente synaptique, la divisant en acétate et en choline, (3) la choline est transportée dans la terminaison axonale pour une synthèse ultérieure de l'Ach dans le milieu environnant, (4) l'ACh est inhibée, augmentant ainsi à la fois le niveau et la durée de neurotransmetteur [51].

Pour cette raison, l'inhibition de l'AChE, l'enzyme responsable de l'hydrolyse de l'ACh au niveau de la synapse cholinergique, est la stratégie la plus établie pour augmenter le taux d'ACh [52]. Les inhibiteurs des enzymes acétylcholinestérase et butyrylcholinestérase responsables de l'hydrolyse d'Ach sont donc les médicaments appropriés pour remédier à la MA. Actuellement, les médicaments pharmaceutiques représentant des inhibiteurs du cholinestérase (ChI), comme la galanthamine, la rivastigmine, le donepezil et la tacrine, sont cliniquement appliqués. Cependant, l'action active de ces médicaments est limitée et a montré divers effets secondaires liés à la dose et à leurs modes d'action [53].

III. 1. 2. Principales causes de l'Alzheimer

III. 1. 2. 1. Formation des plaques amyloïdes

La protéine APP (Amyloid Precursor Protein) est très importante, car elle joue le rôle de récepteur de surface pour assurer les interactions entre les cellules. Parmi ses fonctions aussi : la formation du cytosquelette des neurones et la formation des synapses. Elle implique même la plasticité neuronale et la neurotransmission, en particulier dans le système cholinergique. Ceci constitue une fonction importante dans le cadre de la MA. Cette protéine possède une partie intracellulaire qui interagit avec la

protéine Tau, impliquée dans les lésions observées dans la maladie d'Alzheimer. De plus, elle joue un rôle majeur dans la protection des neurones contre le stress oxydatif. Dans un cerveau malade, la protéine APP est clivée par la sécrétase, produisant un peptide amyloïde β insoluble, participant ainsi à la formation d'autres plaques amyloïdes et de segments C99 et AICD [54]. Le peptide Aβ, un peptide de 40 à 42 acides aminés, s'accumule entre les neurones.

Cette accumulation induit une détérioration de la membrane cellulaire des neurones, entraînant une entrée progressive de calcium dans le neurone et provoquant ainsi une réaction inflammatoire qui détruit le neurone [55].

III. 1. 2. 2. Dégénérescence neuro-fibrillaire

L'analyse de coupes de tissus cérébraux provenant de patients atteints de la MA et de sujets témoins du même âge a révélé plusieurs anomalies caractéristiques. Parmi celles-ci, on note la présence d'enchevêtrements neurofibrillaires (NFT : neurofibrillary tangles) dans les neurones des mêmes régions du cerveau, lesquels diminuent à mesure que la maladie progresse. Au niveau moléculaire, il a été établi que les NFT sont constitués d'accumulations filamenteuses de la protéine tau associée aux microtubules. Contrairement à la protéine Tau présente dans les neurones sains [56].

III. 1. 3. Inhibition de l'AChE et BChE par les substances naturelles

Plusieurs plantes sont connues pour leur capacité potentielle à inhiber l'acétylcholinestérase ou à stimuler l'action de l'acétylcholine. Diverses substances bioactives de source naturelle telles que les alcaloïdes, comprenant l'indole, l'isoquinoline, la quinolizidine, la pipéridine et les alcaloïdes stéroïdiens. D'autre part, plusieurs AChEi non alcaloïdes et puissants ont été obtenus à partir de sources naturelles, y compris des terpénoïdes, des flavonoïdes et d'autres composés phénoliques qui ont prouvé des activités significatives : rajeunissantes et neurotoniques du système nerveux [57]. Par ailleurs, la *Tabernaemontana divaricata* L. (TD) a été exploitée dans la médecine traditionnelle thaïlandaise comme traitement pour améliorer et rétablir la tonicité musculaire, la vitalité et l'équilibre des nerfs, et l'identification de la composition en inhibiteurs de l'AChE, qui a été extraite de la racine de TD avec deux alcaloïdes bisindole, 19,20-dihydrotabernamine et 19,20-dihydroervahanine A comme principes actifs qui ont présenté une capacité inhibitrice de l'AChE plus élevée que la galantamine [58]. Selon Berkov et al. (2008), les alcaloïdes N-allyl-nor-galanthamine et N-(14-méthylallyl)-nor-galanthamine isolés des feuilles de *Leucojum aestivum* L. se sont révélés comme les puissants inhibiteurs de l'ACh plus actifs que la galanthamine [59]. Les alcaloïdes isolés, seules la sanguinine et la chlidanthine (alcaloïdes de type galanthamine), qui sont extraites de cinq espèces de *Hieronymiella marginata*, ont démontré une activité inhibitrice envers les deux enzymes [60], et les alcaloïdes indoliques d'*Ervatamia hainanensis* (coronaridine et voacangine) ont prouvé une plus forte inhibition d'AChE. Leur activité

inhibitrice de l'AChE peut être attribuable à la présence de la sous-unité voacangine. Cela est relié à la présence du groupement méthoxyle, tandis que le remplacement de la 10-hydroxycoronaridine par un groupe hydroxy sur le phényle affaiblit l'inhibition [61].

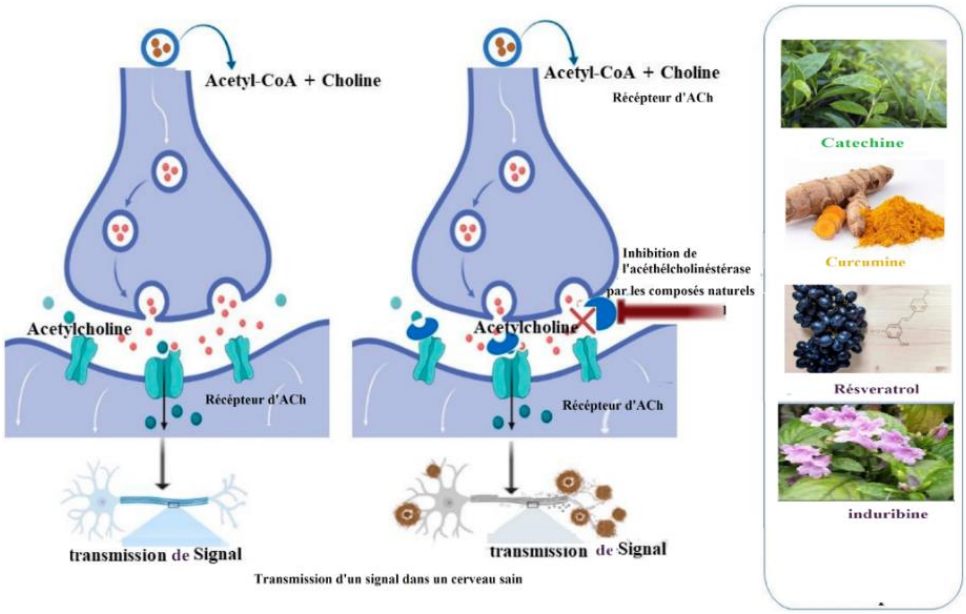


Figure 9 : Inhibiteurs naturels de l'AChE qui empêchent la dégradation de l'ACh [70].

III. 1. 4. Inhibition de l'AChE et BChE par les composés phénoliques

Un certain nombre de composés phénoliques et polyphénoliques a été étudié pour leur activité inhibitrice d'AChE à une concentration d'inhibiteur de 100 µM. Aucun des hydroxybenzoates (acide 4-hydroxybenzoïque, acide 3,4-dihydroxybenzoïque et acide 3,4,5-trihydroxybenzoïque), hydroxycinnamates (acide trans-4-hydroxycinnamique et acide trans-3,4-dihydroxycinnamique) testés n'a inhibé l'activité AChE. En revanche, la plupart des flavonoïdes ont inhibé l'activité de l'AChE. Notamment les deux, la curcumine et le resvératrol, sont des polyphénols étendus qui inhibent l'activité de l'ACHE, mais leur inhibition était plutôt faible, avec 76.6 % et 55.0 % d'inhibition à 100 µM, mais avec une large gamme d'efficacité [62].



Figure 10 : Rôle des polyphénols bioactifs dans la neurodégénérescence et la neuroprotection [63].

Tableau 1 : Quelques composés d'origine végétale qui ont des effets contre la MA [64].

Composé	Plante source	Action thérapeutique	Références
Rivastigmine	*Physostigma venensosum.* (Leguminosae)	Inhibition d'EACh dans le cortex et région hippocampe.	[65]
Glantamine	*Lycoris radiata* (L'Hér.)	Inhibition réversible d'EACh et potentialisation allostérique du récepteur nicotinique ACh.	[66]
Huperzine A	*Hyperzia serrata* (Thumb) *Trevis* (Lycopodiaceae)	Rétablit les déficits cognitifs par l'inhibition d'une manière réversible l'EACh.	[67]
Curcumine	*Curcuma longa* L.	Anti-amyloïdogène, anti-inflammatoire, anti-ECh, anti-β-sécrétase.	[68]
Resveratol	*Vitis vinifera* L. (vitaceae)	Éviter les troubles cognitifs et le stress oxydatif associé en réduisant la formation de plaque.	[69]

III. 5. Activité antidiabétique

III. 5. 1. Définition du diabète

Le diabète se caractérise par une hyperglycémie chronique, c'est-à-dire un taux de sucre trop élevé dans le sang, ce qui entraîne une concentration excessive de glucose (glycémie). Lors de la prise alimentaire, le taux de sucre sanguin augmente car les glucides se transforment principalement en glucose. Le pancréas détecte cette augmentation de la glycémie et les cellules bêta du pancréas, regroupées en amas appelés îlots de Langerhans, sécrètent alors de l'insuline. Ce dernier permet au glucose de pénétrer dans les muscles, les cellules, les tissus adipeux et le foie, où il peut être stocké et transformé. Cela entraîne une diminution du taux de glucose dans le sang. En dehors des repas, en cas de besoin énergétique accru ou de diminution du taux de sucre sanguin, une autre hormone appelée glucagon libère le glucose stocké dans le foie. Le maintien d'une glycémie stable dans le corps dépend

de l'équilibre de ces hormones. Ce système de régulation est perturbé en cas de diabète. Ainsi, le diabète est une maladie métabolique caractérisée par une hyperglycémie persistante dans le sang. Cette élévation de la glycémie peut être due soit à une insuffisance de sécrétion d'insuline par le pancréas, soit à une résistance des cellules à l'action de l'insuline [71]. Lorsqu'il y a diabète de type 1, le pancréas cesse de produire de l'insuline. Dans le cas du diabète de type 1, l'insuline externe doit être administrée quotidiennement. Ce type est causé par une mauvaise utilisation de l'insuline par les cellules de l'organisme. Pour traiter l'hyperglycémie chez les patients diabétiques de type 2, différents types de médicaments oraux agissent selon divers mécanismes. Par exemple, les biguanides réduisent la production de glucose dans le foie, les sulfonylurées bloquent les canaux potassiques pour augmenter la sécrétion d'insuline, les thiazolidinediones améliorent la sensibilité des récepteurs à l'insuline et du glucose périphérique [72], les inhibiteurs de l'alpha-amylase et de l'alpha-glucosidase comme l'acarbose, le voglibose et le miglitol retardent l'absorption des glucides dans l'intestin. Cependant, l'utilisation prolongée de ces médicaments peut entraîner l'apparition de nombreux effets secondaires tels que l'hypoglycémie, les migraines, les vertiges, les vomissements, les nausées et l'obésité, ce qui a stimulé la recherche de nouvelles substances naturelles hypoglycémiantes qui seraient plus efficaces, plus sûres, moins toxiques et moins coûteuses. Cela a encouragé l'intérêt des chercheurs pour le développement de molécules inhibitrices de l'alpha-amylase plus sécurisées. De nombreux extraits de plantes dérivés d'herbes et d'épices aux propriétés antidiabétiques reconnues sont étudiés pour identifier les molécules ou extraits qui possèdent des pouvoirs antidiabétiques. En particulier, les chercheurs se penchent sur les plantes dont l'utilisation est documentée dans la médecine traditionnelle comme étant efficaces et moins toxiques [73].

III. 5. 2. Mécanisme d'inhibition de l'alpha amylase et alpha glucosidase

Les glucides constituent la principale source de calories dans la plupart des régimes. Cependant, en inhibant leur absorption, l'apport calorique est réduit, ce qui peut améliorer la perte de poids. L'α-amylase est une enzyme qui hydrolyse les liaisons glycosidiques α-1,4 des polysaccharides liés α, produisant des produits de faible poids moléculaire tels que le glucose, le maltose et le maltotriose. D'autre part, l'α-glucosidase catalyse l'hydrolyse de fractions glucose non réductrices liées en α-1,4 à partir de disaccharides ou d'oligosaccharides. Actuellement, l'hyperglycémie est l'un des troubles nutritionnels les plus courants dans le monde. Une nouvelle approche thérapeutique pour traiter cette maladie est l'application d'inhibiteurs naturels, tels que les polyphénols, qui contrôlent la digestion de l'amidon et régulent la glycémie. Les polyphénols alimentaires ont montré une activité inhibitrice potentielle contre l'α-amylase et l'α-glucosidase [75].

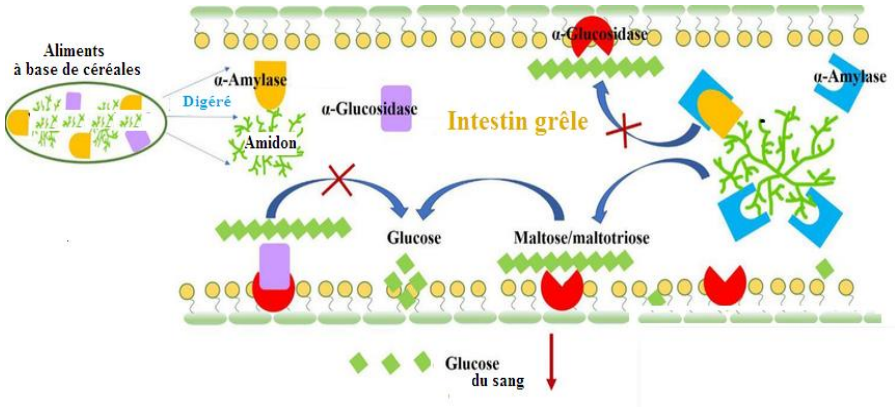


Figure 11 : Inhibiteurs de l'α-amylase et de l'α-glucosidase présents dans les aliments céréales [74].

III. 5. 3. Inhibition de l'α-glucosidase et l'α-amylase par les composés bioactifs

L'utilisation de produits pharmaceutiques comme l'acarbose et le voglibose pour traiter le diabète de type 2 présente plusieurs effets secondaires, ce qui incite à rechercher des alternatives naturelles telles que les plantes contenant différents composés bioactifs et présentant moins d'effets secondaires. La régulation de la glycémie postprandiale peut être obtenue en inhibant l'α-amylase et l'α-glucosidase, car ce sont des enzymes clés dans la digestion de l'amidon [75]. La stratégie visant à réduire la digestibilité des glucides en contrôlant l'activité de ces deux enzymes hydrolysantes pour contrôler l'hyperglycémie postprandiale est considérée comme un traitement prophylactique viable du diabète de type 2.

Divers principes issus des plantes comprennent notamment des glycosides, des alcaloïdes, des hypoglycanes, de la gomme galactomannane, des polysaccharides, des stéroïdes, des peptidoglycanes, de la guanidine, des peptides glycoliques et des terpénoïdes, qui possédent une activité antidiabétique parfois remarquable. L'extrait de graines de *S. cumini* a conduit à une hypoglycémie significative chez les rats diabétiques [76]. Les extraits de méthanol, d'hexane et d'acétate d'éthyle, issus de deux types d'*Amaranthus caudatus* L. ont montré une activité inhibitrice de l'α-amylase (le taux d'inhibition est supérieur à 80 % à une dose de 0,251 mg/mL). En outre, d'autres plantes médicinales indiennes ont confirmé leur pouvoir inhibiteur de l'α-amylase, parmi elles *Mangifera indica* L., *Embelia ribes Burm* et *Phyllanthus mader* [77].

IV. Activité antibactérienne

IV. 1. Biofilm bactérien

Les biofilms bactériens se composent de cellules bactériennes enrobées dans une matrice polymérique et attachées ou non à une surface, et intégrées dans un substrat autoproduit, une matrice extracellulaire connue sous le nom de substance polymère extracellulaire (EPS). Les bactéries peuvent survivre dans des conditions environnementales hostiles grâce au biofilm qui les protège. Les cellules présentes dans le biofilm ont la capacité de se défendre contre le système immunitaire et de résister

beaucoup plus aux antibiotiques et aux désinfectants que les cellules bactériennes planctoniques. La capacité de former un biofilm est maintenant reconnue comme une caractéristique distinctive de nombreux microorganismes. Pour prévenir, diagnostiquer et traiter les infections associées aux biofilms, de nouvelles méthodes doivent être mises en place. Différents types d'antibiotiques sont utilisés pour traiter les maladies infectieuses causées par des bactéries, y compris les bactéries multi-résistantes [78]. Cependant, augmenter la dose d'antibiotiques pour traiter ces infections peut entraîner des effets secondaires indésirables tels que la diarrhée, la nausée, les allergies, et surtout, accélérer la résistance des bactéries aux antibiotiques commerciaux. Cette résistance est un problème croissant, car elle réduit l'efficacité des traitements existants et peut mener à des situations thérapeutiques difficiles, voire impossibles, dans certains cas. Ceci constitue un grand danger urgent pour la santé publique mondiale. C'est pourquoi les scientifiques recherchent de nouveaux agents antimicrobiens alternatifs, peut-être d'origine naturelle, qui empêchent la formation de biofilms [79]. La plupart de ces derniers sont caractérisés comme un assemblage de populations bactériennes retenues à divers types de surfaces telles que les tissus vivants, les matériaux médicaux, ou d'autres matériaux industriels, les eaux potables et surtout dans les milieux entre les surfaces solides et liquides. En effet, la plupart des micro-organismes sur terre (99 %) vivent dans des biofilms, où les colonies sont enveloppées d'une matrice polymérique composée de protéines (1-60 %), d'acides nucléiques (ADN) (1-10 %) et de polysaccharides (40-95 %), ainsi que de lipides (1-40 %). Tous ces polymères sont sécrétés par les bactéries à l'extérieur des cellules bactériennes [80].

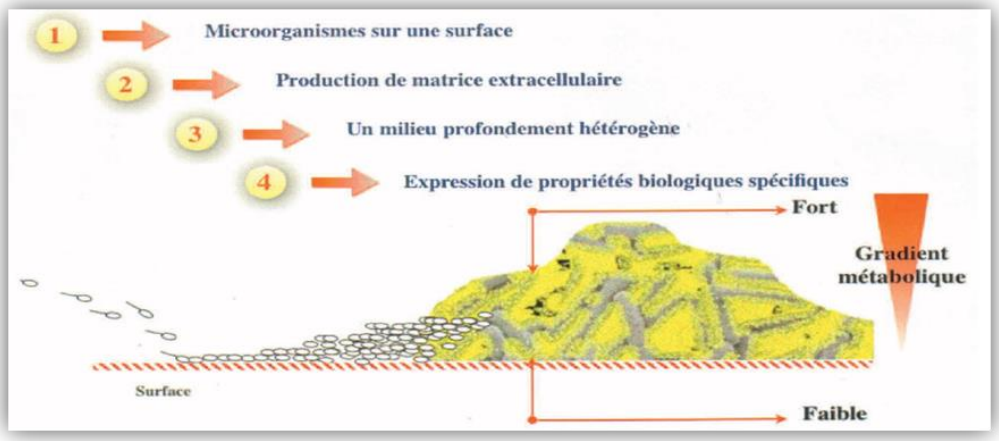


Figure 12 : Définition de biofilm [83].

IV. 1. 1. Formation des biofilms

La formation de biofilms est un processus complexe où les cellules microbiennes passent d'une forme planctonique à une forme sessile. Ce processus se déroule en plusieurs étapes (Figure 13) : d'abord, les bactéries adhèrent de manière réversible à une surface, puis elles s'agglutinent et se

multiplient pour former des micro-colonies. Les cellules se fixent ensuite de manière irréversible, favorisant l'agrégation et la synthèse de polymères pour former la matrice extracellulaire. Le biofilm mûrit ensuite en développant des structures en champignon compactes avec des microstructures tridimensionnelles, y compris des canaux pour les nutriments et l'eau. Ce processus peut se produire en quelques heures seulement. À pleine maturité, le biofilm forme une communauté tridimensionnelle structurée atteignant une densité cellulaire optimale, puis enclenche un mécanisme de dispersion via l'activité enzymatique des hydrolases. Ces enzymes lysent partiellement la matrice extracellulaire, libérant progressivement des cellules planctoniques capables de migrer vers de nouveaux sites. Ce processus assure à la fois la pérennité de la communauté microbienne et la colonisation de niches écologiques disponibles, illustrant l'équilibre dynamique entre stabilité collective et dissémination opportuniste caractéristique des biofilms matures [75].

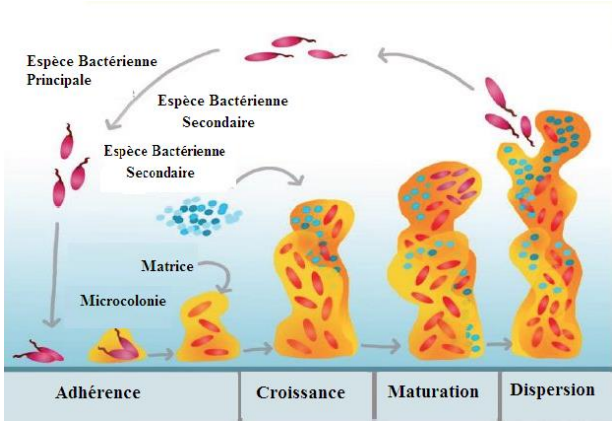


Figure 13 : Étapes de formation de biofilm [80].

Le biofilm complètement formé représente une structure complexe, et les bactéries présentes dans différentes zones du biofilm peuvent exprimer différents gènes. La dernière phase de l'élaboration d'un biofilm est le détachement et la dispersion des cellules bactériennes. Ces cellules ont la capacité de former de nouveaux biofilms sur d'autres surfaces après leur détachement de l'ancienne surface. Les cellules bactériennes peuvent se détacher grâce à plusieurs mécanismes, notamment par des mouvements cellulaires et par l'action d'enzymes qui dégradent la matrice polymérique ainsi que le substrat sur lequel le biofilm est attaché. Ces cellules ont la capacité d'adhérer à de nouvelles surfaces et de reformer un biofilm. Le détachement des cellules peut être provoqué par plusieurs facteurs, y compris des perturbations mécaniques, la dégradation enzymatique de la matrice polymérique, l'affinité de déplacement, la synthèse d'agents tensioactifs comme les rhamnolipides et le détachement de l'exopolysaccharide. Il est bien connu que les bactéries répondent à une variété de signaux environnementaux, tels que la concentration en éléments nutritifs ainsi que la densité de cellules

bactériennes, le phénomène, mieux connu sous le nom de quorum-sensing, joue un rôle crucial dans les différentes étapes de la formation du biofilm [80].

IV. 1. 2. Résistance des biofilms

Les bactéries présentes dans un biofilm sont généralement plus résistantes aux antibiotiques et aux antiseptiques que les mêmes bactéries à l'état planctonique. Cette résistance accrue des biofilms aux antibiotiques peut s'expliquer par plusieurs mécanismes, le plus notable étant la matrice extracellulaire qui pourrait servir de barrière protectrice contre les conditions défavorables et les agents antimicrobiens [81]. Les mécanismes de résistance aux antimicrobiens comprennent les systèmes d'exportation actifs au sein des membranes des bactéries, la prévention de l'entrée des antimicrobiens dans les cellules des bactéries pathogènes, la destruction enzymatique des agents antimicrobiens, la production de biofilms épais, la modification des cibles des antimicrobiens et la protection des sites d'action bactériens contre les antimicrobiens. De plus, les bactéries multi-résistantes ont développé des mécanismes favorisant le transfert d'ADN portant des déterminants génétiques de résistance à d'autres espèces pathogènes, que ce soit en milieu clinique, dans l'industrie alimentaire, dans l'intestin humain ou dans l'agriculture [82].

IV. 1. 3. Inhibition des polyphénols contre les biofilms

Les composés phénoliques présentent un pouvoir antibactérien très remarquable. En réagissant avec les peptidoglycanes bactériens de la paroi cellulaire, ils peuvent endommager les membranes cytoplasmiques, inhiber la synthèse de la base de l'ADN ainsi que la synthèse de la paroi cellulaire [6]. D'autre part, l'activité inhibitrice des polyphénols issus des plantes sur les biofilms s'opère de manière plus douce, ce qui permet d'éradiquer le biofilm en réduisant la multiplication des bactéries et le développement de la résistance grâce à un mécanisme de quorum-sensing [84]. La capacité des composés actifs d'origine végétale sur la formation de biofilm a été étudiée dans différentes recherches. Par exemple, Manner et al. (2013) ont démontré l'efficacité des flavonoïdes pour inhiber la formation de biofilm de *S. aureus* [85]. Matilla-Cuenca et al. (2020) ont focalisé leur étude sur les flavonoïdes agissant sur la protéine associée au biofilm *staphylococcique* (BAP) et ont constaté que la quercétine, la myricétine et la scutellaréine sont d'excellents inhibiteurs de biofilms [86].

Pruteanu et al. (2020) ont systématiquement exploré les principaux flavonoïdes végétaux en tant qu'agents antibiofilm potentiels, en utilisant différents types de biofilms produits par des bactéries gram-négatives et gram-positives. Ils ont observé que la flavone, la lutéoline, ainsi que les flavonols myricétine, morine et quercétine, réduisent considérablement le volume de la matrice extracellulaire dans les biofilms de macro-colonies d'*escherichia coli* [87].

IV. 2. Activité anti-quorum-sensing /quorum quenching

IV. 2. 1. Définition de quorum sensing

Depuis 1970, la découverte de la bioluminescence chez Vibrio fischeri (anciennement Photobacterium fischeri) a révélé que les bactéries, loin d'être des microorganismes indépendants, utilisent le quorum sensing (QS) pour communiquer via des auto-inducteurs, régulant ainsi diverses fonctions collectives comme la virulence, la formation de biofilm et la résistance aux antibiotiques [88]. L'exploration du QS chez les bactéries repose sur des signaux chimiques cruciaux pour l'évolution d'une souche bactérienne infectieuse vers une souche pathogène. Cela est particulièrement pertinent pour des espèces comme l'enteropathogenic *Escherichia coli* (EPEC), qui appartient à un groupe d'agents pathogènes comprenant également les entérohémorragiques *E. coli* (EHEC), *Citrobacter rodentium* et *Hafnia alvei*. Ces bactéries provoquent une lésion d'adhésion et de balayage (AE) sur les cellules épithéliales intestinales. Le quorum sensing joue un rôle clé dans la transcription des gènes impliqués dans ces processus pathogènes, permettant aux bactéries de synchroniser leur virulence et d'adapter leur comportement en fonction de la densité de la population [89].

IV. 2. 2. Molécules impliquées dans quorum sensing

Les bactéries à gram positif telles que *Staphylococcus* spp*, Clostridium* spp, et *Enterococcus* spp., utilisent des peptides cycliques d'environ 7 à 11 acides aminés pour la signalisation, tandis que les bactéries à gram négatif emploient les acyl-homosérine lactones (AHLs), qui diffusent librement à travers les membranes cellulaires pour réguler l'expression génique via le quorum sensing (QS) [90].

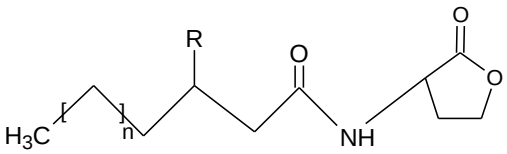


Figure 14 : Principale molécule signal du QS des bactéries gram-négatives (N-Acyle Homosérine Lactone, AHL) [91].

IV. 2. 3. Mécanisme de quorum sensing chez le gram positive

Les bactéries gram-positives utilisent des oligopeptides, appelés peptides auto-inducteurs (PAI), pour communiquer avec d'autres bactéries. Ces substances peuvent être linéaires ou cycliques et sont produites sous forme de précurseurs, subissant des phosphorylations pour permettre le transfert du signal à l'extérieur de la cellule. Les PAI interagissent via un système à deux composants : le récepteur histidine kinase (HK) capte le PAI et active le régulateur de réponse (RR) dans le cytoplasme. Ce processus active ensuite la synthèse de plusieurs PAI, comme observé chez *Staphylococcus aureus*,
qui utilise ce type de quorum sensing (QS) pour coordonner ses comportements collectifs [92].

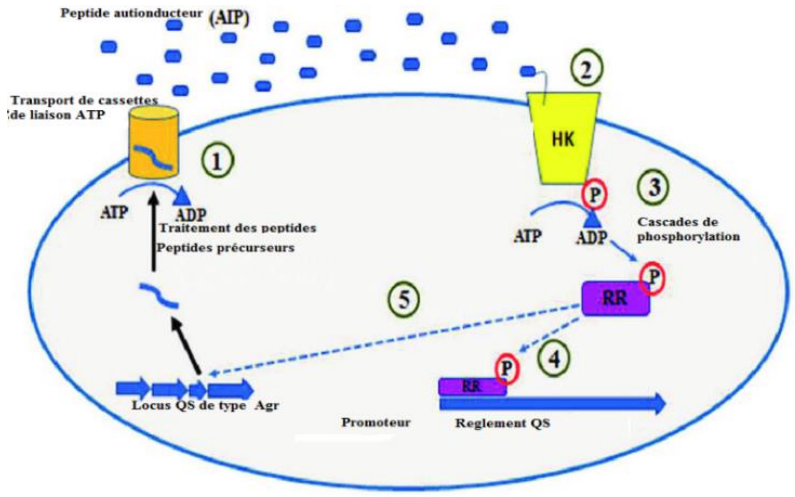


Figure15 : Mode d'action général du QS chez les bactéries gram-positive [92].

IV. 2. 4. Mécanisme de QS chez gram négatif

Le système de QS est principalement réalisé par les molécules d'acyle homosérine lactone, produites par l'enzyme LuxI, qui traversent passivement la membrane cellulaire bactérienne. Lorsqu'une concentration suffisante est atteinte, ces molécules activent le récepteur spécifique LuxR intracellulaire, qui à son tour active l'expression coordonnée des gènes cible. Parallèlement, les peptides de détection du quorum sont synthétisés par les ribosomes bactériens sous forme de protéines pro-peptidiques et subissent des modifications post-traductionnelles lors de leur excrétion par transport actif. Ces peptides se lient aux récepteurs membranaires associés, qui s'autophosphorylent et activent les régulateurs de réponse intracellulaires via le transfert de phosphore. Enfin, ces régulateurs phosphorylés induisent une expression accrue des gènes cibles [93].

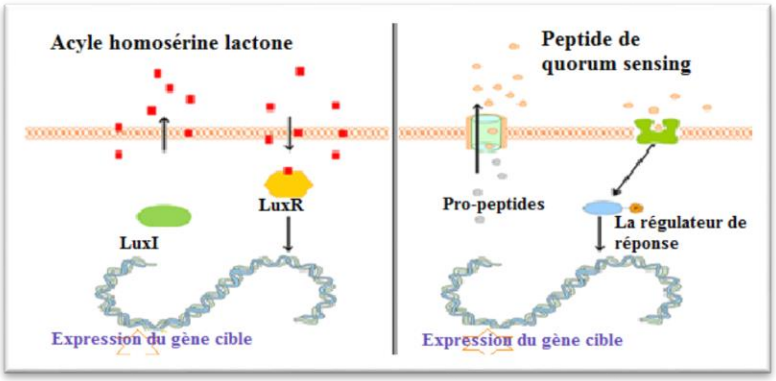


Figure 16 : Mécanisme typique de détection du quorum gram négatif [94].

IV. 2. 5. Activité du QQ

Le QS joue un rôle crucial dans l'activation et la régulation de nombreux processus physiologiques bactériens, souvent pathogènes pour l'homme. Pour contrer ces mécanismes, la stratégie du quorum quenching (QQ) a été développée, visant à interrompre la communication entre bactéries. Cette approche peut intervenir à l'intérieur ou à l'extérieur de la cellule en ciblant la synthèse et la détection des molécules signal. Les composés inhibiteurs, appelés inhibiteurs du QS (QSI), bloquent ces processus. En désactivant le QS chez les agents pathogènes, on réduit leur virulence sans les tuer, ce qui diminue la pression sélective et retarde l'émergence de résistances aux médicaments. Le QS est donc une cible idéale pour la thérapie anti-virulence, et le QQ offre des solutions thérapeutiques prometteuses pour la protection et le traitement des infections bactériennes [95].

Tableau 2 : Quelques inhibiteurs d'exploration de quorum avec quorum prouvé [95]**.**

Nom	Origine	Mécanisme d'action	Effet QSI	Référence
N-2-phenyl-isobutylramide 3-methyl-N	*Holabacilluss alinus* Plante marine	Compétition avec les lactones N-acyle-homosérine pour le récepteur	Inhibition du système QS de l'AHL dans le biocapteur *Chromobacterium violaceum*	[96]
(2-phenylethyl) -butylramide	*Holabacilluss alinus*	Possible analogique AHL	Inhibition du système QS de l'AHL dans le biocapteur *Chromobacterium violaceum*	[96]
Vanilline	Commercial	Modifier la structure de l'AIL pour exclure la liaison de l'AHL à la protéine de récepteur	Le bio-encrassement de la membrane RO peut être réduit en supprimant la production d'EPS par les communautés marines	[97]
Furanone	*Delisea pulchra*	Furanones halogénées se lient à la protéine du récepteur AHL et réduire la demi-vie de la protéine jusqu'à 100 fois et ainsi déstabiliser l'activateur transcriptionnel	Interfère avec la motilité grumeleuse de *Serratia liquefaciens*, réduisant les concentrations cellulaires de la protéine LuxR.	[98]
Canavanine	*Medicago sativa*	Inhibe l'expression et la production d'EPS II par les gènes Sin/ExpR de *S.meliloti*	Inhibition de la production de violacéine chez *Chromobacterium violaceum*	[99]

IV. 2. 6. Inhibition de la production de violacein chez *C. violaceum* CV12472

Chromobacterium violaceum (*C. violaceum*) est une bêta-protéobactérie gram-négative qui se distingue par la production de colonies violettes lisses sur les supports de laboratoire courants, grâce au pigment violacéine. Ce pigment est codé par l'opéron vio, dont l'expression est régulée par le QS, un mécanisme qui permet à la bactérie de détecter la densité de sa population. En raison de cette régulation observable et quantifiable, *C. violaceum* est largement utilisée comme organisme modèle dans les études sur le QS. Bien que rarement pathogène pour l'homme, les infections causées par cette bactérie sont souvent graves et potentiellement fatales. La violacéine, une molécule bioactive dérivée du tryptophane, présente des propriétés médicales prometteuses, notamment comme agent anticancéreux. Cela a contribué à enrichir les recherches sur le QS et les applications biotechnologiques potentielles de cette bactérie [100].

IV. 2. 7. Inhibition de la motilité par essaimage sur *P. aeruginosa* PA01

La *Pseudomonas aeruginosa* est une bactérie opportuniste pathogène à gram négatif, responsable d'infections courantes telles que la pneumonie acquise sous ventilation mécanique (PAV). De plus, la *P. aeruginosa* est caractérisé par un fort degré de pathogénicité clinique, avec un taux de mortalité atteignant 38 % chez les patients atteints de VAP. Dernièrement, *P. aeruginosa* est devenu un exemplaire pour l'analyse du contrôle des facteurs de virulence par quorum-sensing. La détection du quorum (ou autoinduction) est l'expression contrôlée de gènes spécifiques en réponse à des signaux chimiques extracellulaires produits par les bactéries elles-mêmes. Généralement, les cellules émettent un signal de N-acyl homosérine lactone appelé autoinducteur (AI), qui est généralement synthétisé par une AI synthase de type LuxI, dans l'environnement. À des densités cellulaires élevées, l'IA atteint une concentration seuil et se lie à une protéine de type LuxR qui est alors capable d'activer les gènes cibles. À ce jour, des systèmes de détection de quorum de type luxR-luxI et leurs IA de N-acyl homosérine lactone ont été trouvés dans de nombreuses bactéries à gram négatif différentes. Chez la *P. aeruginosa*, les systèmes de détection de quorum las (lasR-lasI) et rhl (rhlR-rhlI) dirigent la synthèse de deux IA distinctes, la N-(3-oxododécanoyl) homosérine lactone (3OC12-HSL) (anciennement appelée PAI-1) et la N-butyryl homosérine lactone (C4-HSL) (anciennement appelée PAI-2) [101]. La motilité en essaim est engagée de manière significative dans divers types chez *P. aeruginosa*. Alors il apparaît que la résistance aux antibiotiques est plus intense dans les bactéries essaimées par rapport aux bactéries non essaimées et ces cellules manifestent un accroissement de la transcription génique pour la synthèse de facteurs de virulence comparé à celle de cellules nageuses [102].

V. Corrosion : causes, conséquences et stratégies de prévention

V. 1. Définition

La corrosion est un phénomène de destruction d'un métal ou d'un alliage métallique, quelle que soit la nature du métal, qu'il soit ferreux ou non [103]. Cette détérioration se produit suite à une réaction chimique ou électrochimique avec le milieu corrosif (comme l'oxygène, l'humidité, etc.). Le processus de corrosion détériore le fer présent dans l'acier, entraînant sa transformation directe en rouille (oxyde de fer III hydraté). Il s'agit d'un phénomène complexe qui dépend de plusieurs facteurs tels que l'environnement, la composition du métal et ses propriétés. La corrosion entraîne des coûts directs tels que le remplacement des structures et de la main-d'œuvre corrodées, ainsi que des coûts indirects tels que des pertes de production, une perte d'efficacité, une contamination des produits, etc., totalisant des milliards de dollars de pertes chaque année. En raison de sa nature à long terme, la corrosion est souvent sous-estimée lors de la conception des équipements et des structures, entraînant des pertes supplémentaires [104]. Les réactions électrochimiques de corrosion des métaux, en principe, correspondent à une réaction d'oxydo-réduction [113], à savoir : la nature électrochimique de la corrosion en milieux aqueux d'un métal M de valence z qui se corrode est le siège de deux réactions simultanées [114]. La réaction d'oxydation d'un métal est appelée la dissolution du métal dans la solution ou l'électrolyte avec libération d'électrons (anodique).

$$M \rightarrow M^{+2} + 2e^{-}$$

La réaction de réduction d'un agent oxydant dissous dans la solution est appelée "réaction cathodique" :

$$OX^{+n} + 2e^{-} \rightarrow Red$$

Pour ce dernier, deux cas de modèles peuvent se rencontrer :

- ✓ L'oxygène est l'agent oxydant dans un milieu aéré.
- ✓ L'eau est l'agent oxydant dans un milieu désaéré, pour lequel (H_2O ou H^+).

La réaction d'oxydation se produit au niveau du matériau. Ainsi, un acier immergé dans un milieu corrosif (marin ou fluvial) subit une réaction anodique de dissolution du fer, à laquelle s'associe la réaction cathodique de réduction de l'oxygène dissous, des ions H_3O^+ ou de l'eau :

- ✓ Réaction anodique : $Fe \rightarrow Fe^{+2} + 2e^{-}$.
- ✓ Réaction cathodique : $O_2 + 2H_2O + 4e^{-} \rightarrow 4OH^{-}$.

Les oxydants les plus communs sont :

- ✓ La molécule d'eau selon la réaction : $H_2O + e^{-} \rightarrow ½\ H_2 + OH^{-}$.
- ✓ Les ions H^+ par : $H^+ + e^{-} \rightarrow ½\ H_2$

L'oxydation des métaux libère des ions ferreux (Fe^{2+}), qui peuvent réagir pour former de l'hydroxyde ferreux ($Fe(OH)_2$), constituant ainsi une barrière protectrice à l'interface métal/solution.

$$Fe(OH)_2 + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$$

$Fe(OH)_2$ Se convertis en hydroxyde ferrique ($Fe(OH)_3$) par l'action de l'oxygène dissous.

$$Fe(OH)_2 + \frac{1}{2}H_2O + \frac{1}{4}O_2 \rightarrow Fe(OH)_3$$

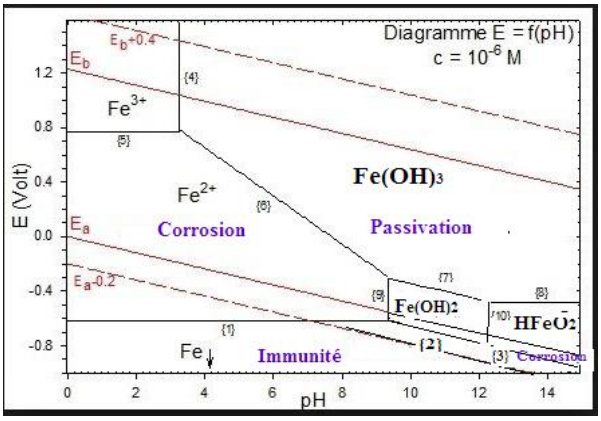


Figure 17 : Diagramme de Pourbaix du Fer (Fe) [105].

En milieu acide, la dissolution du fer est accélérée par la formation des ions Fe^{2+} et Fe^{3+}, ce qui provoque l'augmentation du taux de corrosion. Tandis qu'en milieux basiques ou neutres, ces ions se trouvent sous formes d'hydroxydes $Fe(OH)_2$ et $Fe(OH)_3$ qui entrainent la passivation de la surface du métal et limitent l'évolution de la corrosion.

V. 2. Types de corrosion

V. 2. 1. Corrosion uniforme

La corrosion uniforme est la forme la plus ancienne de corrosion et la plus facile à repérer. Elle se manifeste par une détérioration régulière de la surface de l'acier. La matière se dégrade plus rapidement en fonction des facteurs environnementaux et conduit à la formation de rouille. L'effet de la corrosion peut être mesuré en évaluant la diminution de l'épaisseur par an (en µm/an), les valeurs moyennes par matériau étant connues. Dans ce cas, l'espérance de vie d'un matériau est quantifiable [106].

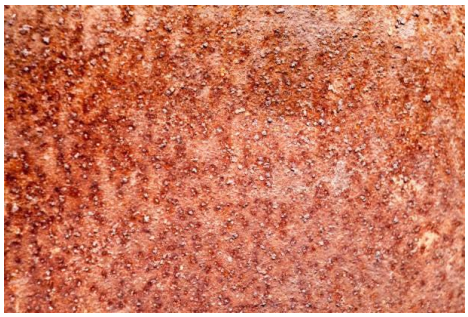


Figure 18 : Corrosion uniforme [107].

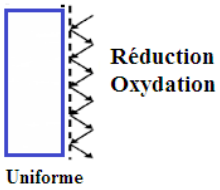


Schéma 1 : Mécanisme de la corrosion uniforme [107].

V. 2. 2. Corrosion localisée

La corrosion qui n'est pas régulièrement répartie sur toute la surface, mais se localise sur une petite partie de la surface, est due à des zones hétérogènes sur le matériau ou dans l'environnement. Il s'agit d'un processus agressif de l'environnement dans des positions spécifiques d'une surface métallique. Ces sites sont anodiques, par opposition aux parties non attaquées, qui sont cathodiques. Il existe différents types de corrosion localisée : la corrosion par piqûres, la corrosion galvanique, la corrosion par aération différentielle, la corrosion sélective [108].

V. 2. 3. Corrosion par piqûre

Il s'agit d'une corrosion localisée qui entraîne la formation de petits trous à la surface d'un matériau. Ce phénomène de corrosion se produit lorsque la couche externe se dégrade de manière limitée et non uniforme. Les creux peuvent se corroder très rapidement à l'intérieur, tandis que d'autres parties de la surface restent intactes. Les métaux passifs tels que le titane, l'acier inoxydable et l'aluminium sont facilement sujets à ce type de corrosion lorsque la couche externe d'oxyde se forme et qu'elle est ensuite corrodée localement [107].



Figure 19 : Illustration de la corrosion par piqure [107].

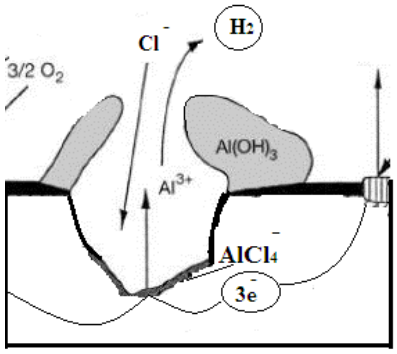


Schéma 2 : Mécanisme de la corrosion par piqure [107].

V. 2. 4. Corrosion galvanique

Cette forme de corrosion se produit lorsque deux métaux différents sont en contact (ou lorsqu'il y a un électrolyte conducteur entre les deux, ce qui est souvent le cas avec l'eau). Le métal qui se corrode le plus rapidement (le moins "noble") devient l'anode, tandis que le métal qui se corrode moins rapidement devient la cathode, et sa corrosion est ralentie par rapport à l'anode. Ce type de corrosion ne provoque la destruction que d'un seul des métaux en contact, le métal le plus noble étant protégé. Ce processus, appelé protection cathodique, est utilisé intentionnellement pour protéger certains métaux en les associant à d'autres, notamment pour protéger les structures métalliques enterrées ou immergées. L'aluminium et l'acier inoxydable présentent des avantages distincts : l'aluminium est connu pour sa légèreté, sa conductivité thermique et sa résistance à la corrosion, tandis que l'acier inoxydable est solide et résistant à la corrosion. Cependant, lorsque ces deux métaux sont en contact, cela peut conduire à une corrosion galvanique [112].



Figure 20 : Corrosion galvanique [112].

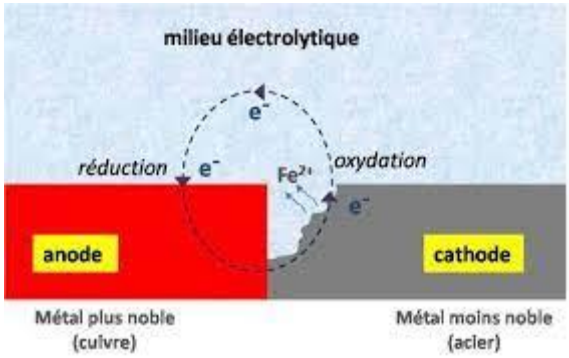


Schéma 3 : Mécanisme de la corrosion galvanique [112].

V. 2. 5. Corrosion caverneuse

La corrosion caverneuse se produit lorsque l'aération est inégale. L'élévation de la concentration en ions chlorure dans certains fluides induits une diminution du pH, ce qui provoque l'initiation d'une corrosion caverneuse, sachant que les ions chlorures sont des facteurs corrosifs très agressifs [109]. Lorsqu'il y a une variation de concentrations en ions ou en gaz dissous dans l'électrolyte, cela entraîne la formation d'une pile électrochimique, et ce type de détérioration est généralement appelé corrosion par crevasse ou corrosion caverneuse [111].



Figure 21: Corrosion caverneuse [110].

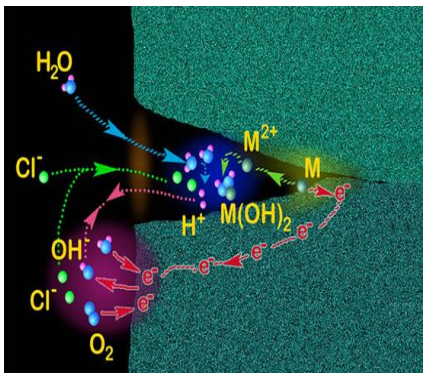


Schéma 4 : Mécanisme de la corrosion caverneuse [110].

V. 2. 6. Corrosion inter-granulaire (CIG)

Cette corrosion est une attaque préférentielle qui se produit aux endroits des joints de grains d'un métal ou d'un alliage exposé à l'environnement corrosif (Figure 22). Elle est due soit à l'accumulation d'impuretés dans le joint, soit à l'inégalité locale dans les proportions de constituants du métal, soit aux différences potentielles entre la région limite des grains et tous les précipités. L'attaque des grains de bout, la chute des grains et le terme "sucre" sont des termes supplémentaires parfois utilisés pour décrire cette corrosion inter-granulaire [112].

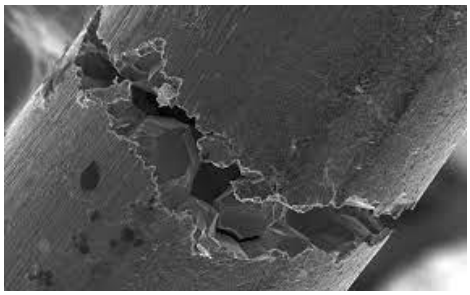


Figure 22 : Corrosion inter-granulaire [115].

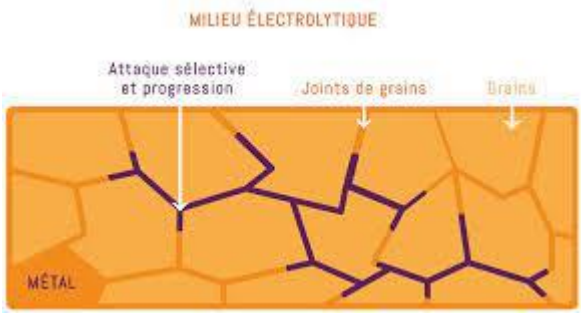


Schéma 5 : Mécanisme de corrosion inter-granulaire [116].

V. 2. 7. Corrosion sélective

Ce processus de corrosion se caractérise par la décomposition sélective de l'un des métaux de l'alliage lorsque cet alliage est exposé à un liquide, produisant des sels difficilement solubles. La dézincification du laiton est l'exemple le plus connu, conduisant à une élimination du zinc. Il s'agit d'un phénomène au cours duquel le zinc est électro-chimiquement réagi et préférentiellement dissous à partir des alliages cuivre-zinc avec une proportion massique de zinc supérieure à 15 %, créant ainsi une couche de cuivre poreuse dont la résistance et la rigidité diminuent notablement. La graphitisation est un processus d'élimination partielle des composants métalliques, laissant le graphite persister. Le fer est sélectivement dissous à partir de la fonte grise, générant un résidu de graphite poreux [117].

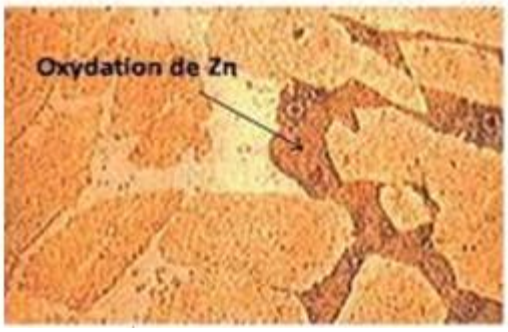


Figure 23 : Aspect de la corrosion sélective [112].

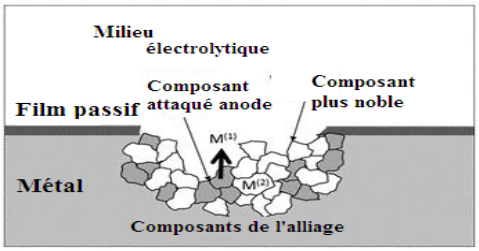


Schéma 6 : Mécanisme de la corrosion sélective [112].

V. 2. 8. Corrosion sous contrainte

Ce type de corrosion correspond à une fissuration du métal résultant de l'action combinée d'une force mécanique et d'une réaction électrochimique. Elle est connue comme un processus de propagation de la dégradation du métal jusqu'à la destruction complète de l'alliage sous l'effet conjugué de l'action mécanique et de la réaction corrosive [118].



Figure 24 : Corrosion sous contrainte [118].

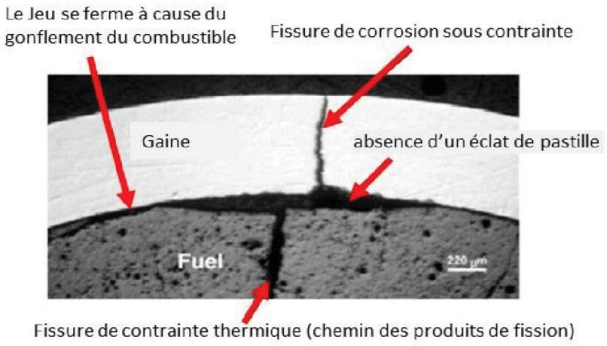


Schéma 7: Mécanisme de la corrosion sous contrainte [118].

V. 2. 9. Facteurs de corrosion

Le processus de corrosion est influencé par différents facteurs qui interagissent entre eux. Parmi ces facteurs [112] :

- ✓ Facteurs de fabrication : le pourcentage des constituants métalliques influence la rigidité et la résistance de l'alliage.
- ✓ Facteurs liés à l'environnement : le pH, la température, la pression, la quantité d'oxygène, les impuretés, etc., déterminent le type de corrosion qui se produit sur l'alliage.
- ✓ Facteurs liés au vieillissement du métal : le mode de propagation de l'oxygène ou d'autres gaz (comme le CO_2), les changements des couches protectrices de l'alliage.
- ✓ Les méthodes de traitement des matériaux et les modes d'utilisation : l'homogénéité de la surface, les morphologies des pièces métalliques, etc.

V. 2. 10. Corrosion des aciers en milieu maritime

Les solutions salines et l'eau de mer sont extrêmement corrosives pour de nombreux métaux, en particulier ceux non protégés. Le chlorure de sodium favorise la corrosion, notamment sous forme de rouille sur le fer et l'acier. Yang et al. (2010) et Zhang et al. (2009) [121,122] ont examiné l'impact de la pression hydrostatique dans une solution de NaCl sur la résistance à la corrosion de différents matériaux, à savoir l'alliage Fe-20Cr, l'acier à haute résistance Ni-Cr-Mo-V et le nickel. Leur travail s'est concentré sur l'analyse détaillée du mécanisme de la corrosion par piqûres, mettant en évidence une augmentation de la sensibilité à la corrosion sous une pression hydrostatique plus élevée.

La disposition de l'eau de mer est étonnamment stable, les écarts au sein d'une même mer sont minimes, et les distinctions entre les différentes mers ne sont pas encore entièrement comprises. L'eau de mer est composée à 96.5 % d'eau pure et à 3.5 % de substances dissoutes. Par conséquent, la composition moyenne de l'eau de mer est la suivante : Les eaux côtières varient régulièrement entre un pH moyen de 7.5 et 8.5 en fonction de l'habitat [123].

V. 3. Prévention de la corrosion

L'acceptation de procédures protectrices repose exclusivement sur de nombreux facteurs ; par conséquent, selon Vernon, les techniques de précaution contre la corrosion peuvent être classées en quatre espèces principales : variation de l'environnement, changement du métal, modification des procédures et enrobage protecteur [119].

À titre d'illustration, les méthodes de protection adoptées dans le secteur industriel comprennent le choix des matériaux en fonction des conditions environnementales spécifiques et la réalisation des équipements en évitant les configurations géométriques susceptibles de provoquer la corrosion et en prévenant les combinaisons problématiques entre métal et métal ou métal et non-métal qui facilitent la

corrosion. En outre, il est essentiel de réduire les effets mécaniques, notamment les contraintes susceptibles de provoquer le frottement, la corrosion par fatigue ou la fissuration due à la corrosion sous contrainte.

Par ailleurs, pour protéger les surfaces métalliques contre la corrosion, il est nécessaire d'appliquer des couches protectrices ou d'incorporer des substances inhibitrices dans des milieux agressifs. Il existe une variété de compositions de revêtements avec différentes applications et durabilités. Diverses méthodes ont été mises en œuvre pour réduire les problèmes de corrosion des substrats métalliques, les plus efficaces étant les revêtements organiques, notamment les apprêts modifiés avec divers pigments anticorrosion [120].

V. 4. Électrodéposition

Le terme "électrodéposition" désigne le processus de dépôt de métal par électrolyse, mettant l'accent sur l'application du métal sur une surface via ce mécanisme. On parle aussi de "revêtement métallique par électrolyse", une expression plus explicite qui décrit le procédé de recouvrement d'une surface à l'aide d'une réaction électrolytique. Un autre terme couramment utilisé est le "plating électrolytique", tiré de l'anglais, qui désigne le processus de recouvrement des surfaces métalliques. En français, l'électroplating est appelé "galvanoplastie", un procédé électrochimique et économique qui consiste à appliquer un revêtement, généralement métallique, sur une surface par dépôt électrolytique et passage d'un courant continu. Cette méthode est fréquemment utilisée pour appliquer une fine couche de métal sur des surfaces métalliques. Cette couche métallique apporte des propriétés spécifiques qui manquent souvent au matériau de base. Par exemple, de nombreux objets tels que les pièces automobiles, les robinets de salle de bain, les cuisinières à gaz, ou encore les colliers de pneu, sont souvent chromés grâce à ce procédé [125].

V. 4. 1. Fonctionnement

Ce procédé fonctionne en dirigeant les cations présents dans la solution électrolytique vers la cathode, une électrode généralement constituée d'un matériau "inerte" comme l'or ou le platine, à l'aide d'un champ électrique. À la cathode, les cations sont réduits pour former des métaux, des alliages ou des composés en réagissant entre eux.

Un dispositif de chauffage peut également être utilisé pour contrôler la température de l'électrolyte. Le mécanisme de l'électrodéposition peut généralement être représenté par la formule suivante :

$$M^{+n} + ne^{-} \rightarrow M^{0} \qquad (\mathbf{2})$$

La quantité de matériau déposée est proportionnelle à la charge électrique qui circule dans le circuit. Conformément aux lois de Faraday sur l'électrolyse, lorsqu'un courant constant est appliqué à l'électrolyte, l'épaisseur du dépôt peut être calculée de la manière suivante :

$$d = \frac{IMt}{n\rho AF} \qquad (3)$$

I représente l'intensité du courant (en ampères), M est la masse molaire du matériau (en kilogrammes par mole), t correspond à la durée du dépôt, ρ et A désignent respectivement la densité et la surface du film, et F est la constante de Faraday (F = 96 485 coulombs).

L'électrodéposition se déroule généralement en quatre étapes :

a) Les cations présents dans l'électrolyte sont déplacés vers la cathode par le champ électrique.

b) Les cations aboutissent à la région de décharge, située à environ 1 à 1 000 Å de la surface de la cathode, où ils obtiennent des électrons et se transforment en atomes.

c) Les atomes se dispersent vers la cathode et se stabilisent sur sa surface à des endroits énergétiquement adéquats.

d) Les atomes se rassemblent et/ou réagissent entre eux pour installer des noyaux d'éléments, d'alliages ou de composés ; ces noyaux poussent pour former des grains, aboutissant finalement à la formation d'un film sur la surface de la cathode [126].

V. 4. 2. Cinétique

V. 4. 2. 1. Nucléation

La formation de la structure cristalline comprend des phénomènes de nucléation et de croissance, comme le montre le schéma 8. Lors du processus d'électrocristallisation, le dépôt électrolytique résulte de la compétition entre la croissance des germes préexistants et l'apparition de nouveaux germes sous l'influence d'un champ électrique. Cette compétition entre les deux processus affecte la cinétique de formation du dépôt et détermine sa structure ainsi que ses caractéristiques [127]. De plus, la vitesse à laquelle les germes se forment et se développent influence la morphologie du dépôt. Lorsque les germes croissent plus rapidement qu'ils ne se forment, le dépôt est constitué de grands cristaux. En revanche, si la formation des germes est plus rapide que leur croissance, le dépôt est constitué de petits grains regroupés.

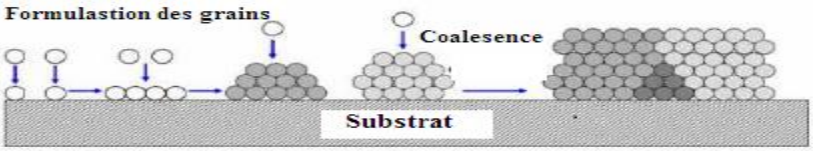


Schéma 8 : Étapes de nucléation d'un métal durant une électrodéposition [127].

V. 4. 2. 2. Croissance

La phase finale du processus d'électrodéposition, appelée coalescence, correspond à l'étape où les îlots de métal déposés se développent et fusionnent pour former une couche continue. Ce processus, sur des surfaces idéales, est fortement influencé par plusieurs facteurs : les énergies d'interaction entre les métaux impliqués, celles entre le métal et le substrat, le désaccord paramétrique entre la couche déposée et le substrat (mésappariement cristallin), ainsi que le surpotentiel appliqué, qui jouent un rôle déterminant dans les premières étapes de la croissance cristalline en hétéro-épitaxie [128]. La croissance d'un métal sur un autre métal différent peut être décrite par trois modèles principaux, le modèle de Frank-Vander Merwe, le modèle de Volmer-Weber et le modèle de Stranski-Krastanov.

V. 4. 2. 3. Impact des additives

Les additifs sont utilisés pour optimiser divers effets, notamment la dépolarisation cathodique, l'augmentation de l'efficacité du courant cathodique (CE) et la réduction de la consommation d'énergie (PC) [129]. Ils influencent à la fois le dépôt de zinc et les processus de formation de cristaux, contribuant également à réduire l'effet nocif des métaux actuels. Bien que les additifs colloïdaux traditionnels tels que la colle, la gélatine, les gommes arabiques, et certains autres additifs organiques aient été abondamment utilisés avec succès dans l'industrie, ils présentent des inconvénients liés à leur dégradation rapide et à leur impact environnemental négatif. En conséquence, la recherche se poursuit pour développer de meilleurs additifs dotés d'une stabilité accrue, d'un rendement supérieur et d'une compatibilité environnementale améliorée [130].

V. 4. 3. Principes fondamentaux de la réaction de galvanoplastie

La galvanoplastie est un processus d'électrodéposition permettant de produire un revêtement épais, régulier et cohérent sur une surface par l'action d'un courant électrique [131]. Le revêtement produit est communément à des fins décoratives et protectrices, ou pour perfectionner des propriétés précises de la surface. Les produits de galvanoplastie sont largement utilisés dans de nombreuses industries, telles que l'automobile, la marine, l'espace aérien, les machines, l'électronique, et la bijouterie.

Le cœur du processus de galvanoplastie repose sur la cellule électrolytique. Dans cette cellule, un courant électrique traverse un bain d'électrolyte, où se trouvent l'anode et la cathode. L'anode est

généralement composée du métal que l'on souhaite déposer, tandis que la cathode est l'objet ou la surface à recouvrir. Lors du processus, les ions métalliques présents dans l'électrolyte sont réduits à la cathode, formant ainsi un revêtement métallique. Le métal de l'anode se dissout progressivement dans le bain, et un dépôt métallique se forme sur la cathode.

L'électrodéposition du métal M est illustrée par l'équation 1 :

$$M^{+z} + ze^{-} \rightarrow M(\text{cathode}) \qquad (\mathbf{4})$$

La réduction du métal M dans le processus auto catalytique est exprimée par l'équation 2 :

$$M^{+z} + Re \rightarrow M(OX)^{+z}\ (\text{Surface catalytique}) \qquad (\mathbf{5})$$

Les différences entre ces deux processus résident dans la source des électrons nécessaires. Dans le processus de galvanoplastie, les électrons sont fournis par une source d'alimentation externe, tandis que dans le processus sans courant, les électrons proviennent d'un agent réducteur présent dans la solution, ce qui élimine le besoin d'une alimentation externe [132].

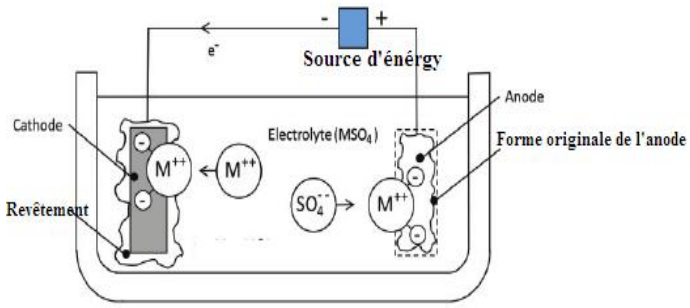


Schéma 9 : Principes fondamentaux de la réaction de galvanoplastie [133].

V. 4. 4. Variétés de revêtements disponibles

V. 4. 4. 1. Protecteurs

L'électrodéposition est un procédé de protection qui consiste à déposer des matériaux métalliques sous forme d'ions sur un substrat. Lors de ce processus, une différence de potentiel entre les électrodes anodique et cathodique provoque le transfert d'ions dans la cellule. Au fil du temps, une couche de revêtement se forme sur l'échantillon immergé, recevant des ions de l'autre électrode. De nombreuses études ont été menées sur des matériaux électrodéposés tels que Ni-P, Ni-P/Sn, Ni-P-W, Ag/Pd, Cu/Ag, Cu/Ni, Co/Ag et Co/Pt. Ces recherches présentent que les revêtements électrodéposés améliorent considérablement la résistance à la corrosion du substrat [134].

V. 4. 4. 2. Décorative

Un revêtement décoratif est une technique où une couche de matériau, souvent métallique ou polymère, est appliquée sur une surface par électrolyse pour améliorer son apparence esthétique tout en ajoutant des propriétés fonctionnelles. Ce procédé utilise un courant électrique pour déposer des ions de la solution électrolytique sur le substrat, formant un revêtement uniforme et adhérent qui peut offrir des finitions variées comme le brillant, le mat ou des textures spécifiques. Ce type de revêtement est couramment utilisé pour des applications telles que les accessoires automobiles, les bijoux et les composants électroniques, alliant esthétique et protection [135].

V. 4. 5. Facteurs dominant l'électrodéposition

V. 4. 5. 1. Concentration

Durant le processus de dépôt, les propriétés du revêtement peuvent être influencées par plusieurs facteurs, tels que le rapport métal/particules, la taille des grains du revêtement et la concentration des particules dans l'électrolyte qui détermine la rapidité avec laquelle les particules sont intégrées dans le dépôt [136].

V. 4. 5. 2. Densité du courant

Parmi les paramètres les plus étudiés, la densité de courant et la concentration des particules sont cruciales. La densité de courant joue un rôle clé dans la régulation du taux de dépôt, influençant directement la concentration, la composition et la morphologie des particules intégrées dans les revêtements. Définie par le courant appliqué par unité de surface de cathode, elle affecte également l'épaisseur des films composites : une augmentation de la densité de courant entraîne une augmentation de l'épaisseur des revêtements. Une faible densité de courant peut engendrer des défauts de surface importants, tandis qu'une densité plus élevée régule activement le processus de co-déposition, réduisant l'incorporation de particules et accélérant le dépôt de la matrice métallique [137].

V. 4. 5. 3. Éléments constitutifs du bain électrolytique

La composition des dépôts est influencée par la constitution du bain, notamment par la nature et la concentration de substances telles que les espèces électro-réductibles et électro-oxydables, qui sont les éléments principaux des bains électrolytiques. L'emploi de sels complexes permet de produire des dépôts très cohérents, assurant une bonne adhésion au métal, ce qui est essentiel pour la qualité des dépôts. Les observations montrent que les dépôts obtenus à partir de sels complexes sont supérieurs en qualité par rapport à ceux réalisés avec des sels simples. Pour obtenir des dépôts avec une structure fine, il est nécessaire d'utiliser des bains ayant des concentrations élevées en ions métalliques, ce qui requiert

des densités de courant plus élevées et des vitesses de dépôt plus rapides. À l'inverse, une concentration faible entraîne une répartition inégale et un développement désordonné de la structure cristalline [138].

V. 5. 5. 4. Température

L'augmentation de la température du bain entraîne une diminution de la viscosité du milieu, ce qui influence la vitesse de diffusion et la formation des cristaux. Ce facteur affecte également la dissolution de certains sels et la libération d'hydrogène. De plus, la température peut modifier les surtensions de manière variable. En effet, une température plus élevée permet d'augmenter les densités de courant maximales, accélérant ainsi la formation du dépôt tout en réduisant considérablement les contraintes internes. Cette variation des contraintes peut se traduire par des changements dans l'apparence ou la structure des dépôts [139].

V. 5. 5. 5. pH du bain

Les ions hydrogène jouent un rôle fondamental dans le processus d'électrodéposition des métaux, en particulier pour ceux qui se déposent à des potentiels plus négatifs que l'hydrogène. Dans ces situations, la libération d'hydrogène est importante, ce qui entraîne une diminution de l'efficacité du courant. Les réactions redox qui se produisent lors de l'électrolyse provoquent des variations de pH nécessitant un suivi régulier de ce paramètre. Une augmentation du pH près de la cathode entraîne la formation d'hydroxydes, ce qui peut nuire à la qualité du dépôt. Il a été observé que la polarisation s'intensifie lorsque le pH diminue, et que des valeurs de pH plus faibles favorisent une structure de dépôt plus fine [139].

V. 5. 5. 6. Additifs

La réalisation des revêtements nécessite l'utilisation de courant continu et l'ajout de faibles concentrations d'additifs dans le bain d'électrolyse. Les additifs jouent un rôle crucial en ajustant les procédés d'électrodéposition en influençant de manière sélective la vitesse de formation et/ou de croissance des dépôts. Les facteurs qui favorisent l'augmentation du nombre de sites de germination contribuent à réduire la taille des particules. Les additifs influencent la réduction des espèces électroactives. Ils permettent de réguler le procédé d'électrodéposition et, par conséquent, d'ajuster la qualité du dépôt, notamment ses caractéristiques telles que la structure, la dureté, la ductilité et la brillance. Chaque additif a une action spécifique qui varie selon le milieu dans lequel il se trouve [140].

V. 5. 5. 6. 1. Additifs écologiques d'origine végétale

Les additifs organiques se dégradent facilement, il est prépondérant de développer des additifs plus écologiques et durables. En réponse à cette situation, les études se sont tournées vers le développement de matériaux naturels, à la fois économiques et écologiques, pour les utiliser comme additifs dans les procédures d'électrodéposition. Ces substances naturelles proviennent généralement des plantes. Les extraits végétaux offrent une source riche en composés chimiques qui sont produits de manière naturelle, faciles à extraire, peu coûteux et réductibles biologiquement [141].

De nombreux extraits végétaux sont écologiques et ne possèdent fréquemment pas de substances nocives. Leur utilisation comme additifs dans les procédures d'électrodéposition est devenue essentielle, car ils représentent des alternatives naturelles, accessibles et renouvelables [142]. Loto et al. (2013) [142] ont examiné l'influence de l'ajout d'extrait de tabac (*Nicotiana tabacum*) dans la procédure d'électrodéposition du zinc sur l'acier doux, en utilisant une solution de chlorure d'acide. Leur étude a montré que cet additif favorisait une électrodéposition du zinc avec des grains fins et densément alignés à la surface de l'acier doux. De plus, Loto, Olofinjana et Popoola (2012) [143] ont exploré l'utilisation du jus de canne à sucre (*Saccharum officinarum*) comme additif dans l'électrodéposition du zinc sur l'acier doux, obtenant ainsi d'excellents résultats en termes de qualité de dépôt.

V. 5. 5. 6. 2. Catégorisation des additifs

a) Niveleurs

Les niveleurs sont des additifs organiques qui sont généralement utilisés pour améliorer le pouvoir de déclenchement, ce qui fournit un revêtement cohérent et une surface d'électrodéposition lisse. Un niveleur supprime rentablement l'interaction de l'électrode, spécialement en bloquant le site actif tout en étant adsorbé à la surface de la cathode. Ainsi, la réduction ultérieure des ions zinc est limitée. Cet effet inhibiteur peut participer à la constitution de molécules plus minces. L'un des niveleurs couramment utilisés pour le zinc alcalin dans la galvanoplastie est la poly[bis(2-chloroéthyl)éther-alt-1,3-bis[3-(diméthylamino)propyl]urée] (Polyquaternium-2 ou Rugaban P), qui appartient à la famille des polymères polycationiques. Les ions zinc et les azurants peuvent être consommés rapidement pendant le processus de revêtement, mais les niveleurs, qui sont des composés de poids moléculaire élevé, sont difficiles à épuiser [144].

b) Azurant et mouillant

Les additifs sont couramment appelés supports, azurants et agents mouillants, selon leur activité principale. Les supports également appelés azurants de première classe, azurants secondaires ou agents d'examen ont un rôle sur la croissance des nouveaux cristaux formés, affinant la granulométrie du dépôt et, en résultant, des revêtements plus brillants avec des particules très fines et lisses. Le rôle principal

des azurants est d'augmenter la capacité d'harmonisation du bain, c'est-à-dire son aptitude à produire une surface de plus en plus lisse à mesure que l'épaisseur du dépôt augmente. Au mouillage, les agents sont tensioactifs. Cependant, le mécanisme d'action des additifs est complexe et l'influence de chaque additif sur les propriétés des gisements est plus large que ce que la terminologie décrite ci-dessus pourrait laisser supposer. Il n'est pas rare qu'une propriété spécifique d'un revêtement puisse résulter de l'interaction synergique entre deux ou plusieurs additifs dans un bain de composition complexe. Tels que Ciszewski et al. [146] ont rapporté l'effet coopératif de la combinaison entre la saccharine et les sels d'ammonium quaternaire. Morkute et Bernotiene [146] ont démontré l'interaction entre la saccharine, le 2-butyne-1,4-diol et le phtalimide.

c) Polisseur-lustrant

La brillance est achevée à l'aide de la capacité d'une solution de galvanoplastie à créer de fins dépôts qui sont constitués de cristallites avec une structure de grains orientés inférieure à la longueur d'onde de la lumière visible (inférieure à 0,4 µm). Les petits grains sont essentiels, mais pas suffisants pour la luminosité. De même, tous les dépôts fins ne sont pas éclatants. La luminosité est influencée par l'alignement des composants morphologiques à la surface électrodéposée, selon la mesure dans laquelle ces éléments se trouvent sur un même plan. Les azurants sont essentiels pour contrôler la luminosité, la douceur, la réflectance et la résistance à la corrosion de la surface du précipité. De petites quantités d'azurants, tels que des composés carbonylés, des composés d'ammonium quaternaire (QAC) et des composés aldéhydes aromatiques ou hétérocycliques, sont généralement ajoutées [147].

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Dirlewanger, E., Cosson, P., Tavaud, M., Aranzana, M., Poizat, C., Zanetto, A., ... & Laigret, F. (2002). Development of microsatellite markers in peach [Prunus persica (L.) Batsch] and their use in genetic diversity analysis in peach and sweet cherry (Prunus avium L.). *Theoretical and applied genetics*, *105*, 127-138.

[2] Selmar, D. (1999). Cyanide in foods: biology of cyanogenic glucosides and related nutritional problems. In *Phytochemicals in human health protection, nutrition, and plant defense* (pp. 369-392). Boston, MA: Springer US.

[3] Labban, L., & Thallaj, N. (2020). The medicinal and pharmacological properties of Damascene Rose (Rosa damascena): A review. *Int. J. Herb. Med*, *8*, 33-37.

[4] Ayodhya Singh, A. S., Kusum Singh, K. S., & Anjali Saxena, A. S. (2010). Hypoglycaemic activity of different extracts of various herbal plants.

[5] Mani, J. S., Johnson, J. B., Steel, J. C., Broszczak, D. A., Neilsen, P. M., Walsh, K. B., & Naiker, M. (2020). Natural product-derived phytochemicals as potential agents against coronaviruses: A review. *Virus research*, *284*, 197989.

[6] Larrosa, M., García-Conesa, M. T., Espín, J. C., & Tomás-Barberán, F. A. (2010). Ellagitannins, ellagic acid and vascular health. *Molecular aspects of medicine*, *31*(6), 513-539.

[7] Kiasalari, Z., Heydarifard, R., Khalili, M., Afshin-Majd, S., Baluchnejadmojarad, T., Zahedi, E. ... & Roghani, M. (2017). Ellagic acid ameliorates learning and memory deficits in a rat model of Alzheimer's disease: an exploration of underlying mechanisms. *Psychopharmacology*, *234*, 1841-1852.

[8] Malini, P., Kanchana, G., & Rajadurai, M. U. R. U. (2011). Antibiabetic efficacy of ellagic acid in streptozotocin-induced diabetes mellitus in albino wistar rats. *Asian J Pharm Clin Res*, *4*(3), 124-8.

[9] Wang, Y., Ren, F., Li, B., Song, Z., Chen, P., & Ouyang, L. (2019). Ellagic acid exerts antitumor effects via the PI3K signaling pathway in endometrial cancer. *Journal of Cancer*, *10*(15), 3303.

[11] Potter, D., GAO, F., Bortiri, P. E., Oh, S. H., & Baggett, S. (2002). Phylogenetic relationships in Rosaceae inferred from chloroplast mat K and trn L-trn F nucleotide sequence data. *Plant Systematics and Evolution*, *231*, 77-89.

[12] Caragay, A. B. (1992). Cancer preventive foods and ingredients. *Food Technol.*, *4*, 65-68.

[13] Bunse, M., Stintzing, F. C., & Kammerer, D. R. (2021). Morphology and phytochemistry of Sanguisorba officinalis L. seeds (Rosaceae). *Journal of Applied Botany & Food Quality*, *94*.

[14]Cristina, T. A., Ramona, M. A., Ioana, V. S., & Petru, B. (2021). Antioxidant capacity of *Sanguisorba officinalis* L. and *sanguisorba minor scop*.

[15] Meng, X. X., Xian, Y. F., Xiang, L., Zhang, D., Shi, Y. H., Wu, M. L. ... & Sun, W. (2018). Complete chloroplast genomes from Sanguisorba: identity and variation among four species. *Molecules*, *23*(9), 2137.

[16] Ćirović, T., Barjaktarević, A., Cupara, S., Mitić, V., Nikolić, J., & Stankov, J. V. (2022). Antioxidant and antimicrobial activity of *Sanguisorba minor* L. extracts. *Serbian Journal of Experimental and Clinical Research*, *23*(1), 51-57.

[17] Zhou, P., Li, J., Chen, Q., Wang, L., Yang, J., Wu, A., & Wu, J. (2021). A comprehensive review of genus Sanguisorba: traditional uses, chemical constituents and medical applications. *Frontiers in Pharmacology*, *12*, 750165.

[18] Kokeric, T., Tripon, S., Barbu-Tudoran, L., Barjaktarevic, A., Cupara, S., & Vicas, S. I. (2023). Sanguisorba minor Scop.: An Overview of Its Phytochemistry and Biological Effects. *Plants*, *12*(11), 2128.

[19] Bulut, G., & Tuzlaci, E. (2013). An ethnobotanical study of medicinal plants in Turgutlu (Manisa—Turkey). *Journal of Ethnopharmacology*, *149*(3), 633-647.

[20] Gerard, J. (2015). *The herbal or general history of plants: the complete 1633 edition as revised and enlarged by Thomas Johnson*. Courier Dover Publications.

[21] Guarrera, P. M., & Savo, V. (2013). Perceived health properties of wild and cultivated food plants in local and popular traditions of Italy: A review. *Journal of Ethnopharmacology*, *146*(3), 659-680.

[22] Karkanis, A. C., Fernandes, Â, Vaz, J., Petropoulos, S., Georgiou, E., Ciric, A. ... & Ferreira, I. C. (2019). Chemical composition and bioactive properties of Sanguisorba minor Scop. Under Mediterranean growing conditions. *Food & function*, *10*(3), 1340-1351.

[23] Cirovic T., Barjaktarevic A., Cupara S., Mitic V., Nikolic J., Jovanovic V.S. Antioxidant and Antimicrobial Activity of *Sanguisorba minor* L. Extracts. *Serb. J. Exp. Clin. Res.* 2022; 23: 51–57.

[24] Hosseini, Z., Mansouritorghabeh, F., Kakhki, F. S. H., Hosseini, M., Rakhshandeh, H., Hosseini, A., & Rajabian, A. (2022). Effect of Sanguisorba minor on scopolamine-induced memory loss in rat: Involvement of oxidative stress and acetylcholinesterase. *Metabolic Brain Disease*, *37*(2), 473-488.

[25] Cuccioloni, M., Bonfili, L., Mozzicafreddo, M., Cecarini, V., Eleuteri, A. M., & Angeletti, M. (2012). Sanguisorba minor extract suppresses plasmin-mediated mechanisms of cancer cell migration. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, *1820*(7), 1027-1034.

[26] Tan, Y. H., Shudo, T., Yoshida, T., Sugiyama, Y., Si, J. Y., Tsukano, C. ... & Kakizuka, A. (2019). Ellagic acid, extracted from Sanguisorba officinalis, induces G1 arrest by modulating PTEN activity in B16F10 melanoma cells. *Genes to cells*, *24*(11), 688-704.

[27] Bedoya, L. M., Sanchez-Palomino, S., Abad, M. J., Bermejo, P., & Alcami, J. (2001). Anti-HIV activity of medicinal plant extracts. *Journal of Ethnopharmacology*, *77*(1), 113-116.

[28] Parada Jr, H., Gammon, M. D., Ettore, H. L., Chen, J., Calafat, A. M., Neugut, A. I., ... & Teitelbaum, S. L. (2019). Urinary concentrations of environmental phenols and their associations with breast cancer incidence and mortality following breast cancer. *Environment international*, *130*, 104890.

[29] Kahl, R., & Kappus, H. (1993). Toxikologie der synthetischen Antioxidantien BHA und BHT im Vergleich mit dem natürlichen Antioxidans Vitamin E. *Zeitschrift für Lebensmitteluntersuchung und-Forschung A*, *196*(4), 329-338.

[30] Omenn, G. S., Goodman, G. E., Thornquist, M. D., Balmes, J., Cullen, M. R., Glass, A., ... & Hammar, S. (1996). Risk factors for lung cancer and for intervention effects in CARET, the Beta-Carotene and Retinol Efficacy Trial. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute*, *88*(21), 1550-1559.

[31] Sánchez-Moreno, C. (2002). Methods used to evaluate the free radical scavenging activity in foods and biological systems. *Food science and technology international*, *8*(3), 121-137.

[32] Favier, A. (2006, November). Stress oxydant et pathologies humaines. In *Annales pharmaceutiques françaises* (Vol. 64, No. 6, pp. 390-396). Elsevier Masson.

[33] Thannickal, V. J., & Fanburg, B. L. (2000). Reactive oxygen species in cell signaling. *American Journal of Physiology-Lung Cellular and Molecular Physiology*, *279*(6), L1005-L1028.

[34] Phaniendra, A., Jestadi, D. B., & Periyasamy, L. (2015). Free radicals: properties, sources, targets, and their implication in various diseases. *Indian journal of clinical biochemistry*, *30*, 11-26. [35] Favier, A. (2003). Le stress oxydant. *L'actualité chimique*, *108*(10), 863-832.

[36] Mohammedi, Z. (2013). Etude phytochimique et activités biologiques de quelques Plantes médicinales de la Région Nord et Sud-Ouest de l'Algérie. *Thčse de doctorat (Tlemcen : Université de Tlemcen).*

[37] Prouillac, C. (2006). *Synthèse et évalutaion de nouveaux composés organiques et phosphorés contre les effets des rayonnements ionisants. Etude de leur mécanisme d'action in vitro* (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III).

[38] Therond, P. (2006, November). Dommages créés aux biomolécules (lipides, protéines, ADN) par le stress oxydant. In *Annales pharmaceutiques françaises* (Vol. 64, No. 6, pp. 383-389). Elsevier Masson.

[39] Mathew, B. B., Tiwari, A., & Jatawa, S. K. (2011). Free radicals and antioxidants: A review. *Journal of Pharmacy Research*, *4*(12), 4340-4343.

[40] López-Alarcón, C., & Denicola, A. (2013). Evaluating the antioxidant capacity of natural products: A review on chemical and cellular-based assays. *Analytica chimica acta*, *763*, 1-10.

[41] Alam, M. N., Bristi, N. J., & Rafiquzzaman, M. (2013). Review on in vivo and in vitro methods evaluation of antioxidant activity. *Saudi pharmaceutical journal*, *21*(2), 143-152.

[42] Huang, D., Ou, B., & Prior, R. L. (2005). The chemistry behind antioxidant capacity assays. *Journal of agricultural and food chemistry*, *53*(6), 1841-1856.

[43] Benzie, I. F., & Strain, J. J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": the FRAP assay. *Analytical biochemistry*, *239*(1), 70-76.

[44] Munteanu, I. G., & Apetrei, C. (2021). Analytical methods used in determining antioxidant activity: A review. *International journal of molecular sciences*, *22*(7), 3380.

[45] Decker, E. A., & Welch, B. (1990). Role of ferritin as a lipid oxidation catalyst in muscle food. *Journal of Agricultural and food Chemistry*, *38*(3), 674-677.

[46] Cummings, J. L., Vinters, H. V., Cole, G. M., & Khachaturian, Z. S. (1998). Alzheimer's disease: etiologies, pathophysiology, cognitive reserve, and treatment opportunities. *Neurology*, *51*(1_suppl_1), S2-S17.

[47] Terry, R. D., & Katzman, R. K. (1983). Senile dementia of the Alzheimer type. *Annals of Neurology: Official Journal of the American Neurological Association and the Child Neurology Society*, *14*(5), 497-506.

[48] Selkoe, D. J. (2008). Biochemistry and molecular biology of Amyloid β-Protein and the mechanism of Alzheimer's disease. *Handbook of clinical neurology*, *89*, 245-260.

[49] Zhang, H., Wei, W., Zhao, M., Ma, L., Jiang, X., Pei, H. ... & Li, H. (2021). Interaction between Aβ and tau in the pathogenesis of Alzheimer's disease. *International journal of biological sciences*, *17*(9), 2181.

[50] Breijyeh, Z., & Karaman, R. (2020). Comprehensive review on Alzheimer's disease: causes and treatment. *Molecules*, *25*(24), 5789.

[51] Nazam, N., Farhana, A., & Shaikh, S. (2022). Recent advances in Alzheimer's disease in relation to cholinesterase inhibitors and NMDA receptor antagonists. *Autism Spectrum Disorder and Alzheimer's disease: Advances in Research*, 135-151.

[52] Schneider, L. S. (1998). New therapeutic approaches to cognitive impairment. *Journal of Clinical Psychiatry*, *59*(11), 8-13.

[53] Çelik, S., Demirag, A. D., Coşgun, A. O., Özel, A., & Akyüz, S. (2023). Computational investigation of the interaction mechanism of some anti-alzheimer drugs with the acetylcholinesterase enzyme. *Open Journal of Nano*, *8*(1), 11-21.

[54] Coburger, I., Dahms, S. O., Roeser, D., Gührs, K. H., Hortschansky, P., & Than, M. E. (2013). Analysis of the overall structure of the multi-domain amyloid precursor protein (APP). *PLoS one*, *8*(12), e81926.

[55] LaFerla, F. M., Tinkle, B. T., Bieberich, C. J., Haudenschild, C. C., & Jay, G. (1995). The Alzheimer's Aβ peptide induces neurodegeneration and apoptotic cell death in transgenic mice. *Nature genetics*, *9*(1), 21-30.

[56] Camandola, S., & Mattson, M. P. (2011). Aberrant subcellular neuronal calcium regulation in aging and Alzheimer's disease. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Molecular Cell Research*, *1813*(5), 965-973.

[57] Murray, A. P., Faraoni, M. B., Castro, M. J., Alza, N. P., & Cavallaro, V. (2013). Natural AChE inhibitors from plants and their contribution to Alzheimer's disease therapy. *Current neuropharmacology*, *11*(4), 388-413.

[58] Ingkaninan, K., Changwijit, K., & Suwanborirux, K. (2006). Vobasinyl-iboga bisindole alkaloids, potent acetylcholinesterase inhibitors from Tabernaemontana divaricata root. *Journal of pharmacy and pharmacology*, *58*(6), 847-852.

[59] Berkov, S., Codina, C., Viladomat, F., & Bastida, J. (2008). N-Alkylated galanthamine derivatives: Potent acetylcholinesterase inhibitors from Leucojum aestivum. *Bioorganic & medicinal chemistry letters*, *18*(7), 2263-2266.

[60] Ortiz, J. E., Garro, A., Pigni, N. B., Agüero, M. B., Roitman, G., Slanis, A., & Tapia, A. (2018). Cholinesterase-inhibitory effect and in silico analysis of alkaloids from bulbs of Hieronymiella species. *Phytomedicine*, *39*, 66-74.

[61] Zhan, Z.-J.; Yu, Q.; Wang, Z.-L.; Shan, W.-G. Indole alkaloids from Ervatamia hainanensis with potent acetylcholinesterase inhibition activities. Bioorg. Med. Chem. Lett. 2010, 20, 6185–618.

[62] Balkis, A., Tran, K., Lee, Y. Z., & Ng, K. (2015). Screening flavonoids for inhibition of acetylcholinesterase identified baicalein as the most potent inhibitor. *J. Agric. Sci*, *7*(9), 26-35.

[63] Di Meo, F., Valentino, A., Petillo, O., Peluso, G., Filosa, S., & Crispi, S. (2020). Bioactive polyphenols and neuromodulation: Molecular mechanisms in neurodegeneration. *International journal of molecular sciences*, *21*(7), 2564.

[64] Syad, A. N., & Devi, K. P. (2014). Botanics: a potential source of new therapies for Alzheimer's disease?. *Botanics: Targets and Therapy*, 11-26.

[65] Razay, G., & Wilcock, G. K. (2008). Galantamine in Alzheimer's disease. *Expert review of neurotherapeutics*, *8*(1), 9-17.

[66] Maelicke, A., Hoeffle-Maas, A., Ludwig, J., Maus, A., Samochocki, M., Jordis, U., & Koepke, A. K. (2010). Memogain is a galantamine pro-drug having dramatically reduced adverse effects and enhanced efficacy. *Journal of molecular neuroscience*, *40*, 135-137.

[67] Ha, G. T., Wong, R. K., & Zhang, Y. (2011). Huperzine a as potential treatment of Alzheimer's disease: an assessment on chemistry, pharmacology, and clinical studies. *Chemistry & biodiversity*, *8*(7), 1189-1204.

[68] Rajakrishnan, V., Viswanathan, P., Rajasekharan, K. N., & Menon, V. P. (1999). Neuroprotective role of curcumin from Curcuma longa on ethanol-induced brain damage. *Phytotherapy Research: An International Journal Devoted to Pharmacological and Toxicological Evaluation of Natural Product Derivatives*, *13*(7), 571-574.

[69] Karuppagounder, S. S., Pinto, J. T., Xu, H., Chen, H. L., Beal, M. F., & Gibson, G. E. (2009). Dietary supplementation with resveratrol reduces plaque pathology in a transgenic model of Alzheimer's disease. *Neurochemistry international*, *54*(2), 111-118.

[70] Wang, S., Kong, X., Chen, Z., Wang, G., Zhang, J., & Wang, J. (2022). Role of natural compounds and target enzymes in the treatment of Alzheimer's disease. *Molecules*, *27*(13), 4175.

[71] American Diabetes Association Diagnosis and classification of diabetes mellitus, ADA Clinical Practice Recommendations. *Diabetes Care* (2013), *36* (Suppl. S1), S67–S74.

[72] Chaudhury, A., Duvoor, C., Reddy Dendi, V. S., Kraleti, S., Chada, A., Ravilla, R., ... & Mirza, W. (2017). Clinical review of antidiabetic drugs: implications for type 2 diabetes mellitus management. *Frontiers in endocrinology*, *8*, 6.

[73] Ogunyemi, O. M., Gyebi, G. A., Saheed, A., Paul, J., Nwaneri-Chidozie, V., Olorundare, O., ... & Olaiya, C. O. (2022). Inhibition mechanism of alpha-amylase, a diabetes target, by a steroidal pregnane and pregnane glycosides derived from Gongronema latifolium Benth. *Frontiers in molecular biosciences*, *9*, 866719.

[74] Gong, L., Feng, D., Wang, T., Ren, Y., Liu, Y., & Wang, J. (2020). Inhibitors of α-amylase and α-glucosidase: Potential linkage for whole cereal foods on prevention of hyperglycemia. *Food science & nutrition*, *8*(12), 6320-6337.

[75] Ćorković, I., Gašo-Sokač, D., Pichler, A., Šimunović, J., & Kopjar, M. (2022). Dietary polyphenols as natural inhibitors of α-amylase and α-glucosidase. *Life*, *12*(11), 1692.

[76] Karthic, K., Kirthiram, K. S., Sadasivam, S., Thayumanavan, B., & Palvannan, T. (2008). Identification of amylase inhibitors from Syzygium cumini Linn seeds.

[77] Prashanth, D., Padmaja, R., & Samiulla, D. S. (2001). Effect of certain plant extracts on α-amylase activity. *Fitoterapia*, *72*(2), 179-181.

[78] Wang, S., Zhao, Y., Breslawec, A. P., Liang, T., Deng, Z., Kuperman, L. L., & Yu, Q. (2023). Strategy to combat biofilms: a focus on biofilm dispersal enzymes. *npj Biofilms and Microbiomes*, *9*(1), 63.

[79] Divatia, J. V., Pulinilkunnathil, J. G., & Myatra, S. N. (2020). Nosocomial infections and ventilator-associated pneumonia in cancer patients. *Oncologic Critical Care*, 1419-1439.

[80] Flemming, H. C., & Wingender, J. (2001). Relevance of microbial extracellular polymeric substances (EPSs)-Part I: Structural and ecological aspects. *Water science and technology*, *43*(6), 1-8.

[82] Varela, M. F., Stephen, J., Lekshmi, M., Ojha, M., Wenzel, N., Sanford, L. M. ... & Kumar, S. H. (2021). Bacterial resistance to antimicrobial agents. *Antibiotics*, *10*(5), 593.

[83] Gyawali, R., & Ibrahim, S. A. (2014). Natural products as antimicrobial agents. *Food control*, *46*, 412-429.

[84] Silva, L. N., Zimmer, K. R., Macedo, A. J., & Trentin, D. S. (2016). Plant natural products targeting bacterial virulence factors. *Chemical reviews*, *116*(16), 9162-9236.

[85] Manner, S., Skogman, M., Goeres, D., Vuorela, P., & Fallarero, A. (2013). Systematic exploration of natural and synthetic flavonoids for the inhibition of Staphylococcus aureus biofilms. *International journal of molecular sciences*, *14*(10), 19434-19451.

[86] Matilla-Cuenca, L., Gil, C., Cuesta, S., Rapún-Araiz, B., Žiemytė, M., Mira, A., ... & Valle, J. (2020). Antibiofilm activity of flavonoids on staphylococcal biofilms through targeting BAP amyloids. *Scientific Reports*, *10*(1), 18968.

[87] Pruteanu, M., Hernández Lobato, J. I., Stach, T., & Hengge, R. (2020). Common plant flavonoids prevent the assembly of amyloid curli fibres and can interfere with bacterial biofilm formation. *Environmental microbiology*, *22*(12), 5280-5299.

[88] Hodgkinson, J. T., Welch, M., & spring, D. R. (2007). Learning the language of bacteria. *ACS Chemical Biology*, *2*(11), 715-717.

[89] Sircili, M. P., Walters, M., Trabulsi, L. R., & Sperandio, V. (2004). Modulation of enteropathogenic Escherichia coli virulence by quorum sensing. *Infection and immunity*, *72*(4), 2329-2337.

[90] Grandclément, C., Tannières, M., Moréra, S., Dessaux, Y., & Faure, D. (2016). Quorum quenching: role in nature and applied developments. *FEMS microbiology reviews*, *40*(1), 86-116..

[91] Czajkowski, R., & Jafra, S. (2009). Quenching of acyl-homoserine lactone-dependent quorum sensing by enzymatic disruption of signal molecules. *Acta Biochimica Polonica*, *56*(1).

[92] Lima, E. M. F., Winans, S. C., & Pinto, U. M. (2023). Quorum sensing interference by phenolic compounds–A matter of bacterial misunderstanding. *Heliyon*, *9*(7).

[93] Verbeke, F., De Craemer, S., Debunne, N., Janssens, Y., Wynendaele, E., Van de Wiele, C., & De Spiegeleer, B. (2017). Peptides as quorum sensing molecules: measurement techniques and obtained levels in vitro and in vivo. *Frontiers in neuroscience*, *11*, 183.

[94] Tang, K., & Zhang, X. H. (2014). Quorum quenching agents: resources for antivirulence therapy. *Marine drugs*, *12*(6), 3245-3282.

[95] Scarascia, G., Wang, T., & Hong, P. Y. (2016). Quorum sensing and the use of quorum quenchers as natural biocides to inhibit sulfate-reducing bacteria. *Antibiotics*, *5*(4), 39.

[96] Teasdale, M.E.; Liu, J.; Wallace, J.; Akhlaghi, F.; Rowley, D.C. Secondary metabolites produced by the marine bacterium Halobacillus salinus that inhibit quorum sensing-controlled phenotypes in gram-negative bacteria. Appl. Environ Microbiol. 2009, 75, 567–572.

[97] Katebian, L., Gomez, E., Skillman, L., Li, D., Ho, G., & Jiang, S. C. (2016). Inhibiting quorum-sensing pathways to mitigate seawater desalination, RO membrane biofouling. *Desalination*, *393*, 135-143.

[98] Givskov, M., de Nys, R. O. C. K. Y., Manefield, M., Gram, L., Maximilien, R. I. A., Eberl, L. E. O., ... & Kjelleberg, S. (1996). Eukaryotic interference with homoserine lactone-mediated prokaryotic signalling. *Journal of bacteriology*, *178*(22), 6618-6622.

[99] Keshavan ND, Chowdhary PK, Haines DC, González JE (2005). LCanavanine made by Medicago sativa interferes with quorum sensing in Sinorhizobium meliloti. J. Bacteriol. 187: 8427-8436.

[100] Kothari, V., Sharma, S., & Padia, D. (2017). Recent research advances on Chromobacterium violaceum. *Asian Pacific journal of tropical medicine*, *10*(8), 744-752.

[101] Pearson, J. P., Van Delden, C., & Iglewski, B. H. (1999). Active efflux and diffusion are involved in transport of Pseudomonas aeruginosa cell-to-cell signals. *Journal of bacteriology*, *181*(4), 1203-1210.

[102] Lai, S., Tremblay, J., & Déziel, E. (2009). Swarming motility: a multicellular behaviour conferring antimicrobial resistance. *Environmental microbiology*, *11*(1), 126-136.

[103Ali, M. A., & Ismail, A. (2023). A Review on The Inhibition Efficiency of Green Materials as a Potential Corrosion Protection on Ferrous and Non-Ferrous Metals in Various Environments. *Journal of Advanced Mechanical Engineering Applications*, *4*(1), 64-76.

[104] ISO 8044, (2015). Corrosion of metals and alloys: Basic terms and definitions, European committee for standardization.

[105] Mme. BOULMERKA Rihane, (2023). Etude de la corrosion des instruments Thèse doctorat chirurgicaux dentaires lors de la stérilisation, Université Annaba (UBMA)

[106] Pravitasari, A. (2003). Corrosion in Material of Construction. *The Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway: Springer*.

[107] Abdessamad, B. R. A. H. A. M. I. (2018). Etude de l'influence du couplage entre les caractéristiques mécaniques et les sollicitations appliquées sur le comportement en fatigue des alliages d'aluminium (Doctoral dissertation).

[108] Baroux, B. (2002). Further insights on the pitting corrosion of stainless steels. In *Corrosion mechanisms in theory and practice* (pp. 320-357). CRC Press.

[109] Naceur, W. B. (2013). *Evaluation des solutions d'encapsulation quasi-hermétique pour les composants actifs hyperfréquences* (Doctoral dissertation, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I).

[110] Han, D., Jiang, Y. M., Shi, C., Deng, B., & Li, J. (2012). Effect of temperature, chloride ion and pH on the crevice corrosion behavior of SAF 2205 duplex stainless steel in chloride solutions. *Journal of materials science*, *47*, 1018-1025.

[111] Upadhyay, D., Panchal, M. A., Dubey, R. S., & Srivastava, V. K. (2006). Corrosion of alloys used in dentistry: A review. *Materials Science and Engineering: A*, *432*(1-2), 1-11.

[112] CUNAT, P. J. (2000). Aciers inoxydables : Propriétés. Résistance à la corrosion. *Techniques de l'ingénieur. Corrosion vieillissement*, (M4541), M4541-1.

[113] Bensabra, D. H. (2016). Cours de corrosion et protection des métaux. *Université de JIJEL*, 3-4.

[114] M. Hamani. (2019) « Etude de l'efficacité de l'inhibition de la corrosion d'un acier au Carbone dans HCl à 1M ». Thèse de doctorat, Université Mohamed BOUDIAF de M'Sila

[115] change les numéros Phull, B. (2003). Evaluating intergranular corrosion. *Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection*, 568-571.

[116] Bertali, G. (2016). *Mechanistic Understanding of Alloy 600 Preferential Intergranular Oxidation:" Precursor Events of Stress Corrosion Cracking"*. The University of Manchester (United Kingdom).

[117] Davenport, A. J., Yuan, Y., Ambat, R., Connolly, B. J., Strangwood, M., Afseth, A., & Scamans, G. M. (2006, July). Intergranular corrosion and stress corrosion cracking of sensitised AA5182. In *Materials science forum* (Vol. 519, pp. 641-646). Trans Tech Publications Ltd.

[118] Faes, W., Lecompte, S., Ahmed, Z. Y., Van Bael, J., Salenbien, R., Verbeken, K., & De Paepe, M. (2019). Corrosion and corrosion prevention in heat exchangers. *Corrosion reviews*, *37*(2), 131-155.

[119] Vernon, W. H. J. (1957). Metallic corrosion and conservation. In *The conservation of natural resources: a series oe lectures delivered at the institution* (pp. 105-133). Thomas Telford Publishing.

[120] Buchheit, R. G., Guan, H., Mahajanam, S., & Wong, F. (2003). Active corrosion protection and corrosion sensing in chromate-free organic coatings. *Progress in Organic Coatings*, *47*(3-4), 174-182.

[121] Yang, L., Ravdel, B., & Lucht, B. L. (2010). Electrolyte reactions with the surface of high voltage LiNi0. 5Mn1. 5O4 cathodes for lithium-ion batteries. *Electrochemical and Solid-State Letters*, *13*(8), A95.

[122] Zhang, T., Yang, Y., Shao, Y., Meng, G., & Wang, F. (2009). A stochastic analysis of the effect of hydrostatic pressure on the pit corrosion of Fe–20Cr alloy. *Electrochimica Acta*, *54*(15), 3915-3922.

[123] Hinga, K. R. (2002). Effects of pH on coastal marine phytoplankton. *Marine ecology progress series*, *238*, 281-300.

[124] Nikolic, N. D., Rakočević, Z. L., Durovic, D. R., & Popov, K. I. (2002). Reflection and structural characteristics of semi-bright and mirror bright nickel coatings. *Journal of the Serbian Chemical Society*, *67*(6), 437-443.

[125] Gribkova, O. V., Kazakevich, A. V., & Straumal, B. B. (2000). Protective and decorative copper and nickel coatings" velour"," velvet"," sateen. *The Institute of Materials, London*, 371-375.

[126]Shaikh, A. V., Mane, R. S., Joo, O. S., Han, S. H., & Pathan, H. M. (2017). Electrochemical deposition of cadmium selenide films and their properties: a review. *Journal of Solid State Electrochemistry*, *21*, 2517-2530.

[127] Zangari, G. (2015). Electrodeposition of alloys and compounds in the era of microelectronics and energy conversion technology. *Coatings*, *5*(2), 195-218.

[128] Kanani, N. (2004). *Electroplating basic principles, processes and practice*. Elsevier...

[129] Recéndiz, A., González, I., & Nava, J. L. (2007). Current efficiency studies of the zinc electrowinning process on aluminum rotating cylinder electrode (RCE) in sulfuric acid medium: Influence of different additives. *Electrochimica Acta*, *52*(24), 6880-6887.

[130] Zhang, Q. B., & Hua, Y. X. (2012). Stability of [BMIM] HSO4 for using as additive during zinc electrowinning from acidic sulfate solution. *Journal of Central South University*, *19*(9), 2451-2457.

[131] ASTM International. In B374-96 (2003) Standard Terminology Relating to Electroplating; ASTM International: West Conshohocken, PA, 2003.

[132] Schlesinger, M. (2000). Electroless deposition of nickel. Modern electroplating, 4, 667-684.

[133]Ruotsalainen, P., (2010). Nanotimanttilujitetun kolmiarvoisen kromipinnoitteen tribologiset ominaisuudet, Bachelor Thesis, Savonia University of Applied Sciences.

[134] Lelevic, A., & Walsh, F. C. (2019). Electrodeposition of NiP composite coatings: A review. *Surface and Coatings Technology*, *378*, 124803.

[135] Lisiecki, A. (2013, January). Diode laser welding of high yield steel. In *Laser Technology 2012: Applications of Lasers* (Vol. 8703, pp. 211-221). SPIE.

[136] Górka, J. (2014). Analysis of simulated welding thermal cycles S700MC using thermal imaging camera. Advanced Materials Research, 837, 375-380.

[137] DJAGHOUT, I. (2016). *Etude De L'influence Des Additifs Organiques Sur Les Proprietes Des Dépots Electrolytiques De Nickel* (Doctoral dissertation).

[138] Rasmussen, A. A., Møller, P., & Somers, M. A. (2006). Microstructure and thermal stability of nickel layers electrodeposited from an additive-free sulphamate-based electrolyte. *Surface and Coatings Technology*, *200*(20-21), 6037-6046.

[139] Li, J. M., Chao, C. A. I., Song, L. X., Li, J. F., Zhang, Z., Xue, M. Z., & Liu, Y. G. (2013). Electrodeposition and characterization of nano-structured black nickel thin films. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, *23*(8), 2300-2306.

[140] L. Oniciu, L. Muresan. Some fundamental aspects of levelling and brightening in metal electrodeposition. Journal of Applied Electrochemistry, 21 (1991) 565-57.

[141] Hanini, K., Merzoug, B., Boudiba, S., Selatnia, I., Laouer, H., & Akkal, S. (2019). Influence of different polyphenol extracts of Taxus baccata on the corrosion process and their effect as additives in electrodeposition. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, *14*, 100189.

[142] Loto, C. A., & Akinyele, M. (2020). Effect of ginger, pomegranate and celery extracts on zinc electrodeposition, surface morphology and corrosion inhibition of mild steel. *Alexandria Engineering Journal*, *59*(2), 933-941.

[143] Loto, C. A., Olofinjana, A., & Popoola, A. P. I. (2012). Effect of *Saccharum officinarum* juice extract additive on the electrodeposition of zinc on mild steel in acid chloride solution. *International Journal of Electrochemical Science*, *7*(10), 9795-9811.

[144] Chotirach, M., Rattanawaleedirojn, P., Boonyongmaneerat, Y., Chanajaree, R., Schmid, K., Metzner, M., & Rodthongkum, N. (2022). Systematic investigation of brightener's effects on alkaline non-cyanide zinc electroplating using HPLC and molecular modeling. *Materials Chemistry and Physics*, *277*, 125567.

[145] Ciszewski, A., Posluszny, S., Milczarek, G., & Baraniak, M. (2004). Effects of saccharin and quaternary ammonium chlorides on the electrodeposition of nickel from a Watts-type electrolyte. *Surface and Coatings Technology*, *183*(2-3), 127-133.

[146] Mockute, D., & Bernotiene, G. (2000). The interaction of additives with the cathode in a mixture of saccharin, 2-butyne-1, 4-diol and phthalimide during nickel electrodeposition in a Watts-type electrolyte. *Surface and coatings technology*, *135*(1), 42-47.

[147] Liebreich, E. (1935). The effects of film formation on the structure of electro-deposited metallic coatings. *Transactions of the Faraday Society*, *31*, 1188-1194.

CHAPITRE II

Matériels et méthodes

1re partie : Étude de l'activité biologique

II. 1. Matière végétale

La plante a été récoltée à Tébessa (35°24′14,5″ N 8°05′31,6″ E) en septembre 2021 et identifiée par le Dr. Soraya Hioun du département des êtres vivants, faculté des sciences exactes et sciences de la nature et de la vie (CJB/African Plant Database) de l'université Echahid Cheikh Larbi Tebessi, Tébessa, Algérie. Les modèles de référence ont été établis sous les numéros d'herbier CUP/JP/5-6 pour *Sanguisorba minor* L., conservés dans l'herbier du département de biologie de l'université même. Les spécimens de référence ont été comparés aux témoins identifiés ainsi qu'à d'autres aspects phénotypiques établis de *Sanguisorba minor* L., comme décrit dans la littérature [1].

II. 2. Screening phytochimique

Les tests de screening phytochimique ont été réalisés sur les extraits obtenus à partir des parties aériennes et des racines de la plante investiguée. Ces extraits ont été préparés en milieu aqueux, par décoction et macération, ainsi que dans deux autres solvants, l'éthanol et l'acide sulfurique. Les méthodes d'identification utilisées sont des techniques qualitatives conformes aux descriptions standards [2, 3].

II. 2. 1. Macération à l'eau distillée

L'extrait aqueux a été préparé en chauffant à reflux pendant une heure 30 g de matériel végétal dans 100 mL de solvant. Après filtration, l'extrait aqueux obtenu a été soumis à différents tests [3].

II. 2. 1. 1. Recherche des saponosides

Pour réaliser le test de mousse selon Trease Evans (1987) [3], on mélange 2,5 mL d'eau avec 3 mL d'extrait, puis la solution est vigoureusement agitée. Ensuite, le mélange est laissé pendant 20 minutes. La présence des saponines est détectée comme suit :

- ✓ Absence de mousse = test négatif.
- ✓ Mousse inférieure à 1 cm = test légèrement positif.
- ✓ Mousse de 1 à 2 cm = test positif

II. 2. 1. 2. Recherche d'amidons

Le test réalisé consiste à chauffer 3 mL de l'extrait aqueux avec 8 mL d'une solution de NaCl saturée dans un bain-marie jusqu'à 100°C. Ensuite, on ajoute le réactif de Lugol. Si la couleur vire au bleu violacé, cela indique un test positif [2].

II. 2. 1. 3. Recherche des tanins galliques

L'ajout de 1 mL d'eau distillée à 1 à 2 gouttes d'une solution diluée de $FeCl_3$ à 1% est suivi de l'ajout de 1 mL de l'extrait aqueux. La présence de tanins galliques est indiquée par l'apparition d'une couleur bleu-vert [2].

II. 2. 1. 4. Recherche des anthocyanes

En ajoutant 2 mL d'extrait aqueux à 2 mL de HCl (2 N), puis en ajoutant quelques gouttes de NH_4OH, on observe une coloration rose-rouge qui vire au bleu violacé, ce qui indique la présence des anthocyanes [2].

II. 2. 2. Macération à l'éthanol

La méthode consiste à macérer 20 g de matériel végétal dans 100 mL d'éthanol, puis à laisser reposer le mélange pendant 24 heures [3].

II. 2. 2. 1. Recherche des flavonoïdes

La détection des flavonoïdes est réalisée par l'ajout de 3 mL d'extrait éthanolique à 1 mL d'HCl concentré, suivi de l'addition de 3 copeaux de magnésium. On observe alors un dégagement de chaleur, suivi d'une coloration rose orangée ou violacée [2].

II. 2. 2. 2. Recherche des tanins catéchiques

La détection des tanins est réalisée en ajoutant 2 mL d'eau distillée et 2 à 3 gouttes d'une solution diluée de $FeCl_3$ à 1 mL d'extrait éthanolique. L'apparition d'une coloration verte foncée ou bleu-vert indique la présence des tanins [3].

- ✓ L'apparition d'une coloration verte foncée indique la présence des tanins catéchiques.
- ✓ L'apparition d'une coloration bleu-vert indique la présence des tanins galliques.

II. 2. 2. 3. Recherche des composés réducteurs

Pour révéler la présence de sucres réducteurs, 10 gouttes de liqueur de Fehling ont été ajoutées à 2 mL d'extrait éthanolique, puis chauffées à 40 °C dans un bain-marie. La formation d'un précipité rouge-brique indique une réaction positive [3].

II. 2. 2. 4. Recherche des coumarines

Dans un ballon, 2 mL d'extrait éthéré sont évaporés, puis 2 mL d'eau chaude sont ajoutés au résidu. La solution est répartie entre 2 tubes à essais. Dans l'un des tubes, 0.5 mL de NH_4OH à 10 % est ajouté. Deux gouttes sont ensuite placées sur un papier filtre, et la fluorescence est observée sous UV à 366 nm. Une fluorescence intense dans le tube où de l'ammoniac a été ajouté indique la présence de coumarines [3].

II. 2. 2. 5. Recherche des stérols et des triterpènes

Les stérols et les terpènes ont été recherchés par la réaction de Lieberman [3]. Pour cela, 2 mL d'extrait éthanolique ont été évaporés. Le résidu obtenu a ensuite été dissous à chaud dans 1 mL d'anhydride acétique, puis 3 mL de chloroforme et 0.5 mL d'acide sulfurique concentré ont été ajoutés.

L'apparition, à l'interface, d'un anneau pourpre ou violet, virant au bleu puis au vert, indique une réaction positive.

II. 2. 2. 6. Recherche d'hétérosides

Évaporer à sec 10 mL d'extrait éthanolique, puis ajouter 0.5 mL d'anhydride acétique et 0.5 mL de chloroforme au résidu obtenu. Après filtration, ajouter au filtrat le réactif de Liebermann-Burchardt. Si cette réaction produit des colorations, une couleur verte bleue indique la présence d'hétérosides stéroïdiens, tandis qu'une couleur verte violette indique la présence d'hétérosides triterpéniques [3].

II. 2. 3. Recherche des alcaloïdes

Un extrait éthanolique de la plante a été préparé par macération de la plante dans de l'éthanol. Le réactif de Wagner a ensuite été ajouté à l'extrait. L'ajout de 1 à 2 gouttes de la solution de Wagner dans 1 mL de l'extrait a permis d'observer l'apparition rapide d'une coloration rouge-brun ou brune, ce qui indique une réaction positive pour la détection des alcaloïdes [3].

II. 3. Méthode d'extraction des polyphénols

Pour extraire les constituants poly phénoliques nécessaires à l'estimation des activités biologiques, les étapes suivantes ont été suivies (Figure 25) :

Le matériel choisi a été moissonné, séché à l'ombre, puis broyé pour obtenir une poudre fine avant son utilisation dans l'expérimentation.

- ✓ Une quantité de 700 g de poudre de la plante a été macérée dans un mélange méthanol/eau (70/30 v/v) pendant 24 heures, et le mélange ainsi obtenu a été filtré.
- ✓ Le filtrat a été séché à l'aide d'un évaporateur rotatif (Buchi R-215 Rotavapor, Flawil, Suisse) sous pression, ce qui a permis d'obtenir un brut méthanolique.
- ✓ Pour éliminer les substances lipophiles, les graisses et la chlorophylle, 100 mL d'eau chaude ont été ajoutés à ce brut. Le mélange a été laissé pendant 24 heures, puis filtré.
- ✓ Une extraction liquide-liquide a été réalisée sur le filtrat obtenu en utilisant une ampoule à décanter et différents solvants (dichlorométhane, acétate d'éthyle, butanol). Le filtrat a été extrait successivement avec du dichlorométhane, de l'acétate d'éthyle puis du n-butanol pour donner respectivement les fractions DCM, AE et BuOH, en augmentant la polarité du solvant.
- ✓ Le résidu final a été séché et constituait la fraction aqueuse AQ.

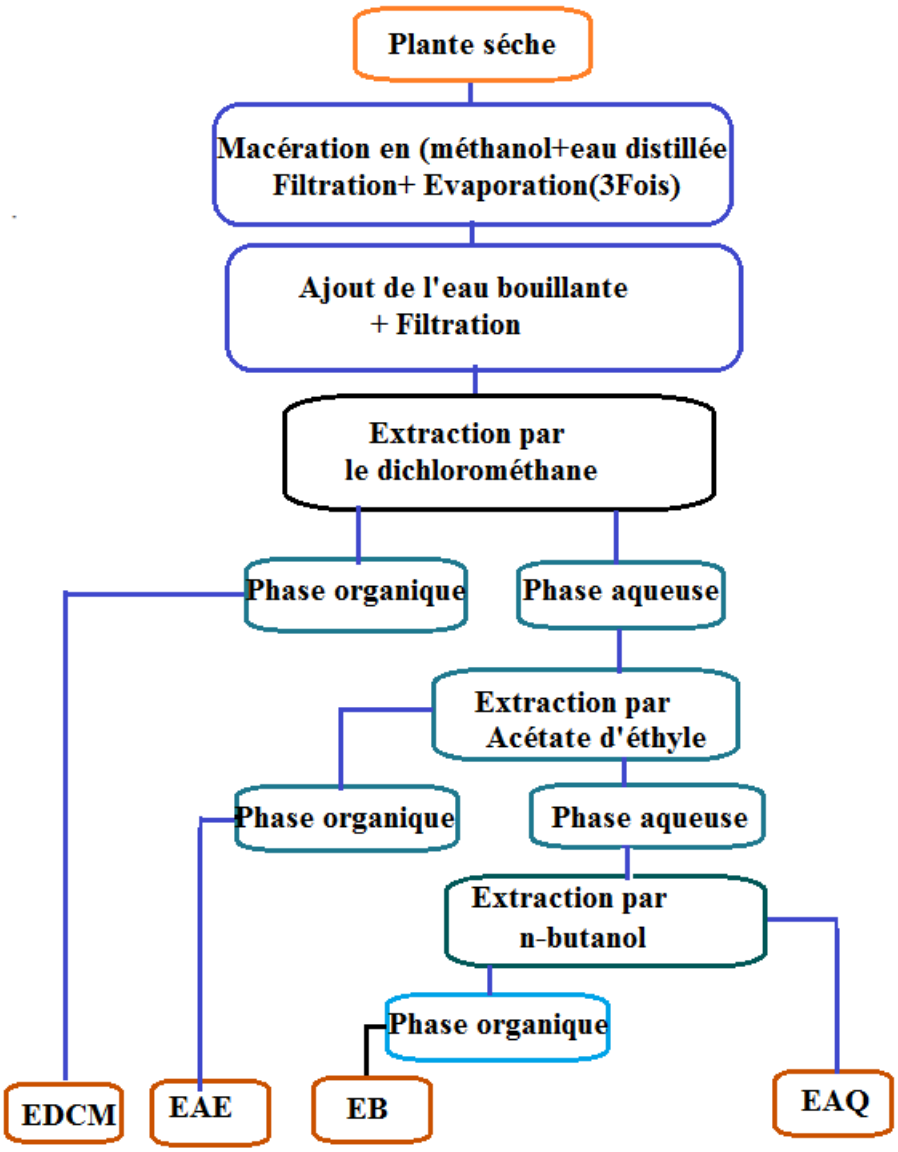


Figure 25 : Méthode d'extraction des polyphénols à partir de *Sanguisorba minor* L.

II. 4. Analyse des extraits phénoliques par HPLC-DAD

La méthode RP-HPLC a été utilisée, couplée à un détecteur à réseau de diodes (DAD), pour déterminer et quantifier les composés phénoliques existant dans les extraits testés. Pour cela, chaque extrait a été dissous dans un mélange eau-méthanol (80:20), filtré sur un disque filtrant LC de 0.20 µm avant l'injection, puis séparé sur une colonne C18 à phase inversée Inertsil ODS-3 [4, 5], en utilisant une injection de 20 µL. Les solvants utilisés comme phases mobiles contenaient 0.5 % d'acide acétique dans l'eau (solvant A) et 0.5 % d'acide acétique dans le méthanol (solvant B) à un débit de 1 mL/min. L'élution a été effectuée avec un gradient de 0 à 10 % de B (0 à 0.01 min) ; de 10 à 20 % B (0.01 à 5 minutes) ; de 20 à 30 % B (5 à 15 minutes) ; de 30 à 50 % B (15 à 25 minutes) ; de 50 à 65 % B (25 à 30 minutes) ; de 65 à 75 % B (30 à 40 minutes) ; de 75 à 90 % B (40 à 50 minutes) ; de 90 à 10 % B (50 à 55 minutes). La composition phénolique a été identifiée par comparaison du temps de rétention et du spectre

d'absorption UV, à une longueur d'onde de 280 nm. Les résultats ont été exprimés en µg par g de poids sec de l'extrait.

Un tracé d'étalonnage a été établi par élution de concentrations connues (0.0, 0.00782, 0.01563, 0.03125, 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5 et 1.0 ppm) de composés authentiques pour l'identification et la quantification des composés phénoliques constitutifs de la plante. Vingt-six étalons phénoliques (acide gallique, acide p-hydroxybenzoïque, acide protocatéchique, acide ellagique, acide chlorogénique, acide trans-cinnamique, acide 3-hydroxybenzoïque, acide vanillique, acide syringique, acide p-coumarique, acide rosmarinique, acide férulique, catéchine, kaempférol, hespérétine, pyrocatéchol, vanilline, 6,7-dihydroxycoumarine, coumarine, rutine, myricétine, chrysine, lutéoline, apigénine, taxifoline et quercétine) ont été utilisés. Les résultats ont été exprimés en grammes par gramme de poids sec de l'extrait.

II. 5. Méthodes d'évaluation de l'activité antioxydante

Le pouvoir antioxydant des extraits phénoliques de *Sanguisorba minor* L. a été évalué en utilisant sept méthodes : FRAP, DPPH, β-carotène, ABTS, CUPRAC, chélateur des métaux et peroxyde d'hydrogène.

II. 5. 1. FRAP (Ferric reducing antioxidant power)

Cette technique repose sur la réduction du Fe^{3+} présent dans le composé $K_3Fe(CN)_6$ en Fe^{2+}. La réaction est effectuée lorsque la couleur jaune du fer ferrique (Fe^{3+}) se transforme en couleur bleu-vert du fer ferreux (Fe^{2+}). La gamme d'absorption de cette coloration est obtenue par spectrophotométrie à 700 nm. Le protocole expérimental suit la méthode de Yildrim, Mavi, Kara (2001) [6]. Pour chaque échantillon, 1 mL d'extrait est mélangé avec 3 mL de solution tampon phosphate (0.2 M, pH 6.6) et 3 mL de ferricyanure de potassium [$K_3Fe(CN)_6$] (1 %) dans un bain-marie à 50 °C pendant 20 minutes, suivi d'un refroidissement à température ambiante. Pour arrêter la réaction, 5 mL d'acide trichloracétique (10%) sont ajoutés. Les solutions sont ensuite centrifugées à 3000 tours pendant 10 minutes. Par la suite, 3 mL du surnageant de chaque échantillon sont mélangés avec 3 mL d'eau distillée et 500 µL de $FeCl_3.6H_2O$ (0.1 %). L'absorbance est mesurée à 700 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV en comparaison avec un blanc constitué de la même solution, mais l'extrait est remplacé par de l'eau distillée.

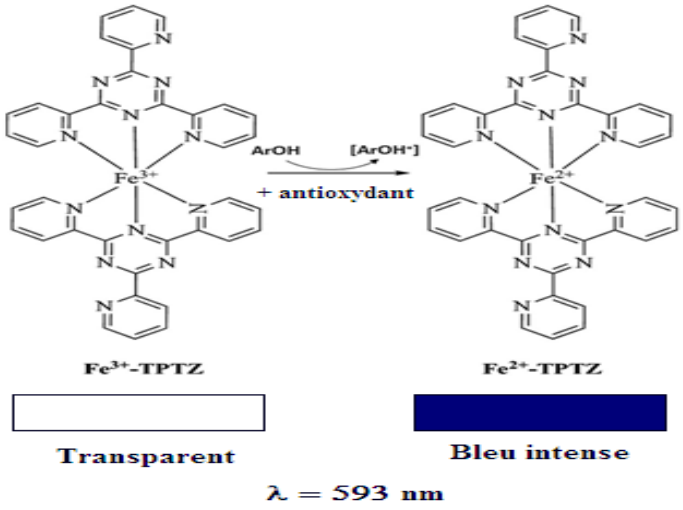


Figure 26 : Mécanisme réactionnel intervenant lord du test FRAP [7].

II. 5. 2. Piégeage du radical libre DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazil)

La réduction du radical libre DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyl) par un antioxydant peut être mesurée par spectrophotométrie UV-visible. Le DPPH contient un électron célibataire sur l'atome d'azote, ce qui le colore en violet avec un pic d'absorption spectrale maximal à 517 nm. Par une réaction de réduction catalysée par un antioxydant, l'électron du radical devient apparié, ce qui entraîne un changement de sa couleur, passant du violet (forme radicalaire DPPH$^{\bullet}$) au jaune (forme réduite DPPH-H) [8], selon la réaction suivante :

$$DPPH^{\bullet} + AH \longrightarrow DPPH\text{-}H + A^{\bullet}$$

On commence d'abord par la dissolution d'une masse de 10 mg d'extrait dans 10 mL de méthanol pour obtenir une solution mère à une concentration de 1 mg/mL. Ensuite, pour évaluer les absorbances, les différentes concentrations sont préparées en diluant la solution mère à 1 mg/mL pour obtenir les concentrations suivantes : 1 mg/mL, 0.5 mg/mL, 0.25 mg/mL et 0.125 mg/mL.

Le protocole consiste à réaliser un test anti-radicalaire du DPPH, mesuré au spectrophotomètre UV. Pour cela, 0.002 mg de DPPH sont dissous dans 50 mL de méthanol. Dans plusieurs tubes à essai, 1 mL d'extrait est introduit, suivi de l'ajout de 3 mL de la solution méthanolique de DPPH pour chaque concentration. Le mélange est ensuite agité pendant 30 secondes à l'aide d'un vortex. Après une réaction de 30 minutes à température ambiante et à l'abri de la lumière, les absorbances sont mesurées à 517 nm par rapport à une solution blanche contenant uniquement la solution de DPPH. La détermination de l'activité anti-radicalaire est exprimée selon la relation suivante :

$$\text{Inhibition } \% = \left[\frac{(Abs_1 - Abs_2)}{Abs_1}\right] 100 \qquad (1)$$

Abs $_1$: Absorbance du blanc.

Abs $_2$: Absorbance de l'extrait

II. 5. 3. Test de blanchissement du β-carotène

La capacité des extraits à prévenir le blanchissement du β-carotène est évaluée selon la méthode décrite par Miller (1971) [9]. Pour préparer le mélange β-carotène/acide linoléique ; 0.5 mg de β-carotène sont dissous dans 1 mL de chloroforme, puis 0.025 mL d'acide linoléique et 200 mg de Tween 40 sont ajoutés. Après évaporation du chloroforme, 100 mL d'eau distillée oxygénée sont ajoutés avec agitation vigoureuse pour former une émulsion.

Pour le test, 2.5 mL de l'émulsion préparée précédemment sont mélangés avec 0.350 mL de l'extrait à analyser (2 mg/mL). Le contrôle positif utilisé est le BHT comme antioxydant standard, tandis que le contrôle négatif est réalisé avec le solvant des extraits. Le blanchissement du β-carotène est mesuré à 490 nm à intervalles réguliers au cours des 5 premières heures, ainsi qu'après 24 heures et après 48 heures. Le pourcentage d'inhibition de la dégradation du β-carotène par les extraits est calculé selon l'équation suivante :

$$AAR = \left[\frac{Abs_{Échantillon}}{Abs_{BHT}}\right] \times 100 \qquad (2)$$

AAR : Activité antioxydante relative

$Abs_{Échantillon}$: Absorbance de l'extrait dans un temps déterminé.

Abs_{BHT} : Absorbance de BHT dans un temps déterminé.

II. 5. 4. Test ABTS

Le test TEAC selon Re et al. (1999) [10] a été réalisé. Le radical coloré mono-cation $ABTS^{\cdot+}$ a été généré par l'oxydation de l'ABTS [2,2'-azinobis (3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonicacid)] à l'aide de persulfate de potassium. Ce cation radicalaire stable, $ABTS^{\cdot+}$, a été observé en présence de composés antioxydants à 734 nm.

A) Préparation de deux solutions mères 1 et 2

α. Solution mère d'ABTS (1)

Dissoudre 7 mmol d'ABTS dans 1 litre d'acide acétique pour obtenir une solution mère à une concentration de 7 mmol/L, en veillant à bien mélanger jusqu'à dissolution complète de l'ABTS, puis stocker cette solution à l'abri de la lumière à une température de 0 à 4 °C.

β. Solution mère de persulfate de potassium (2)

Dissoudre 2.45 mmol de persulfate de potassium dans suffisamment d'acide acétique pour obtenir un volume total de 1 litre à un pH de 4.5, en veillant à agiter vigoureusement la solution jusqu'à ce que le persulfate de potassium soit complètement dissous. Conserver ensuite cette solution mère à l'abri de

la lumière, à une température de 0 à 4 °C. Il est essentiel de manipuler ces solutions avec précaution et de les stocker dans des conditions appropriées pour garantir leur stabilité et leur efficacité.

B) Préparation de la solution ABTS

Pour préparer la solution réactionnelle d'ABTS, deux volumes de 5 mL de chaque solution mère 1 et 2 sont mélangés ensemble. Ce mélange est ensuite gardé dans l'obscurité à température ambiante pendant 12 à 16 heures. Les mesures sont réalisées à une longueur d'onde de 734 nm.

C) Protocole de test ABTS

Dans une plaque à 96 puits, 10 µL d'échantillon à différentes concentrations sont déposés, suivis de l'ajout de 200 µL de solution d'ABTS à chaque puits. Ensuite, la plaque est conservée dans l'obscurité et agitée pendant 10 minutes. L'acide béta-hydroxy (BHA) est utilisé comme solution standard de référence. Pour garantir des résultats précis, les échantillons sont dilués de manière à ce que les absorbances se situent entre 0.2 et 0.8.

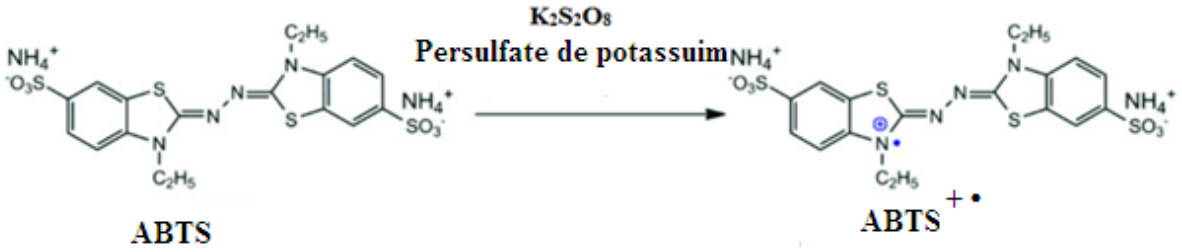


Figure 27 : Réduction des radicaux ABTS par le persulfate de potassium [12].

II. 5. 5. CUPRAC

La méthode CUPRAC a été appliquée selon quatre procédures interdépendantes : normale (N), incubée (I), hydrolysée (H) et hydrolysée-incubée (H&I), en fonction de la nature de l'échantillon [11]. Ce test implique l'ajout de 0.05 mL d'extrait à 1 mL de tampon acétate d'ammonium (pH = 6), 1 mL de solution de néocuproïne de concentration 7.5 x 10^{-3} mol/L, de chlorure de cuivre à une concentration de 0.01 mol/L, et de compléter le volume avec de l'eau distillée jusqu'à un volume total de 4.1 mL. Le mélange a été laissé pendant 30 minutes à 25 °C à l'abri de la lumière, puis l'absorbance a été mesurée à 450 nm. Le BHA (béta hydroxyanisol) a été utilisé comme référence et les résultats sont exprimés en équivalents mg.

II. 5. 6. Processus de piégeage du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2)

L'efficacité de piégeage du peroxyde d'hydrogène a été confirmée selon la méthode de Ruch, Cheng et Klaunig (1989) [13]. Pour réaliser cette méthode, nous avons ajouté à chaque mL d'extraits une quantité de 2 mL d'une solution de peroxyde d'hydrogène (43 mM) et 6 mL de tampon phosphate

(pH = 7.4). Après incubation à 30°C pendant 10 min contre une solution à blanc contenant du tampon phosphate sans peroxyde d'hydrogène, l'absorbance a été mesurée à 230 nm. Le pourcentage d'élimination du peroxyde d'hydrogène des extraits et du composé standard (acide ascorbique) a été calculé selon la formule ci-dessous :

$$\text{Activité de piégeage de } H_2O_2(\%) = \left(\frac{A_0 - A_1}{A_0}\right) \times 100 \qquad (3)$$

A_0 : Absorbance témoin.

A_1 : Absorbance en présence des extraits.

II. 5. 7. Test de chélation du fer ferreux

La capacité de chélation du Fe^{2+} des extraits a été déterminée selon la méthode de Minotti et Aust (1987) [14], avec une légère révision proposée par Puntel et al. (2005)[15]. Pour cela, la solution de chaque échantillon d'extrait (500 µL) est mélangée avec 100 µL de $FeCl_2$ (0.6 mM dans l'eau distillée) et 900 µL de méthanol. Après 5 minutes, 100 µL de Ferrozine (5 mM dans le méthanol) sont ajoutés au milieu réactionnel. Le mélange est vigoureusement agité puis laissé pendant 10 minutes à température ambiante, ce qui permet la formation d'un complexe de couleur violette (Fe^{2+}-Ferrozine) présentant un maximum d'absorption à 562 nm. Par ailleurs, un contrôle négatif–constitué de tous les réactifs sauf l'échantillon à tester, qui est remplacé par un volume équivalent de méthanol. L'EDTA (acide éthylène diamine tétra acétique) est utilisé comme chélateur de référence dans une plage de concentrations allant de 0 à 200 µg/mL.

II. 6. Dosages des extraits polyphénoliques

II. 6. 1. Teneur totale en phénols et flavonoïdes

La teneur phénolique totale a été quantifiée à l'aide de la méthode colorimétrique de Folin-Ciocalteu (F-C) [16]. 1000 µL d'échantillon et 1000 µL de réactif F-C ont été mélangés dans un tube, laissés pendant 2 minutes, puis 800 µL de solution de carbonate de sodium à 7.5 % (p/v) ont été ajoutés. Le mélange a été incubé à température ambiante pendant 30 minutes dans l'obscurité. Ensuite, l'absorbance a été mesurée à une longueur d'onde de 760 nm à l'aide d'un spectrophotomètre. Des concentrations d'acide gallique allant de 25 à 300 µg/mL ont été préparées pour construire une courbe d'étalonnage par ajustement linéaire [17]. Les échantillons ont été analysés en duplicata. Pour la teneur totale en flavonoïdes, elle a été déterminée selon la méthode au chlorure d'aluminium [18], où 0.5 mL d'échantillon ont été ajoutés, à 300 µL d'$AlCl_3$, et le contenu a été mélangé pendant 10 s et laissé réagir à température ambiante pendant 10 min. Ultérieurement, l'absorbance a été mesurée à 510 nm. Des

solutions de catéchines de concentrations variant de 0 à 1 200 µg/mL ont été préparées, permettant d'obtenir une courbe d'étalonnage par ajustement linéaire.

II. 6. 2. Dosage des tanins condensés

Pour effectuer ce dosage, la méthode de la vanilline avec de l'HCl a été employée. Cette méthode est basée sur la formation de complexes rouges formés par la réaction de la vanilline avec le groupe flavonoïde terminal [19] ; cela s'explique par la réaction des tanins avec la vanilline pour être transformés en anthocyanes de couleur rouge [20]. Pour cela, un volume de 50 µL de chaque extrait a été ajouté à 1500 µL de la solution vanilline/méthanol à 4 %, puis mélangé vigoureusement, puis un volume de 750 µL d'acide chlorhydrique (HCl) concentré a été ajouté. Le mélange obtenu est laissé à température ambiante pendant 20 min. L'absorbance est mesurée à 550 nm contre un blanc. La courbe d'étalonnage a été préparée à partir d'une solution mère de catéchine à différentes concentrations entre 0 et 1000 µg/mL.

II. 6. 3. Détermination des anthocyanes totaux

Ce dosage repose sur la transformation structurelle réversible des anthocyanes à différentes valeurs de pH [21]. Cette méthode présente une variation de couleur, étant colorée à pH = 1.0 et incolore à pH = 4.5. L'avantage de la méthode pH-différentiel est sa capacité à permettre une mesure précise et rapide de l'anthocyanine totale. À cet effet, l'échantillon a été dilué en utilisant une solution (a) de chlorure de potassium (0.025 M à pH 1.0) et une solution (b) d'acétate de sodium (0.4 M à pH 4.5). Le blanc est constitué de 100 µL de méthanol acidifié par HCl à 0.1% et 4.9 mL de solution tampon (pH = 1.0 et pH = 4.5). L'absorbance a été mesurée à 520 nm et 700 nm, puis calculée selon la formule suivante :

$$A = (A_{520} - A_{700})\text{pH1} - (A_{520} - A_{700})\text{pH 4.5} \qquad (4)$$

II. 7. Activité quorum quenching

Le test biologique d'inhibition du quorum-sensing a été réalisé comme décrit dans la littérature [22]. 5 mL de soft top agar fondu à chaud (2.0 g de tryptone, 1.3 g d'agar-agar, 1.0 g de chlorure de sodium dans 200 mL d'eau distillée), cultivés avec une culture d'une nuit de CV026 (100 µL). 20 µL de C_6HSL a été ajouté comme source exogène d'AHL (acyl homoserine lactone). Ce mélange a été immédiatement ajouté à la surface d'une plaque de Luria Bertani agar (LBA) solidifiée sous forme de film. Au total, des puits de 5 mm de diamètre ont été réalisés après solidification du mélange sur chaque plaque. Chaque puits a ensuite été rempli de 50 µL de solution d'extrait stérilisé par filtration dans de l'eau distillée à une concentration inférieure à la CMI. L'inhibition du quorum-sensing (QSI) est indiquée par un halo de couleur crème ou blanche autour de ce puits sur un tapis violet de bactéries activées, CV026. Un test de détection a été réalisé en utilisant des concentrations d'extraits diluées en série (de 1:1 à 1:8, en utilisant un bouillon LB comme diluant). Le paramètre évalué était la plus faible

dilution d'échantillons entraînant une inhibition indiquant la synthèse du pigment de violacéine. Chaque expérience a été réalisée en triplicata. Les échantillons ont été incubés pendant trois jours à 30°C, puis les diamètres des zones d'inhibition du quorum-sensing ont été mesurés.

II. 8. Méthode d'inhibition de la violacein utilisant *C. violaceum* CV12472

La détection des inhibitions potentielles du quorum (QSI) contre *C. violaceum* ATCC 12472 a été réalisée pour tous les extraits comme rapporté dans la littérature [23]. Un total de 10 µL de culture nocturne de *C. violaceum* ajustée à 0.4 DO à 600 nm a été ajouté à une microplaque stérile contenant 200 µL de bouillon LB. Le test a été réalisé en présence et en l'absence d'une concentration d'extrait sub-MIC. Ces plaques ont été incubées pendant 24 h à 30 °C et observées pour une diminution de la production de pigment de violacéine. Un bouillon avec *C. violaceum* CV 12472 a été utilisé comme contrôle positif. L'absorbance a été détectée à 585 nm et la formule suivante calcule le pourcentage d'inhibition de la violacéine :

$$\text{Inhibition de la violaceine } (\%) = \frac{\text{OD}_{585\text{control}} - \text{OD}_{585\text{sample}}}{\text{OD}_{585\text{control}}} \times 100 \qquad (5)$$

II. 9. Inhibition de la motilité par essaimage de *P. aeruginosa* PA01

Le test d'inhibition de la motilité par essaimage a été réalisé comme décrit précédemment [24]. Des cultures nocturnes de la souche *P. aeruginosa* PAO1 ont été injectées ponctuellement au centre de plaques d'essaimage impliquant 1 % de peptone, 0.5 % d'agar, 0.5 % de NaCl et 0.5 % de D-glucose stérilisé par filtre avec diverses concentrations d'extraits (50, 75 et 100 µg/mL) dans de l'eau distillée. Les plaques ont été incubées en position verticale, à une température convenable pendant 18 hours, et l'expérience témoin a été réalisée de la même manière, mais sans extraits. Suite aux fronts d'essaim des cellules bactériennes, la migration en essaim a été enregistrée. La puissance d'essaimage a été détectée en mesurant la distance d'essaimage depuis le site central de la fortification.

II. 10. Test d'activité antibiofilm

Les micro-organismes utilisés dans cette étude étaient *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* et *Candida albicans*. Les CMI ont été déterminées par la méthode de dilution en bouillon de microtitrage, conforme aux directives du Clinical and Laboratory Standards institut (CLSI) [25]. Les CMI représentent les concentrations minimales inhibitrices, correspondant à la plus faible concentration d'extrait capable d'inhiber la croissance visible d'un micro-organisme après une nuit d'incubation. Le milieu de culture utilisé était le bouillon Mueller-Hinton (MHB), avec une densité bactérienne de 5×10^5 unités formant une colonie (UFC)/mL. Des suspensions cellulaires (100 µL) ont été inoculées dans des puits de plaques de microtitrage à 96 puits, en présence d'extraits végétaux à différentes

concentrations (2, 1, 0.5, 0.25, 0.125, 0.0625, 0.03125 mg/mL). Les microplaques ont ensuite été incubées à 37 °C pendant 24 heures.

II. 11. Activité enzymatique

II. 11. 1. Test d'inhibition de l'alpha-amylase

Cette méthode a été utilisée pour évaluer la capacité de chaque extrait phénolique à inhiber l'alpha-amylase. Les extraits étudiés ont été dissous dans du méthanol à des concentrations de 6.25, 12.5, 25, 50 et 100 µg/mL. Ensuite, 150 µL de solution tampon (Na_2HPO_4/NaH_2PO_4 (0.2 M), NaCl (0.017 M) à pH 6.9) et 200 µL d'enzyme amylase ont été ajoutés à chaque concentration d'extrait ou d'acarbose. La méthode de l'acide 3,5-dinitrosalicylique (DNSA) a été utilisée pour évaluer l'inhibition de l'α-amylase (Wickramaratne et al. 2016) [26]. 200 µL de réactif DNSA (12 mg de tartrate de potassium et de sodium tétrahydraté dans 8.0 ml de NaOH (2M) et 20 mL de solution d'acide 3,5-dinitrosalicylique à 44 µM) ont été ajoutés et chauffés à environ 95 °C pendant 20 min. Chaque mélange a été mesuré par spectrophotométrie UV à 540 nm. L'équation ci-dessous a été utilisée pour calculer les valeurs d'inhibition et de l'IC50, qui ont également été déterminées.

$$\text{Inhibition (\%)} = \frac{\text{Abs Contrôle - Abs}_{\text{échantillon}}}{\text{Abs}_{\text{Contrôle}}} \times 100 \qquad (6)$$

II. 11. 2. Test d'inhibition de l'α-glucosidase

L'inhibition de l'α-glucosidase a été obtenue en utilisant le protocole suivant [27] : 20 µL d'extrait ou d'acarbose à différentes concentrations (12.5, 25, 50, 100 et 200 µg/mL dans du DMSO), 20 µL de tampon phosphate de sodium (pH= 6.8), et 20 µL de solution d'α-glucosidase (amandes) (5 µg/mL) ont été incubés à 37 °C pendant 10 minutes. Ensuite, 20 µL de p-nitrophényl-β-D-glucopyranoside (p-NPDG, 1 µg/mL) ont été ajoutés à chaque mélange pour démarrer la réaction, et les solutions ont été incubées pendant 30 minutes à 37 °C. Après incubation, 240 µL de solution de carbonate de sodium (0.1 M) à pH =10 ont été ajoutés pour arrêter la réaction, et l'inhibition de l'α-glucosidase a été déterminée en mesurant l'absorbance (Abs) à 410 nm. L'inhibition de l'activité de la glucosidase a été calculée à l'aide de l'équation ci-dessous.

$$\text{Inhibition de } \alpha - \text{glucosidase (\%)} = \frac{Abs_{\,Contrôle} - Abs_{échantillon}}{Abs_{Contrôle}} \times 100 \qquad (7)$$

II. 11. 3. Activité anti-cholinestérase

Les activités inhibitrices de l'acétylcholinestérase (AChE) et de la butyrylcholinestérase (BChE) par l'extrait phénolique ont été réalisées en utilisant la méthode colorimétrique décrite par Ellman et al. (1961) [28], avec quelques ajustements (Tamfu et al. 2020a) [29]. Le mélange réactionnel était composé de 130 µL de tampon phosphate de sodium (100 mM, pH 8.0) et de 20 µL de solution enzymatique

(AChE ou BChE), combiné à différentes concentrations et préparé dans du méthanol. Le mélange résultant a été incubé pendant 15 minutes à 25 °C. Ensuite, 20 µL de DTNB (acide 5,5-dithio-bis (2-nitrobenzoïque), 0.5 mM) ont été ajoutés. La réaction a été initiée par l'ajout de 20 µL d'iodure d'acétylthiocholine (0.71 mM) ou de chlorure de butyrylthiocholine (0.2 mM). La couleur jaune est apparue dans la réaction finale du DTNB avec la thiocholine, produite par l'hydrolyse enzymatique du chlorure de butyrylthiocholine ou de l'iodure d'acétylthiocholine, respectivement. Les absorbances ont été mesurées par spectrophotométrie UV à une longueur d'onde de 412 nm. Les résultats ont été exprimés en pourcentage d'inhibition enzymatique (%).

2me Partie : Étude de l'activité anticorrosive par revêtement métallique

Dans le cadre de cette étude, des tests sont réalisés pour évaluer la performance des revêtements métalliques en termes de résistance à la corrosion. Les méthodes incluent la mesure de la densité de courant de corrosion, l'exposition à des environnements agressifs comme des solutions salines ou acides et des tests de polarisation, qui sont fréquemment utilisés pour déterminer l'efficacité de la protection contre la corrosion. De plus, des analyses microscopiques, telles que la microscopie électronique à balayage (MEB), peuvent être utilisées pour observer la morphologie et l'intégrité des revêtements après exposition [30].

II. 12. Réalisation du revêtement

Ces expériences sont basées sur l'utilisation des extraits de polyphénols comme des ajouts qui optimisent le revêtement métallique par électrodiposition. Les substrats utilisés sont des plaques rectangulaires d'acier doux et le tableau suivant donne leur composition chimique.

Tableau 3 : Constitution chimique de l'acier doux de nuance **E24-2**.

Elément	C	Mn	P	S	Si	Al	N	Fe
%	0.17	0.6	0.035	0.035	0.04	0.02 à 0.05	0.05	99.05 à 99.02

Les plaques rectangulaires de 2 cm x 3 cm x 0.1 cm de dimensions sont recouvertes par une résine d'époxydes (Figure 28) pour laisser une seule surface exposée.

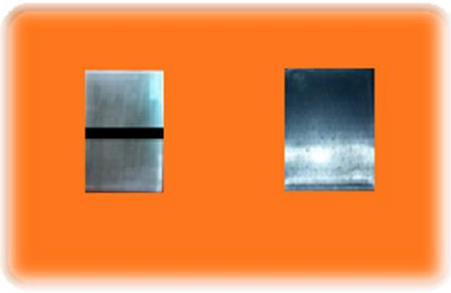


Figure 28 : Surface de revêtement et surface enduite de résine époxy.

Avant chaque essai, les surfaces ont été traitées par un polissage mécanique avec du papier abrasif à différents grades, nettoyées à l'acétone, rincées à l'eau distillée, puis séchées.

II. 12. 1. Plaque de zinc

Le zinc est considérablement employé en tant que couche métallique appliquée sur les surfaces en acier dans le but de les protéger contre la corrosion en raison de sa robustesse contre ce phénomène nuisible, ce qui peut être obtenu par différentes méthodes [31]. Ce métal est très employé dans plusieurs applications telles que : le revêtement métallique, l'arrangement des alliages et des composés chimiques à base de zinc pour inhiber la corrosion [32].

II. 12. 2. Milieu corrosif

L'eau de mer, qui est le milieu corrosif utilisé pour estimer la capacité d'inhibition de la corrosion, est obtenue de la côte de Boumerdès, sa salinité est de 48 g/L [33]. La salinité augmente généralement avec la profondeur et il existe une zone distincte appelée halocline, où la salinité augmente brusquement. La salinité croissante de l'eau de mer entraîne une augmentation de la densité de l'eau. L'eau de mer à forte salinité coule généralement en dessous de l'eau à faible salinité, cela conduit à une stratification par salinité [33].

II. 12. 3. Montage expérimental pour réaliser l'électrodéposition

La solution électrolyte est une solution aqueuse incluant différents sels métalliques : l'acide borique (H_3BO_3, 20 g/L), le chlorure de zinc ($ZnCl_2$, 64 g/L), le chlorure de potassium-(KCl, 200 g/L) et différentes concentrations d'extraits polyphénoliques de la plante utilisée comme additifs.

II. 12. 4. Appareils et instruments utilisés

Les instruments employés dans cette étude incluent un générateur de courant continu de modèle PS-303D, un agitateur mécanique équipé d'un barreau aimanté IKA-COMBIMAG.RCT, une balance électronique Sartorius 1219 MP, ainsi qu'un pH-mètre.

II. 12. 5. Procédé d'électrodéposition

Les expériences ont été réalisé en utilisant l'agitation douce, dans un milieu aéré à des valeurs de pH et de courant bien précises pendant une durée de temps adéquate. Le substrat d'acier et l'électrode de zinc (99.91 %) sont émergés partiellement dans le bain électrolytique. La plaque d'acier représente la cathode de la cellule électrochimique, en parallèle avec la plaque de zinc qui représente l'anode, en laissant une distance d'environ 1cm entre les deux pôles (Figure 29). Pour déterminer le poids du zinc déposé sur les surfaces revêtues, les échantillons ont été pesés avant et après le revêtement. À la fin du processus, les échantillons ont été retirés du bain, rincés à l'eau distillée et séchés (Figure 30).

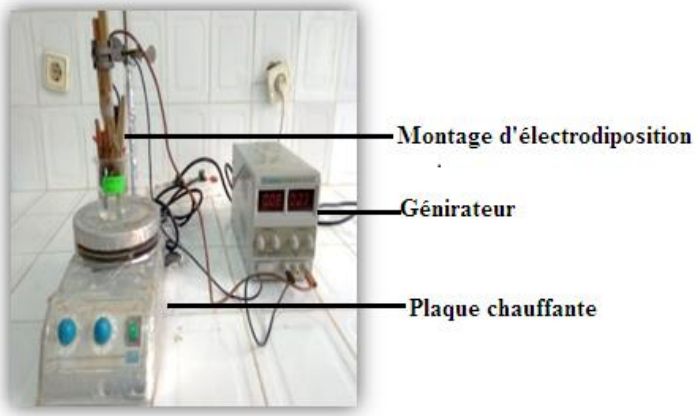


Figure 29 : Dispositif d'électrodéposition.



Figure 30 : Supports recouverts.

Les caractéristiques expérimentales des revêtements qui protègent l'acier sont : la résistance à la corrosion ainsi que la porosité et l'adhérence de la couche déposée. De plus, les facteurs qui peuvent contribuer à la formation de la couche protectrice sont : le courant imposé, le pH de l'électrolyte, le temps de recouvrement, le degré d'agitation et le type des additifs ajoutés [34].

II. 12. 6. Facteurs influençant le dépôt électrolytique

II. 12. 6. 1. Agitation de l'électrolyte

Au cours de l'électrodéposition, l'électrolyte perd une certaine concentration pour réaliser le revêtement sur la cathode. Il est indispensable d'appliquer une agitation pour harmoniser les concentrations afin d'obtenir un recouvrement durable et uniforme [35].

II. 12. 6. 2. pH du bain

Le pH est important pour la formation du dépôt. Les pH des solutions d'électrolyte restent constants durant les expériences grâce à l'addition de solutions tampons [36]. Le meilleur dépôt a été obtenu entre les valeurs de pH de 1 et 5.5.

II. 12. 6. 3. Densité de courant

Si la densité de courant augmente, la vitesse de formation des germes s'accroît et on observe une augmentation de la vitesse de diffusion des ions [37]. Plusieurs expériences ont été réalisées en faisant

varier la densité du courant entre 0.01 et 0.1 A/cm^2, tout en maintenant tous les autres paramètres constants.

II. 12. 6. 4. Concentration

En général, un accroissement de concentration est effectué afin d'obtenir une meilleure déposition de revêtement. Les essais sont effectués en utilisant diverses concentrations des extraits polyphénoliques de *Sanguisorba minor* L.

II. 12. 7. Méthodes d'estimation des facteurs d'inhibition

II. 12. 7. 1. Gravimétrie

Cette méthode est très facile à manipuler. À cet effet, il est indispensable d'utiliser une balance électronique analytique sensible à des minimums de différences de masses. Ces dernières sont utilisées pour mesurer la vitesse de corrosion et l'efficacité inhibitrice dans le cas d'emploi d'un inhibiteur. Cette technique repose sur la mesure de la masse dégradée par la corrosion, ce qui donne Δm, subie par un échantillon de surface S pendant un temps d'immersion t dans le milieu corrosif maintenu à température constante [38]. Le but de cette méthode est l'estimation de la vitesse de corrosion (V_{Corr}), qui se définit comme une perte de masse par unité de surface et de temps (mg/cm^2.h) et donnée par l'équation suivante :

$$V_{CORR} = \frac{\Delta m}{t \times S} \qquad (8)$$

Avec $\Delta m = m_1 - m_2$

m_1 : masse de l'échantillon en mg avant l'essai.

m_2 : masse de l'échantillon en mg après l'essai.

S : surface totale de l'échantillon en cm^2.

t : temps d'immersion de l'échantillon dans la solution en heure.

L'efficacité inhibitrice est exprimée par l'équation suivante :

$$EI = \frac{V^0_{corr} - V^{inh}_{corr}}{V^0_{corr}} \times 100 \qquad (9)$$

V^0_{corr} : est la vitesse de corrosion en absence d'inhibiteur.

V^{inh}_{corr}: est la vitesse de corrosion en présence d'inhibiteur.

Néanmoins cette méthode ne permet pas l'approche des mécanismes mis en jeu lors de la corrosion. Le recours à des techniques électrochimiques s'avère nécessaire pour compléter l'étude de la corrosion et de son inhibition.

II. 12. 7. 2. Méthodes électrochimiques

a) Montage expérimental

Le dispositif pour les études électrochimiques comprend une cellule électrochimique où l'échantillon est placé, un générateur de courant continu pour stimuler les réactions, et un potentiostat pour réguler la tension et mesurer les courants. Il utilise également des électrodes de référence, de travail et une électrode auxiliaire pour des mesures précises. Des appareils supplémentaires comme des pH-mètres et un spectromètre peuvent être intégrés pour compléter l'analyse des solutions. Ce système permet d'évaluer la corrosion et les propriétés électrochimiques des matériaux.

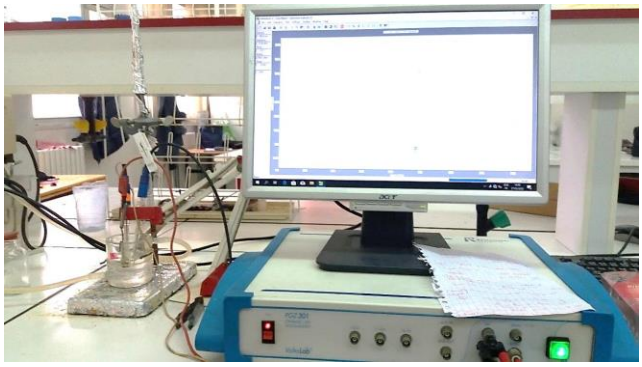


Figure 31 : Dispositif qui sert aux études électrochimiques.

- **Électrode de travail**

L'électrode de travail est le substrat sur lequel se réalisent les réactions électrochimiques. Ces réactions interfaciales sont déterminées et limitées par le comportement chimique de la surface de l'électrode. Dans ce récent travail, le type de l'électrode de travail est un acier doux de nuance E24-2 avec une électrode de zinc non couverte et couverte de zinc (sans et avec l'addition d'extraits de plante).

- **Électrode de référence**

Le rôle de l'électrode de référence est de conserver la stabilité de tension de l'électrode de travail tandis que la contre-électrode permet de fermer le circuit en fournissant un courant équilibré, en évitant l'accumulation de charges électriques. Cette électrode est un élément essentiel dans l'électrodéposition, qui se caractérise par un potentiel invariable dans le bain d'immersion [39]. L'électrode de référence est l'électrode au calomel saturé ECS (Hg_2Cl_2/Hg/KCl). Son potentiel par rapport à l'électrode normale à hydrogène (ENH) est égal à 0.245 V.

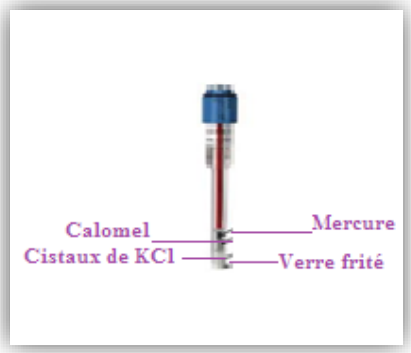


Figure 32 : Image d'une électrode de référence au calomel saturée en KCl.

- **Électrode auxiliaire**

Son rôle principal est de produire un chemin complet pour le courant électrique dans le système électrochimique. Elle n'est pas directement incluse dans la réaction d'électrodéposition, inversement à l'électrode de travail (anode) et à l'électrode de contre-électrode (cathode), mais elle est nécessaire pour garder l'équilibre électrique et chimique dans la solution électrolytique, est un métal conducteur tels que le platine, le carbone (comme le graphite), l'acier inoxydable, ou même des métaux moins nobles comme l'acier [40].



Figure 33 : Photo d'une électrode auxiliaire.

b) Suivi du potentiel en circuit ouvert

Lorsqu'un métal réagit avec le milieu électrolytique pendant son immersion dans cette solution, cela signifie qu'il se charge électriquement avec l'apparition d'une double couche électrochimique similaire à un condensateur électrique. Après un laps de temps, l'électrode métallique atteint un potentiel désigné par potentiel en circuit ouvert (OCP), potentiel libre, potentiel de corrosion ou potentiel d'abandon [41], par rapport à la solution. Pendant l'enregistrement, ce potentiel d'abandon n'atteint pas immédiatement une valeur stationnaire. Quatre cas peuvent se présenter (Figure 34) :

(a) La formation d'une couche protectrice : passivation.

(b) La dégradation de l'oxyde métallique par corrosion.

(c) La passivation suivie d'une corrosion.

(d) La destruction du film protecteur qui est formé déjà à l'immersion.

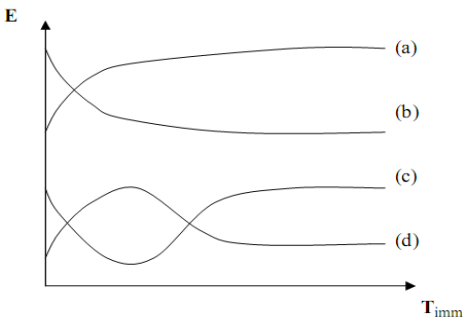


Figure 34 : Variation du potentiel de corrosion durant l'immersion du métal dans le milieu corrosif.

c) Courbes de polarisations

Les courbes de polarisation permettent d'obtenir des informations sur :

- ✓ Le comportement du métal immergé dans l'électrolyte.
- ✓ La détermination du mécanisme de corrosion (cinétique de transfert, intervention de la diffusion des espèces en solution, évènements de passivation, etc.).
- ✓ La détermination des types d'inhibition (cathodique, anodique, ou mixte).
- ✓ La valeur de la densité de courant correspondante et la vitesse de balayage en potentiel qui doit impérativement être suffisamment lente pour assurer la réversibilité des réactions.
- ✓ L'évaluation de la résistance de polarisation Rp en mesurant la pente de la courbe I = f (E) autour du potentiel de corrosion [42].

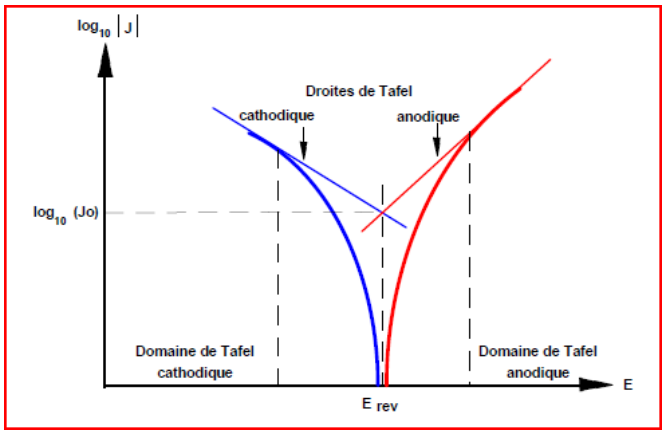


Figure 35 : Détermination des paramètres électrochimique à partir des droites de Tafel.

L'équation suivante représente l'efficacité inhibitrice EI% [43] :

$$EI = \frac{I^{0}_{corr} - I^{inh}_{corr}}{I^{0}_{corr}} \times 100 \qquad (10)$$

I^{0}_{corr} Et I^{inh}_{corr} représentent respectivement les courants de corrosion en absence et en présence d'inhibiteur.

d) Impédance électrochimique

Les méthodes électrochimiques classiques présentent le défaut d'ignorer certains éléments caractéristiques de la surface métal/solution et d'incapacité pour isoler et analyser les étapes d'un processus complexe. C'est le cas en particulier des termes capacitifs de la double couche électrochimique et l'impédance électrochimique, est la seule méthode utilisée pour déterminer la contribution de la résistance de la solution à l'estimation du courant alternatif de corrosion. Cette application est la réponse de l'interface à un signal sinusoïdal (i ou E), surimposé à un signal continu, et le système métal/solution peut alors être approprié à un circuit électrique. Les mesures d'impédance sont fréquemment montrées

dans le plan complexe de Nyquist. L'abscisse correspond à la partie réelle de l'impédance et l'ordonnée à la partie complexe [44] (Figure 36).

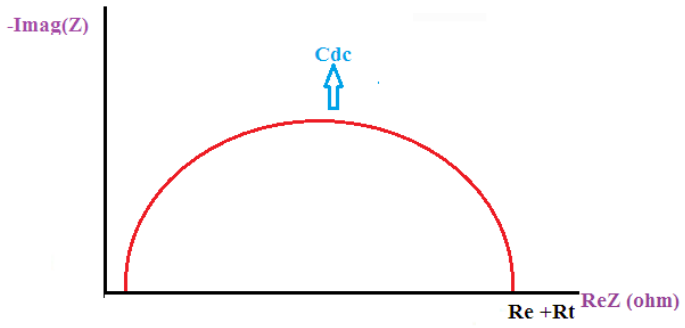


Figure 36 : Tracé de l'impédance électrochimique dans le plan complexe (plan de Nyquist).

L'équation ci-dessous est appliquée pour calculer l'efficacité inhibitrice :

$$EI(\%) = \frac{Rt_c - Rt_c^{\circ}}{Rt_c} \times 100 \qquad (11)$$

Où $\mathbf{Rt_c}$ et $\mathbf{Rt_c^{\circ}}$ sont les valeurs respectives de résistance de transfert de charge avec et sans l'inhibiteur.

Sachant que les résistances de transfert de charge (Rt) sont calculées à partir de la différence des fréquences minimales et maximales sur l'axe des réels (diamètre de demi-boucle). Les résistances de transfert de charge (Rt) désignent la difficulté avec laquelle les électrons ou autres charges sont transférés entre l'électrode et la solution dans une réaction électrochimique, et elles influencent la vitesse des réactions redox (réduction et oxydation). Lors de la spectroscopie d'impédance électrochimique, l'impédance est mesurée à travers une gamme de fréquences, et les fréquences minimales et maximales correspondent aux points où l'impédance varie de manière significative, ce qui est lié aux processus sous-jacents comme le transfert de charge ou la diffusion d'ions. Sur un diagramme de Nyquist, le diamètre de la demi-boucle (ou demi-cercle) représente la réponse du système aux processus résistifs et capacitifs et il est directement lié à la résistance de transfert de charge. Cette résistance peut être déterminée à partir de la différence des fréquences aux points où cette variation est observée. Pour cette étude, une analyse électrochimique a été réalisée en utilisant un potentiostat Radiometer (PGZ301) (Figure 31) et le logiciel Volta Master 4. La cellule électrochimique, en verre pyrex d'une capacité de 200 mL, est dotée de trois électrodes : une électrode de travail en acier doux revêtu, une électrode de référence au calomel saturé (ECS) et une contre-électrode en platine, chimiquement stable. Avant chaque essai, la cellule a été soigneusement nettoyée à l'acétone, rincée à l'eau distillée et séchée. Les données obtenues ont ensuite été transférées du logiciel Volta Master 4 vers Origin 6.0, un logiciel dédié à la gestion et à l'analyse des données scientifiques, pour permettre la traçabilité, l'étude, l'analyse et l'évaluation des résultats.

II. 12. 8. Estimation du revêtement

La méthode ASTM D3359 [45] est une évaluation visuelle largement utilisée dans l'industrie du revêtement, car elle permet d'évaluer de manière semi-quantitative l'adhérence du revêtement testé sur un substrat spécifique. Malgré ses nombreuses applications industrielles visant à garantir la qualité et la durabilité des revêtements, son application se caractérise par le fait qu'une incision en forme de "X" est réalisée à travers le revêtement. Un ruban adhésif est ensuite appliqué sur l'incision, puis retiré rapidement. Le test évalue la quantité de revêtement arraché en fonction des lignes d'incision. L'évaluation est effectuée visuellement à l'aide d'un tableau de classification qui quantifie l'adhérence en fonction de la surface de revêtement retirée.

Tableau 4 : Indicateurs de brillance.

Sélection de la géométrie	Unité GU	Degré de brillance
Hautement brillant 20°	70-100	Surface très brillante à peu brillante
Semi brillant ou satiné 60°	10-70	Surface satinée à mate
Très faiblement brillant 85°	0-10	Surface mate à mat profond



Figure 37 : Évaluation de l'adhérence.

II. 12. 8. 1. Évaluation de l'épaisseur du revêtement

Pour évaluer l'épaisseur d'un revêtement, différentes méthodes peuvent être appliquées, telles que les méthodes microscopiques et les méthodes colorimétriques. L'épaisseur du revêtement par électrodéposition peut être calculée en utilisant la loi de Faraday, qui établit une relation entre le courant électrique utilisé, la durée de dépôt, la masse molaire de l'élément déposé, la densité de courant et la charge. Voici la formule générale pour calculer l'épaisseur du revêtement [46] :

$$e = \frac{m}{\rho * s} * 10000 \qquad (10)$$

Où la constante (10000) est utilisée pour convertir le cm en µm.

$\boldsymbol{e}$: épaisseur du dépôt (cm)

$\boldsymbol{\rho}$: masse volumique du dépôt (g/cm^3)

$\boldsymbol{s}$: Surface soumise au test (cm^2)

$\boldsymbol{m}$: Masse de dépôt (g) / $\boldsymbol{m_{dépot} = \Delta m = m_f - m_i}$

$\boldsymbol{m_f}$: Masse de l'échantillon après revêtement (g)

$\mathbf{m_i}$: Masse de l'échantillon avant revêtement (g)

II. 12. 8. 2. Évaluation de la brillance

La brillance des revêtements électrodéposés se réfère à la quantité de lumière réfléchie par la surface du métal déposé. Un revêtement brillant présente une surface lisse qui réfléchit la lumière de manière homogène. La brillance joue un rôle prépondérant dans l'apparence des produits finis. Elle peut également influencer la résistance à la corrosion et l'adhérence des revêtements électrodéposés.

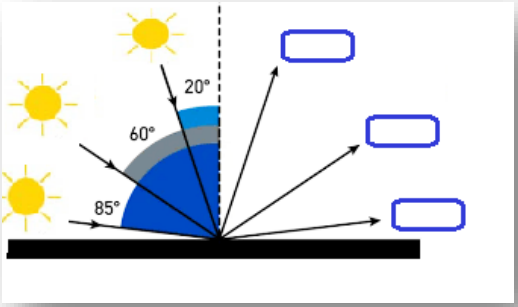


Figure 38 : Analyse des angles de réflexion de la lumière avec le Poly gloss.



Figure 39 : Poly mètre de brillance.

L'évaluation de la brillance d'une surface dépend de la quantité de lumière qu'elle réfléchit, mesurée en unités de brillance (GU). Cette quantité de lumière réfléchie est influencée par l'angle d'incidence ainsi que par les propriétés de la surface. La brillance peut être classée en trois catégories : mate, semi-brillante ou brillante. La brillance mesurée est généralement représentée en fonction de l'apparence visuelle de la surface sous trois angles d'incidence différents. Il existe une forte corrélation entre la brillance mesurée et l'aspect visuel pour les surfaces hautement réfléchissantes à un angle de 20° et pour les surfaces peu réfléchissantes à un angle de 85°. En revanche, la brillance devient moins

perceptible sur les surfaces hautement réfléchissantes à 85°, et sur les surfaces peu réfléchissantes à 20°. Pour décrire quantitativement l'apparence des surfaces à forte brillance, il est préférable d'utiliser un petit angle d'incidence (20°). À l'inverse, un angle plus grand (85°) est nécessaire pour différencier les surfaces à faible brillance [31].

II. 12. 8. 3. Aspects des revêtements des surfaces métalliques

Un microscope optique polarisant "LEICA DMLP" permettant des grossissements de 4 à 50 fois en utilisant la polarisation de la lumière (Figure 40), a été utilisé pour analyser les surfaces des revêtements sur les substrats testés. Les photos des microstructures des surfaces sont captées par un appareil numérique attaché au microscope optique.

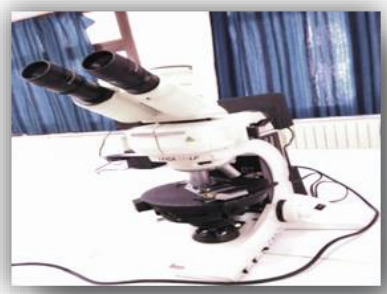


Figure 40 : Microscope optique polarisant.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Cristina, A., Kokeric, T., Tripon, S., Barjaktarevic, A., Cupara, S., & Vicas, S. I. (2022). Sanguisorba minor Scop. An Overview of Its Phytochemistry and Biological Effects. *Plants*, *12*(11), 2128.

[2]Trease G.E., Evans W.C., (1989). A textbook of Pharmacognosy (13th edition) Bacilluere Tinal Ltd, London.

[3] HarboneJ.B., (1998). Phytochemical Methods: A guide to modern techniques of plant analysis 3e ed.: Chapman and Hill. 303p.

[4] Çayan F, Tel-Çayan G, Deveci E, Duru ME, (2021). HPLC-DAD characterization of phenolic profile and in vitro antioxidant, anticholinesterase, and antidiabetic activities of five mushroom species from Turkey. Three Biotech. Jun; 11(6):273

[5] Tamfu, A.N.; Kucukaydin, S.; Ceylan, O.; Sarac, N.; Duru, M.E, (2021). Phenolic Composition, Enzyme Inhibitory and Anti-quorum Sensing Activities of Cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum Blume*) and Basil (*Ocimum basilicum Linn*). Chem. Afr. 1-9p,

[6] Yildirim A, Mavi A, Kara AA, (2001)Determination of antioxidant and antimicrobial activities of *Rumex crispus* L. extracts. J Agric Food Chem.; 49(8):4083-9p.

[7] Munteanu IG, Apetrei C, (2021). Analytical Methods Used in Determining Antioxidant Activity: A Review. Int J Mol Sci. Mar 25 ; 22(7)

[8] Morales, F. J., & Jiménez-Pérez, S, (2000). Free radical scavenging capacity of Maillard reaction products as related to colour and fluorescence. *Food Chem*, *72*(1), pp.119-125.

[9] H. E. Miller, (1971). "A Simplified Method for the Evaluation of Antioxidants," Journal of American Oil Chemists Society, Vol. 48, No. 2, pp 91-97.

[10]Re R, Pellegrini N, Proteggente A, Pannala A, Yang M, Rice-Evans C, (1999). Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. Free Radic Biol Med.; 26 (9-10):1231-7 p.

[11] Apak R, Gu¨clu¨ K, O¨ zyu¨rek M, Karademir S E (2004) Novel total antioxidant capacity index for dietary polyphenols and vitamins C and E, using their cupric ion reducing capability in the presence of neocuproine: CUPRAC method. J Agric Food Chem 52: 7970

[12]Nalaka Sandun Abeyrathne, E. D., Nam, K., & Ahn, D. U, (2021). Analytical Methods for Lipid Oxidation and Antioxidant Capacity in Food Systems. Antioxidants, *10*(10).

[13] Ruch, R. J., Cheng, S. J. and Klaunig, E. (1989). Prevention of cyto-toxicity and inhibition of intercellular communication by anti-oxidant catechins isolated from Chineese green tea. *Carcinogenesis*, 10, pp. 1003-1008.

[14] Minotti, G., & Aust, S. D. (1987). An investigation into the mechanism of citrate-Fe2+-dependent lipid peroxidation. Free Radical Biology and Medicine, 3(6), 379–387.

[15] Puntel, R. L., Nogueira, C. W., & Rocha, J. B. T. (2005). Krebs cycle intermediates modulate thiobarbituric acid reactive species (TBARS) production in Rat Brain in vitro. Neurochemistry Research, 30, 225–235.

[16] Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventos, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. Methods in Enzymology, 299, 152–178.

[17] Alirachdi,F., Meraghni,S., Touaibia, N. et M.Sabrina, (2018). Analyse quantitative des composés phénoliques d'une endémique algérienne Scabiosa Atropurpurea . Maritima. Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège, Vol. 87, articles, p.13 -21.

[18] Zhishen, J., Mengcheng, T. and Jianming, W, (1999). The Determination of Flavonoid Contents in Mulberry and Their Scavenging Effects on Superoxide Radicals. Food Chem, 64, p.555-559.

[19] H.P.S.Makkar, (2000), "In Quantification of tannins in tree foliage" Working document, FAO/IAEA, Vienna.

[20] Sun, B., Ricardo-da-Silva, J.M. and Spranger.I, (1998). Critical Factors of Vanillin Assay for Catechins and Proanthocyanidins. J. Agric. Food Chem, 46, pp. 4267-4274.

[21] Giusti, M.M. and Wrolstad, R.E. (2001). Characterization and Measurement of Anthocyanins by UV-Visible Spectroscopy. Curr. Protoc. Food Anal. Chem, F1.2.1-F1.2.13.

[22] Ceylan O, Tamfu AN, Doğaç Yİ, Teke M, (2020).Antibiofilm and anti-quorum sensing activities of polyethylene imine coated magnetite and nickel ferrite nanoparticles. 3Biotech. Dec; 10(12):513.

[23]Tamfu, A.N.; Ceylan, O.; Fru, G.C.; Ozturk, M.; Duru, M.E.; Shaheen, F, (2020).Antibiofilm, antiquorum sensing and antioxidant activity of secondary metabolites from seeds of Annona senegalensis, Persoon. Microb. Pathog, 144, p: 104-191.

[24] Kocak, G.; Tamfu, A.N.; Bütün, V.; Ceylan, O, (2021) Synthesis of quaternary piperazine methacrylate homopolymers and their antibiofilm and anti-quorum sensing effects on pathogenic bacteria. J. Appl. Pol. Sci., 138, 50466.

[25] Ceylan, O., Tamfu, A. N., Doğaç, Y. İ., & Teke, M, (2020). Antibiofilm and anti-quorum sensing activities of polyethylene imine coated magnetite and nickel ferrite nanoparticles. *3*
Biotech, *10*(12), 1-12.

[26] Wickramaratne MN, Punchihewa JC, Wickramaratne DB, (2016). In-vitro alpha amylase inhibitory activity of the leaf extracts of Adenanthera pavonina. BMC Complement Altern Med. Nov 15; 16(1):466.

[27] Kim, J. S., Kwon, C. S., & Son, K. H. Inhibition of α-glucosidase and amylaze by luteolin, a flavonoid. Biosci. Biotechnol. Biochem, *64*, 2458-2461, (2010).

[28] Ellman.GL, Courtney.KD, Andres.V.Jr, (1961). Feather-stone RM. A new and rapid colorimetric determination of Acetylcholinesterase activity. Biochem Pharmacol. Jul; 7:88-95.

[29] Tamfu, A. N., Ceylan, O., Kucukaydin, S., & Duru, M. E, (2020). HPLC-DAD phenolic profiles, antibiofilm, anti-quorum sensing and enzyme inhibitory potentials of Camellia sinensis (L.) O. Kuntze and Curcuma longa L. *LWT*, *133*, 110150.

[30] Vargas, J., & Pérez, M, (2020).Evaluation of the anticorrosive properties of metallic coatings under aggressive environments. Journal of Corrosion Science and Engineering, 23(4), 245-258.

[31] Karima, H, (2020). Inhibition de la corrosion d'un acier au carbone par les plantes Taxus baccata et Cedrus atlantica et leurs utilisations comme additives dans les bains d'électrodéposition. Thèse de doctorat, Universite Laarbi Tebessi –Tebessa,.

[32] Suedile, F, (2014). Extraction, caractérisation et étude électrochimique de molécules actives issues de la forêt amazonienne pour la protection du zinc contre la corrosion (thèse, Université des Antilles-Guyane).

[33] Liblik, T., & Lips, (2019). U.Stratification Has Strengthened in the Baltic Sea – An Analysis of 35 Years of Observational Data. Front. Earth Sci, *7*, 441033.

[34] Takata, F. M & Sumodjo, P. T. A, (2007). Electrodepos. Magn. Co Pd thin films: Influence of plating condition. Electrochimica Acta, Vol. 52, pp: 6089–6096,

[35] D. Lin, X. Wang, (2010). Electrodeposition of hydroxyapatite coating on CoNiCrMo substrate in dilute solution, Surface & Coatings Technology 204 3205–3213.

[36] M. Horynová, M. Remešová, L. Klakurková, K. Dvořák, I. Ročňáková, S. Yan, L. Čelko, G.L. Song, (2019).Design of tailored biodegradable implants: the effect of voltage on electrodeposited calcium phosphate coatings on pure magnesium, J. Am. Ceram. Soc. 102 123–135,

[38] P.Bommersbach, (2005). Evolution des propriétés d'un film inhibiteur de corrosion sous influencé de la température et de conditions hydrodynamiques, caractérisation par techniques électrochimiques, Thèse de doctorat, INSA de LYON.

[38] Boulkroune, M., (2014). Inhibition de la corrosion du zinc en milieu acide, Doctorat en science En chimie Soutenue.

[39] Abdel-Gaber, A.M., et *al.* (2006). Inhibitive action of some plant extracts on the corrosion Of steel in acidic media. Corros. Sci. 48(9) : p. 2765-2779.

[40] Landolt, D., (1993). Traité de matériau, corrosion et chimie de surface des métaux. Presses polytechniques et universitaire romandes, Lausane.

[41] Touhami, F., Aouniti, A. Abed, Y., Hammouti, B., Kertit, S. and Ramdani, A., (2000). Corrosion Inhibition of Armco iron in 1 M HCl media by new bipyrazolic derivatives, Corros. Sci. (42), p 929-940.

[42] D. Landolt, (1993).Corrosion et Chimie de Surface des Métaux, 1st Edition, AldenPress, Oxford, 4, 489.

[43] HINE, Fumio, (2012).Electrode processes and electrochemical engineering. Springer Science & Business Media.

[44] Wang, J., (2006). Analytical Electrochemistry. Third ed.; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA.

[45] ISO 2813: (2000). Paints and Varnishes - Measurement of Specular Gloss of Nonmetallic Paint Films at 20, 60 and 85°.

[46] Almeraya-Calderón, F., 2015. Characterization of corrosion behavior of painted galvanized steel under accelerated conditions. International Journal of Electrochemical Science, (10). pp. 4654-4665.

CHAPITRE III

Résultats et discussion

Dans cette partie, nous présenterons les résultats de nos études expérimentales. La première section est dédiée à l'analyse des données issues des expériences liées aux activités biologiques. Cela comprend les rendements des extraits obtenus, ainsi que l'identification et la quantification des composés phénoliques par HPLC-DAD. Nous avons également examiné les capacités anti-enzymatiques des extraits investigués, mettant en lumière les aspects significatifs de leur activité antioxydante. Par ailleurs, nous analyserons les inhibitions de la violacéine et du quorumsensing (QS), ainsi que l'inhibition de la motilité par essaimage sur *P. aeruginosa* PA01, sans négliger les propriétés antimicrobiennes et antibiofilm. En outre, nous avons étudié les capacités de résistance à la corrosion, la porosité et l'adhérence des revêtements obtenus par électrodéposition des extraits végétaux, en améliorant divers paramètres explorés, tels que le pH, le temps de revêtement et la concentration des additifs.

III. 1. Rendements des extraits obtenus

Les solvants polaires sont appropriés pour extraire les quantités maximales de composés phénoliques. Un mélange de méthanol et d'eau distillée (70/30 %) a donc été utilisé pour obtenir un extrait brut, suivie d'une séparation en phase liquide-liquide. L'utilisation d'autres solvants avec des polarités différentes lors de l'extraction permet d'obtenir des extraits présentant des rendements variés. Les extraits de quatre solvants : dichlorométhane (EDCM), acétate d'éthyle (EAE), n-butanol (EB) et l'eau distillée (EAQ) ont été obtenus à partir de l'extrait brut (méthanol-eau distillée) de *Sanguisorba minor*. Les rendements en pourcentage sont présentés dans la figure 41, et les plus élevés ont été observés pour l'extrait aqueux à 4.28 %, suivi du n-butanol à 2.67 %. Les rendements montrent que les composés végétaux ont des affinités différentes avec les solvants, les solvants polaires présentant des rendements plus élevés que les moins polaires.

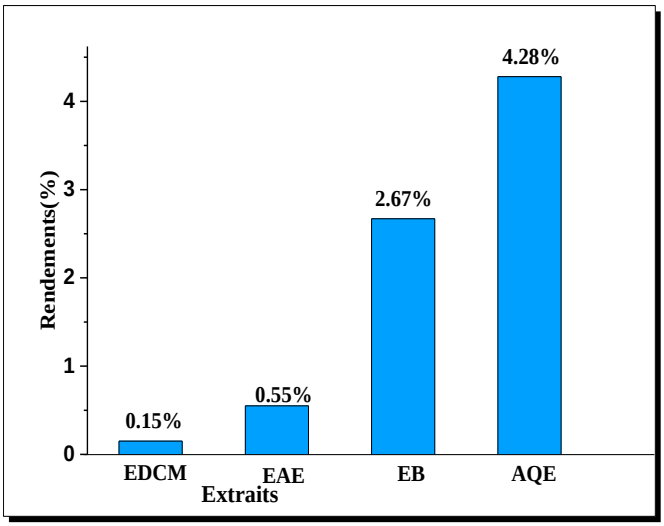


Figure 41 : Histogramme des rendements des extraits poly phénoliques de *Sanguisorba minor*.

III. 2. Révélation Phytochimique (Screening)

L'étude phytochimique du *Sanguisorba minor* a été réalisée par des tests effectués en laboratoire, ce qui nous a permis d'identifier les différents constituants chimiques présents dans cette plante. Les résultats des essais réalisés sur les différentes parties de la plante sont regroupés dans le (Tableau 5).

Tableau 5 : Résultats des tests phytochimique effectués sur les extraits de la plante.

Composé	**Résultats**
Amidons	---
Saponine	+++
Tannins galliques	+++
Anthocyanes	+++
Flavonoïdes	+++
Tannins catéchiques	+++
Composés réducteurs	++
Coumarines	+
Stérols et stéroïdes	++
Alcaloïdes	++
Hétérosides	+
Quinones libres	+
Terpénoïdes	++

III. 3. Teneur totale en polyphénols, flavonoïdes, tanins et anthocyanes

Les teneurs en polyphénols totaux (TPT), en flavonoïdes totaux (TFT), en tannins condensés (TTC) ainsi que les teneurs en anthocyanes (TA) des différents extraits de *S. minor* sont présentées dans (Tableau 6). La TPT est exprimée en milligrammes d'équivalents d'acide gallique par gramme d'extrait sec (mg EAG/g ES), et la TFT est présentée en milligrammes d'équivalents de quercétine par gramme d'extrait sec (mg EQ/g ES), la TTC est exprimé en milligrammes d'équivalents de catéchine par gramme d'extrait sec (mg EC/g ES), tandis que la TA est exprimée en milligrammes d'équivalents en cyanidine-3-galactoside par gramme d'extrait sec (mg ECG/g ES). Les résultats obtenus ont révélé une distribution différente de ces classes de composés dans les extraits, attribuée à la polarité variable des solvants utilisés. L'EAE (254.9 ± 3.5 mg EQ/g ES) contenait les quantités les plus élevées, tandis que l'EDCM (155.7 ± 1.1 mg EQ/g ES) et l'EB (101.6

± 2.0 mg EQ/g ES) présentaient des quantités moyennes et une plus faible quantité a été trouvée dans l'EAQ (78.4 ± 2.2 mg EQ/g ES). En ce qui concerne les teneurs en tanins condensés (TTC), les différents extraits ont révélé des quantités décroissantes, avec l'EAE (129.7 ± 21 mg EC/g ES) présentant la plus haute concentration, suivi de l'EDCM (113.5 ± 3.0 mg EC/g ES), de l'EB (102.2 ± 4.3 mg EC/g ES), et enfin de l'EAQ (58.6 ± 1.6 mg EC/g ES). À propos de la teneur en anthocyanes, elle indique une présence minimale de cette classe de métabolites, avec des valeurs variant de 8.6 à 0.2 mg ECG/g ES dans l'EB et de 1.5 ± 0 mg ECG/g ES dans l'EAQ.

Tableau 6 : TPT, TFT, TTC et TA contenues dans les fractions de *S. minor*.

Extrait	TPT mg EAG/g ES[(a)]	TFT mg EQ/g ES[(b)]	TTC mg EC/g ES [(c)]	TA mg ECG/g ES[(d)]
EDCM	240.0 ± 4.9	155.7 ± 1.1	113.5 ± 3.0	06.5 ± 0.7
EAE	811.0 ± 4.7	254.9 ± 3.5	129.7 ± 2.1	02.7 ± 0.1
EB	461.0 ± 4.8	101.6 ± 2.0	102.2 ± 4.3	08.6 ± 0.2
EAQ	232.0 ± 4.4	78.4 ± 2.2	58.6 ± 1.6	01.5 ± 0.0

([a])Exprimé en équivalent d'acide gallique (EAG) ; ([b]) exprimé en équivalent de quercétine (EQ) ; ([c]) exprimé en équivalent de catéchine (EC) ; ([d]) exprimé en équivalent de cyanidine-3-galactoside (ECG).

III. 4. Identification et quantification des composés phénoliques par HPLC-DAD

Treize composés phénoliques ont été identifiés et évalués dans différentes fractions de *S. minor*, confirmant que la migration de chaque composé entre les solvants est affectée par la différence de polarité entre ces derniers lors du processus d'extraction. Les chromatogrammes sont présentés dans (Figure 42). Les vingt-six composés phénoliques standards utilisés pour la comparaison avec ceux de chaque extrait et ceux identifiés sont présentés dans (Tableau 7). En conclusion, les composés phénoliques identifiés et quantifiés dans chaque fraction étaient de treize dans l'EAE, de neuf dans l'EDCM, six dans l'EAQ et de quatre dans la fraction EB. La rutine était le composé le plus riche dans l'EAQ (32.87 ± 0.23 µg/g) et EB (278.4 ± 1.20 µg/g), tandis que l'apigénine était le composé le plus abondant dans l'EAE (156.8 ± 0.95 µg/g) et l'EDCM (84.75 ± 0.60 µg/g).

Il est approprié de noter que tous les composés identifiés étaient présents dans l'EAE, mais dans des proportions différentes. De plus, les quantités spécifiques des composés détectés dans l'EAE étaient les suivantes : la lutéoline était présente à une concentration de 133,6 ±0,70 µg/g, l'acide rosmarinique à une concentration de 124.5 ± 0.80 µg/g, l'acide p-coumarique (120.1 ± 0.75µg/g), acide caféique (70.49 ± 0.35 µg/g) et l'acide syringique (75.82 ± 0.48 µg/g).

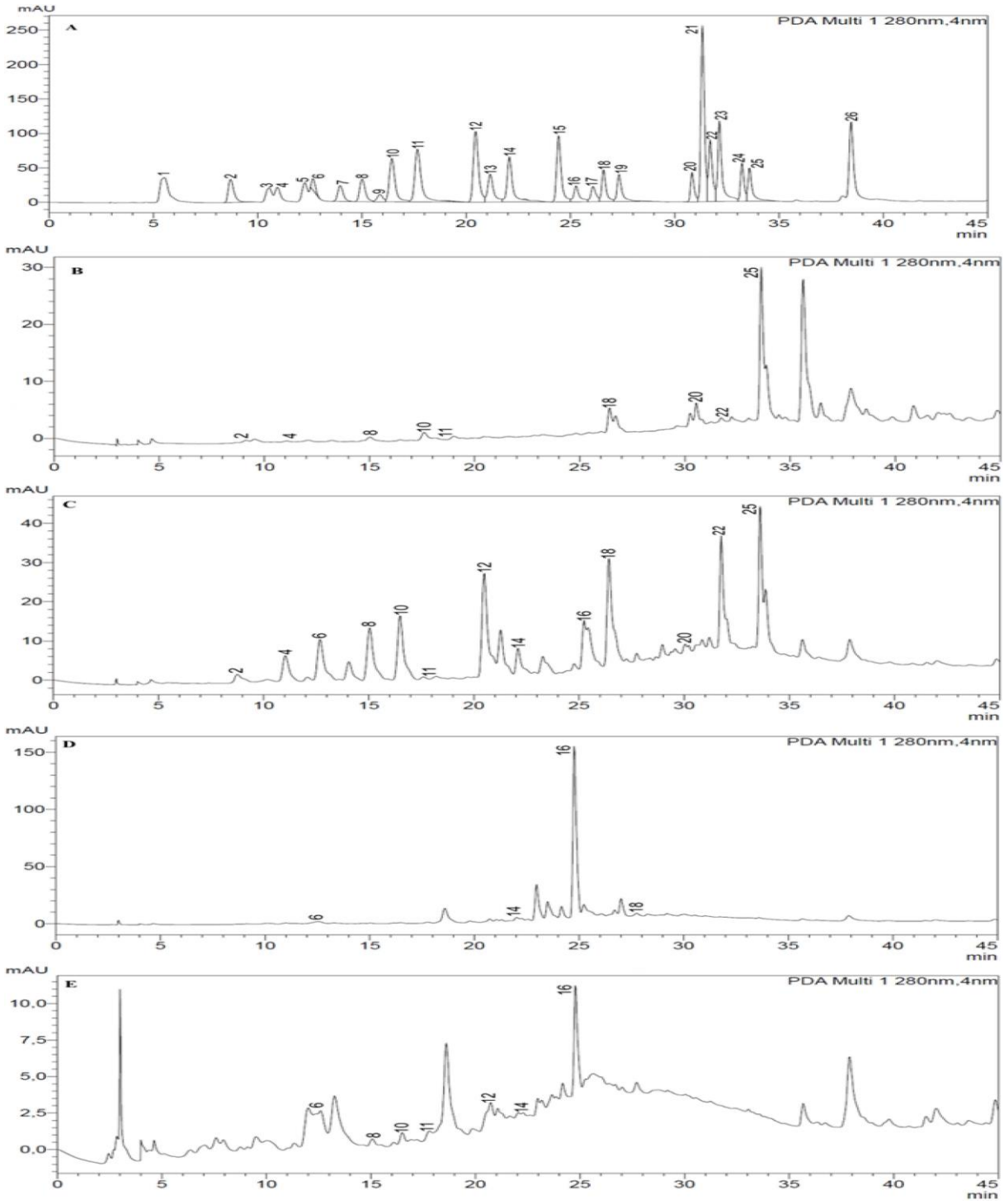


Figure 42 : Chromatogrammes HPLC des composés phénoliques : (A) standards, (B) EDCM, (C) EAE, (D) EB et (E) EAQ de *Sanguisorba minor* L.

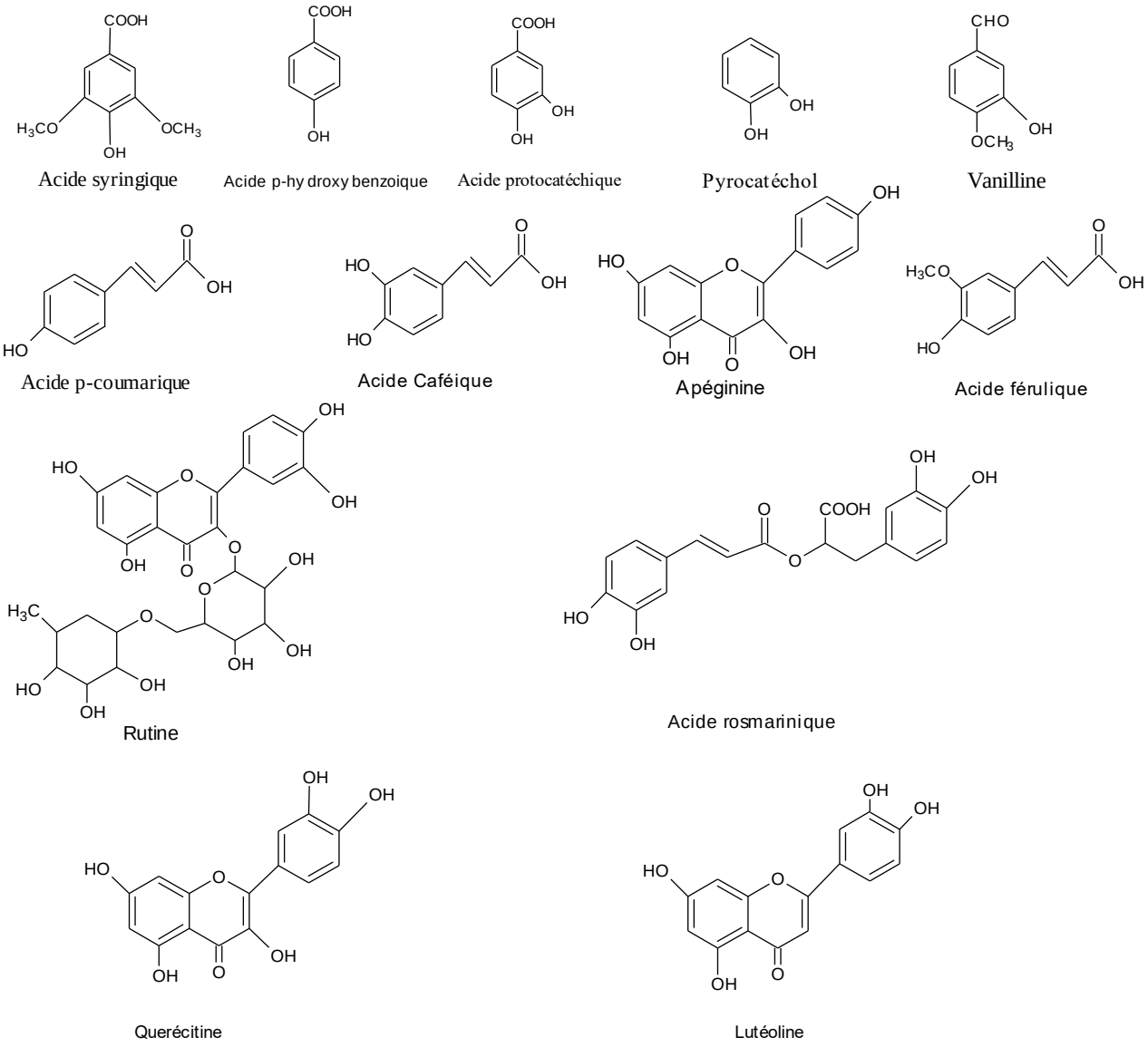


Figure 43 : Structures des composés phénoliques extraits de différentes fractions de *Sanguisorba minor*.

Tableau 7 : Composition phénolique des extraits de *S. minor* par HPLC-DAD.

N°	Composés phénoliques	TR min	EDCM	EAE	EB	EAQ	Références
1	Acide gallique	5.70	-	-	-	-	
2	Acide protocatéchique	8.85	0.85 ± 0.06	10.20 ±0.17	-	-	[1,2, 3, 5]
3	Catéchine	10.68	-	-	-	-	
4	Pyrocatéchol	11.04	0.52 ± 0.04	13.44 ± 0.2	-	-	[1, 3]
5	L'acide chlorogénique	12.35	-	-	-	-	
6	Acide p-hydroxy benzoïque	12.77	-	22.63 ± 0.28	2.52 ± 0.15	8.15 ± 0.08	[1, 2]
7	6,7-dihydroxy coumarine	14.10	-	-	-	-	
8	Acide caféique	15.09	5.05 ± 0.12	70.49 ± 0.35	1.86 ± 0.05	-	[3, 5]
9	Acide 3-Hydroxy benzoïque	15.98	-	-	-	-	
10	Acide syringique	16.56	0.41 ± 0.02	75.82 ± 0.48	-	2.97 ±0.10	[1, 2, 5]
11	Vanilline	17.78	5.68 ±0.10	2.85±0.08	-	2.70 ±0.08	[1, 5]
12	Acide p- coumarique	20.56	-	120.1 ± 0.75	-	10.44±0.12	[1,3]
13	Taxifoline	21.26	-	-	-	-	
14	Acide férulique	22.14		25.34±0.25	0.85±0.04	0.57±0.05	[1,2. 3]
15	Coumarine	24.49	-	-	-	-	
16	Rutine	25.30	-	85.47± 0.44	278.4 ±1.20	32.87±0.23	[1,2. 3]
17	Acide ellagique	26.11	-	-	-	-	
18	Acide rosmarinique	26.57	10.22 ± 0.17	124.5 ± 0.80	0.98 ± 0.06	-	[1, 3, 4]
19	Myricetine	27.35	-	-	-	-	
20	Quercétine	30.83	7.19 ± 0.21	9.73 ± 0.35	-	-	[1, 5]
21	Acide trans-cénamique	31.33	-	-	-	-	
22	Lutéoline	31.70	3.42 ± 0.25	133.6 ± 0.70	-	-	[1, 2, 4]
23	Hespéritine	32.14	-	-	-	-	
24	Kaempférol	33.21	-	-	-	-	
25	Apigénine	33.77	84.75 ± 0.60	156.8 ± 0.95	-	-	[1, 3, 5]
26	chrysine	38.40	-	-	-	-	

[a] Les valeurs exprimées sont des moyennes ± S.E.M. de trois mesures parallèles ($p < 0,05$). - : non-détecté

III. 5. Activité biologique

III. 5. 1. Activité antioxydante

L'activité antioxydante évaluée à l'aide de sept tests différents est résumée dans le Tableau 5. L'extrait d'AE s'est avéré être le plus actif dans les tests suivants : acide β-carotène-linoléique (IC_{50} = 7.44 ± 0.28 µg/mL), $ABTS^{\bullet+}$ (IC_{50}= 9.27 ± 0.33 µg/mL), H_2O_2 (IC_{50} = 49.2 ± 0.21 µg/mL), et FRAP (IC_{50} = 40.02 ± 0.69 µg/mL). En revanche, l'extrait DCM a montré la meilleure activité dans les tests DPPH (IC_{50} = 7.16 ± 0.80 µg/mL), CUPRAC (IC_{50} = 8.36 ± 0.25 µg/ml), et tests de chélation du métal (IC_{50} = 5.83±1.20 µg/mL) par rapport aux autres extraits de *S. minor*. Il est intéressant de noter que ces résultats ont confirmé que l'EAE et l'EDCM étaient des antioxydants plus puissants que les standards BHA et α-tocophérol dans les tests $DPPH^{\bullet}$ et CUPRAC. De plus,

dans le test $ABTS^{\bullet+}$, l'EAE (IC_{50} = 9.27 ± 0.33 µg/mL) était plus actif que l'α-tocophérol (IC_{50} = 35.50 ± 0.55 µg/mL) et le BHA (IC_{50} = 12.70 ± 0.10 µg/mL). Cependant les autres extraits ont présenté des activités antioxydantes modérées.

Tableau 8 : Activités antioxydants des extraits de *S. minor* par différentes méthodes.

Extraits	β-Carotene	$DPPH^{\bullet}$	$ABTS^{\bullet+}$	CUPRAC	Chélation du métal	FRAP	H_2O_2
	IC_{50} (µg/mL)	IC_{50} (µg/mL)	IC_{50} (µg/mL)	IC_{50} (µg/mL)	IC_{50} (µg/mL)	IC_{50} (µg/mL)	IC_{50} (µg/mL)
EDCM	51.30 ±0.98	07.16 ± 0.80	62.50 ±0.94	08.36 ±0.25	05.83 ±1.20	108± 0.44	53.6±0.36
EAE	07.44 ±0.28	17.37 ±0.45	09.27 ±0.33	21.70± 0.51	19.48± 0.88	40.02± 0.69	49.2 ± 0.21
EB	20.86 ±0.84	39.51 ± 0.96	28.19 ±0.57	34.81± 0.65	51.65± 1.14	45.88±0.72	66.6 ±0.39
EAQ	92.48 ±0.76	128.3 ± 1.30	87.40± 1.12	83.53±0.55	102.9± 0.98	62.33±0.39	71 ± 0.82
α-Tocopherol	02.10 ±0.05	38.20 ± 0.50	35.50± 0.55	60.20±0.45	NT	NT	NT
BHA	01.50 ±0.03	19.50 ± 0.30	12.70± 0.10	25.40±0.38	NT	NT	NT
EDTA	NT	NT	NT	NT	5.50 ±0.35	NT	NT
Acide ascorbique	NT	NT	NT	NT	NT	38±0.2	28.7 ± 0.36

[a] Les valeurs représentent les moyennes ± SEM de trois mesures d'échantillons parallèles ($p < 0,05$). NT : Non testé

III. 5. 2. Activités anti cholinestérase et antidiabétiques du *S. minor*

L'inhibition des enzymes cholinergiques EACh et EBCh est une solution bénéfique pour la santé contre la MA, c'est pourquoi les activités inhibitrices des extraits de *Sanguisorba minor* sur ces deux enzymes ont été évaluées et sont présentées dans (Tableau 9). Les pourcentages d'inhibition à la concentration d'essai la plus élevée de 200 µg/mL dans le test inhibiteur de l'EACh ont indiqué que l'EAE (36.11 ± 0.51 %) et l'EDCM (32.75 ± 0.48 %) étaient les extraits les plus actifs par rapport à la galanthamine (standard, 88.70 ± 0.50 %). Tous les extraits investigués ont montré une excellente inhibition contre le BChE, les plus actifs était l'EAE (54.50 ± 0.74 %) et l'EDCM (41.25 ± 0.69 %), pour ce qui est de la galanthamine (80.20 ± 0.30 %). Il est important de souligner que l'EAQ a montré une faible efficacité contre les deux cholinestérases. Les résultats concernant l'effet des extraits de *S. minor* sur la réduction et la décomposition des glucides par inhibition de l'α-amylase et de l'α-glucosidase sont présentés dans (Tableau 6). Ces résultats montrent que les extraits sont efficaces pour réduire la glycémie en bloquant l'activité de ces enzymes, ce qui constitue une preuve de leur potentiel antidiabétique. L'extrait le plus actif était l'EDCM, avec des pourcentages d'inhibition de 55.18 ± 0.26 % et 32.45 ± 0.43 % à 200 µg/mL contre l'α-glucosidase et l'α-amylase, respectivement. Les pourcentages d'inhibition de l'EAE et de l'EB étaient modérés, tandis que ceux de l'EAQ étaient faibles. Il convient de rappeler que l'acétylcholine est un neurotransmetteur

essentiel, dont l'activité est principalement régulée par deux enzymes cholinestérases : l'EACh et l'EBCh.

Tableau 9 : Activités anti cholinestérase et antidiabétiques des extraits de *S. minor*.

	Activité inhibitrice du cholinestérase		**Activité antidiabétique**	
	EACh	**EBCh**	**α-glucosidase**	**α-amylase**
Extraits/Standards	**Inhibition (%) (dans 200µg/mL)**		**Inhibition (%) (dans 200 µg/mL)**	
EDCM	32.75±0.48	41.25±0.69	55.18±0.26	32.45±0.43
EAE	36.11±0.51	54.50±0.74	41.09±0.85	29.87±0.67
EB	18.71±0.45	24.80±0.61	32.73±0.90	25.51±0.82
EAQ	10.42 ±0.33	21.60 ±0.78	21.44 ± 0.72	14.08 ± 0.26
Galantamine	88.70±0.50	80.20±0.30	NT	NT
Acarbose	NT	NT	86.51±0.45	81.33±0.90

Les valeurs représentent les moyennes ± SEM de trois mesures d'échantillons parallèles ($p < 0,05$).

NT : non testé

III. 5. 3. Inhibitions de la violacéine et du quorum-sensing (QS)

Les espèces de *Chromobacterium* produisent un pigment violet appelé la violacéine pour protéger leurs membranes contre l'oxydation externe. *C. violaceum* CV12472 produit ce pigment violet lors de sa croissance, tandis que *C. violaceum* ne produit de la violacéine que lorsqu'une source externe d'acyle-homosérine lactone (AHL) est fournie. Les deux cas se produisent via un processus de détection de quorum médié. La souche bactérienne *C. violaceum* CV12472 est généralement utilisée dans le dépistage qualitatif d'inhibition de la production de La violacéine, révélée par l'absence ou l'abaissement mesurable de la couleur violette, est couramment mesurée aux concentrations CMI et sous-CMI. Les valeurs de CMI contre *C. violaceum* CV12472 étaient de 0.652 mg/mL pour l'EDCM et l'EAE, de 2.5 mg/mL pour l'EB et de 1.25 mg/mL pour l'EAQ. Tous les échantillons testés présentaient une excellente inhibition de la violacéine avec des pourcentages d'inhibition de 100 % à la CMI, et tous inhibaient la violacéine même à la CMI/4. Seuls les extraits EDCM (31.0 à 0.7 %), EAE (13.0 à 0.5 %) et EAQ (24.9 à 0.5 %) ont montré une inhibition à la CMI/8. À la CMI/16, seuls l'EDCM et l'EAQ ont montré une inhibition de la violacéine et aucun échantillon ne peut inhiber la violacéine au-delà de cette concentration. Les diamètres des zones d'inhibition de la communication intercellulaire (IQS) des extraits de *S. minor* contre *C. violaceum* CV026, en présence d'AHL, ont été mesurés à des concentrations égales ou inférieures à la CMI et sont présentés dans (Tableau 10). Les valeurs de CMI contre *C. violaceum* CV026 étaient de 1.25

mg/mL pour l'EDCM et l'EAE, et de 0.625 mg/mL pour l'EB et l'EAQ. À la CMI, l'EDCM (14.0 ± 1.5 mm), l'EAE (13.0 ± 0.8 mm), l'EB (14.5 ± 0.6 mm) et l'EAQ (17.0 ± 1.2 mm) ont tous montré une très bonne inhibition de la communication intercellulaire (IQS). Tous les extraits ont également montré une très bonne IQS à la CMI et à la moitié de la CMI. Seul l'extrait le plus actif est l'EAQ, qui a montré un IQS de 11.5 ± 0.4 mm et de 09.0 ± 0.5 mm à CMI/4 et CMI/8.

Tableau 10 : Inhibition de la production de violacéine chez *C. Violaeum* CV12472 par les extraits de *S.mior*.

	Inhibition de Violacéine (%)						
Extraits	**CMI (mg/mL)**	**CMI**	**CMI/2**	**CMI/4**	**CMI/8**	**CMI/16**	**CM/32**
EDME	0.625	100 ± 0.0	78.5 ± 1.9	49.4 ± 1.5	31.0 ± 0.7	16.1 ± 0.2	-
EAE	0.625	100 ± 0.0	61.9 ± 0.6	29.9 ± 1.0	13.0 ± 0.5	-	-
EB	2.5	100 ± 0.0	40.7 ± 0.8	19.8 ± 0.4	-	-	-
EAQ	1.25	100 ± 0.0	61.9 ± 1.3	61.9 ± 1.1	24.9 ± 0.5	11.7 ± 0.3	-

Tableau 11 : Zones d'inhibition du quorum sensing chez *C. violaceum* CV12472 par les extraits de *S. minor*.

Zones d'inhibition (Anti-quorum Sensing) (mm)					
Extraits	**CMI (mg/mL)**	**CMI**	**CMI/2**	**CMI/4**	**CMI/8**
EDCM	1.25	14.0 ± 1.5	10.0 ± 1.0	-	-
EAE	1.25	13.0 ± 0.8	09.5 ± 0.2	-	-
EB	0.625	14.5 ± 0.6	10.0 ± 0.1	-	-
EAQ	0.625	17.0 ± 1.2	15.0 ± 0.9	11.5 ± 0.4	09.0 ± 0.5

- : pas d' inhibition

III. 5. 4. Inhibition de la motilité par essaimage sur *P. aeruginosa* PA01

Pseudomonas aeruginosa PA0 est une bactérie flagellée opportuniste couramment utilisée comme organisme modèle pour évaluer l'inhibition de la motilité par essaimage chez les micro-organismes. L'inhibition du mouvement d'essaimage des fractions de *S. minor* (Figure 44) a été déterminée à trois concentrations de 50 µg/mL, 75 µg/mL et 100 µg/mL, et les résultats sont présentés dans (Tableau 12). Les extraits les plus actifs étaient EB et EAE avec un pourcentage d'inhibitions respectivement, de 39.5 ± 0.3 % et 34.9 ± 1.5 % à 100 µg/mL et 10.5 ± 0.3 % et 06.2 ± 0.1 % à 50 µg/mL. L'inhibition de la motilité par essaimage variait de 18.4 ± 0.6 % à 100 µg/mL à 05.5 ± 0.2 % à 75 µg/mL pour l'EDCM et de 20.1 ± 0.5 % à 100 µg/mL à 03.8 ± 0.1 % à 75 µg/mL pour l'EAQ.

Tableau 12 : Inhibition de la motilité en essaimage sur *P. aeruginosa* PA01 par les extraits de *S. minor*.

Extraits	100 µg/mL	75 µg/mL	50 µg/mL
EDCM	18.4 ± 0.6	05.5 ± 0.2	-
EAE	34.9 ± 1.5	16.3 ± 0.7	06.2 ± 0.1
EB	39.5 ± 0.3	23.0 ± 0.6	10.5 ± 0.3
EAQ	20.1 ± 0.5	03.8 ± 0.1	-

- : Pas d'inhibition

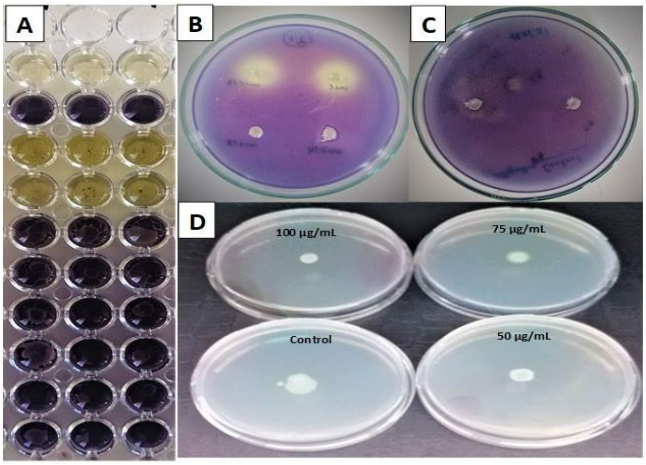


Figure 44 : (A) Inhibition de la violacéine contre *C. violaceum* CV12472 ; (B) inhibition de la détection du quorum contre *C. violaceum* CV026 ; (C) contrôle d'inhibition de la détection du quorum ; (D) inhibition de la motilité contre *P. aeruginosa* PA01.

III. 5. 5. Propriétés antimicrobiennes et antibiofilm

La méthode de micro-dilution en bouillon a été utilisée pour déterminer les activités antimicrobiennes des extraits investigues dans cette étude. Les résultats obtenus ont été enregistrés dans (Tableau 10), sous forme de concentration minimale inhibitrice (CMI) des différents extraits de *S. minor* contre les bactéries gram-positive (*Staphylococcus aureus*), Gram-négative (*Escherichia coli*) et un champignon (*Candida albicans).*

L'EDCM avait des valeurs de CMI de 1.25 mg/mL contre les *S. aureus* et *E. coli*, et de 0.625 mg/mL contre *C. albicans*. L'EAE a présenté une CMI de 1.25 mg/mL contre les *S. aureus* et *C. albicans* et de 2.5 mg/mL contre *E. coli*. L'EB avait une CMI de 0.625 mg/mL contre *S. aureus* et *C. albicans* et une CMI de 2.5 mg/mL contre *E. coli*. L'extrait le plus actif était l'EAQ avec une CMI de 0.312 contre *S. aureus*, de 1.25 mg/mL contre *E. coli* et de 0.625 mg/mL contre *C. albicans*. Les pourcentages d'inhibition des extraits ont été déterminés aux concentrations CMI et sous-CMI en utilisant la méthode de coloration des cristaux, et les résultats sont présentés dans le Tableau 13. Le

pourcentage d'inhibition des biofilms variait de 71.25 ± 1.78 % (CMI) à 16.92 ± 0.56 % (CMI/4) pour l'EDCM contre *S. aureus*. Pour un même *S. aureus*, l'antibiofilm variait de 55.65 ± 0.59 % (CMI) à 5.87 ± 0.18 % (CMI/4) pour l'EAE et de 76.14 ± 1.95 % (CMI) à 10.22 ± 0.15 % (CMI/8) pour l'EB qui était le plus actif. L'EAQ avait la plus faible activité antibiofilm contre *S. aureus* et n'inhibait le biofilm qu'à une CMI de 26.36 ± 0.27 %, et une CMI/2 de 8.29 ± 0.06 %. Contre la bactérie gram négatif *E. coli*, l'activité antibiofilm variait de 60.16 ± 1.24 % (CMI) à 13.15 ± 0.28 % (CMI/4) pour l'EDCM et de 46.13 ± 0.78 % (CMI) à 6.18 0.10 % (CMI/4) pour l'EB. Les inhibitions en pourcentage du biofilm variaient de 56.65 ± 1.05 % (CMI) à 06.21 ± 0.32 % (CMI/8) pour l'extrait le plus actif (EAE), et de 51.11 ± 0.64 % (CMI) à 02,44 ± 0.05 % (CMI/8) pour l'EAQ. Seule l'EAQ a inhibé la formation de biofilm chez le champignon *C. albicans* avec une activité antibiofilm de 11.26 ± 0.13 % (CMI) et de 02.44 ± 0.05 % (CMI/2). Les biofilms de *S. aureus* et de *E. coli* étaient plus sensibles aux fractions de *S. minor* que le biofilm de *C. albicans*.

Tableau 13 : Activités antimicrobiennes (CMI) et antibiofilm des fractions de *S. minor*.

Microorganismes		**Extraits**			
		EDCM	**EAQ**	**EB**	**EAQ**
		CMI (mg/mL)			
S.aureus		1.25	1.25	0.625	0.312
E.coli		1.25	2.5	2.5	1.25
C.albicas		0.625	1.25	0.625	0.625
Inhibition du biofilm (%)					
S.aureus	CMI	71.25±1.78	55.65±0.59	76.14±1.95	26.36±0.27
	CMI/2	42.38±0.96	23.82±0.35	45.24±0.85	8.29±0.06
	CMI/4	16.92±0.56	5.87±0.18	27.32±0.66	-
	CMI/8	-	-	10.22±0.15	-
E.coli	CMI	60.16±1.24	56.65±1.05	46.13±0.78	51.11±0.64
	CMI/2	26.63±0.76	30.14±0.65	21.34±0.25	29.21±0.44
	CMI/4	13.15±0.28	18.62±0.44	6.18±0.1	17.33±0.15
	CMI/8	-	6.21±0.32	-	5.27±0. 1
C.albicans	CMI	-	-	-	11.26±0.13
	CMI/2	-	-	-	2.44±0.05
	CMI/4	-	-	-	-
	CMI/8	-	-	-	-

- : pas d'inhibition

III. 6. Résultats d'HPLC-DAD, et des activités biologiques

La composition phénolique de *Sanguisorba minor* est abondante en composés phénoliques bioactifs, notamment la rutine, l'acide p-coumarique, l'acide caféique, l'apigénine, l'acide rosmarinique, la lutéoline et l'acide syringique, qui ont été identifiés et quantifiés en quantités considérables dans les extraits. Dans une étude antérieure, il a été démontré que *S. minor* contenait

vingt-trois composés comprenant des flavonoïdes, des tanins et des acides phénoliques identifiés par HPLC-DAD-MS [9].

A l'aide de la méthode HPLC, plusieurs composés phénoliques ont été identifiés chez *S. minor*, particulièrement les glycosides de quercétine, le kaempférol, l'acide caféique, l'apigénine, l'acide chlorogénique et l'acide chicorique [11]. Dans cette étude, des composés identiques ont été déterminés mais les glycosides n'ont pas été décelés. Les variations dans les composés chimiques peuvent s'expliquer par les différences dans les conditions climatiques et géographiques des régions de récolte ainsi que par les conditions expérimentales. Les résultats montrent que la méthode utilisée a permis une extraction notable de polyphénols, qui ont été séparés dans les divers extraits en fonction des polarités des solvants. Ces résultats sont cohérents puisque les espèces de Sanguisorba renferment plus de 270 composés, parmi lesquels des polyphénols, des flavonoïdes, des néolignanes, ainsi que des triterpénoïdes, des stérols et des acides gras. Ces composés se caractérisent par de nombreux bénéfices biologiques importants [6]. Il est à souligner que les extraits de *S. minor* présentant de fortes activités antioxydantes. L'extrait d'acétate d'éthyle (EAE) s'est avéré particulièrement efficace dans les tests de β-carotène, $ABTS^{\bullet+}$, FRAP et H_2O_2. En raison de sa concentration élevée en composés phénoliques, notamment l'acide p-coumarique, l'acide rosmarinique, la lutéoline et l'apigénine. Ces composés sont reconnus pour leur capacité à inhiber les radicaux libres, ce qui pourrait contribuer à leurs propriétés antioxydantes. Dans les tests $DPPH^{\bullet}$, CUPRAC et de chélation des métaux, l'EDCM était l'extrait le plus potentiel, ce qui pourrait être confirmé par sa concentration plus élevée en vanilline. Dans certaines autres études, les extraits au méthanol étaient plus actifs que les extraits DCM dans cinq tests différents, déterminant une capacité antioxydante plus élevée pour les extraits polaires que pour les extraits apolaires [14]. Il a été démontré que *S. minor* se caractérise par une excellente activité antioxydante et pourrait protéger contre les maladies liées au stress oxydatif en raison de sa richesse en polyphénols [15]. Dans une autre étude, *S. minor* a été utilisé pour améliorer la stabilité oxydative des huiles comestibles [7]. Les composés phénoliques de *S. minor* et leurs excellentes activités antioxydantes indiquent leur importance dans l'utilisation alimentaire en tant qu'additifs naturels pouvant remplacer les additifs synthétisés [6].

En plus des pouvoirs d'inhibition des radicaux libres, il a été prouvé que *S. minor* se caractérise par une propriété anti-cholinestérase dans l'essai d'inhibition de l'EACh [7]. L'inhibition des cholinestérases est un traitement approprié pour améliorer l'état de santé des patients atteints de la maladie d'Alzheimer, suscitant un intérêt croissant pour les traitements anti-cholinestérases naturels en raison du coût élevé et des possibles effets secondaires des composés synthétiques [10]. Les extraits de *S. minor* ont prouvé leur capacité à inhiber à la fois l'EACh et l'EBCh et l'extrait d'EA se

révélant le plus actif. Cet extrait riche en composés phénoliques a montré une activité anti-cholinestérases potentielle. Parmi ceux-ci, l'acide ellagique, l'acide rosmarinique et l'aldéhyde cinnamique se distinguent, présentant des potentiels procognitifs et neuroprotecteurs. Ces effets sont observés à travers différentes modulations des pro-oxydants et d'autres mécanismes, tels que l'inhibition de l'agrégation bêta-amyloïde [16, 17]. Ainsi, en plus de cette propriété puissante et bénéfique des polyphénols naturels, ils sont également efficaces pour réduire la glycémie dans le sang grâce à leur capacité à inhiber l'enzyme hydrolysant les glucides, ce qui constitue un mécanisme approprié pour le traitement des cas de diabète sucré de type 2 [18]. Les extraits de *S. minor* désactivent à la fois l'α-glucosidase et l'α-amylase ; ces enzymes hydrolysent l'amidon en unités simples (glucoses), qui sont absorbées dans le sang, provoquant une hyperglycémie (diabète). L'EDCM était l'extrait le plus actif. L'éventuelle action antidiabétique des extraits de *S. minor* pourrait être justifiée par les composés phénoliques et autres composés qu'ils contiennent. Certains médicaments synthétiques, tels que l'acarbose, sont de puissants inhibiteurs de l'α-glucosidase et de l'α-amylase, mais les inhibiteurs naturels, comme les composés phénoliques végétaux, sont potentiellement plus efficaces pour réduire la glycémie sanguine avec moins d'effets secondaires [19].

En outre, les extraits contenant les quantités de composés phénoliques les plus élevés ont présenté de puissantes inhibitions bactériennes [8]. Cependant, les effets de *S. minor* sur les facteurs nuisibles des bactéries tels que le quorum-sensing (QS), la formation de biofilm et la motilité par essaimage n'ont pas été rapportés auparavant ce qui accentue l'originalité des travaux de cette thèse. Divers mécanismes tels que l'évolution de biofilms, la synthèse de toxines, la formation de pigments, la motilité par essaimage et la sécrétion d'enzymes sont suivis et contrôlés par le QS. L'inhibition de ce dernier est une solution pour se protéger contre les agents pathogènes, car le QS facilite les contacts entre les bactéries pour développer une résistance et des processus contre les antibiotiques [20–23]. La formation de violacéine par la chromobactérie représente un processus QS, facilement quantifiable, et peut transformer et produire les signaux [24]. Ceci est démontré par une réduction de pigment de violacéine qui change en fonction de la concentration, comme le montre (Figure 44). Étant donné que la *C. violaceum* CV12472 produit de la violacéine lors de sa croissance normale, la capacité des extraits à réduire la violacéine dans *C. violaceum* CV12472 indique l'inhibition de la synthèse des molécules de signal. Les extraits ont inhibé la production de violacéine dans *C. violaceum* CV026 lorsque les AHL ou les autoinducteurs (Les acyl homosérines lactones) ont été produit, ce qui indique que les polyphénols ont également inhibé la réception du signal. Les zones d'inhibition du QS sont indiquées par les cercles de couleur crème sur la pelouse violette, comme le montre (Figure 44). Les fronts d'essaims se placent à différentes concentrations des extraits de *S.*

minor. Par conséquent, il est important de noter que les ces extraits inhibent les mouvements d'essaimage des bactéries pathogènes. Dans notre étude, les valeurs de CMI variaient de 0.3125 à 2.5 mg/mL pour l'extrait polaire le plus efficace (EAQ). Cela indique que les extraits de *S. minor* peuvent être utilisés pour développer des antimicrobiens naturels. Les substances qui inhibent la croissance des cellules microbiennes ou les tuent sont appelées antimicrobiens et sont utilisées en médecine pour combattre les infections [25].

Toutes les fractions ont réduit la formation de biofilms de manière dépendante de la concentration contre *S. aureus* et *E. coli*. Toutefois, l'inhibition de la formation de biofilms chez *C. albicans* n'a été observée qu'avec l'AQE. Le biofilm favorise la résistance aux antimicrobiens en créant une barrière protectrice autour des cellules bactériennes, ce qui limite la pénétration des agents antimicrobiens et réduit leur efficacité. De plus, les bactéries présentes dans le biofilm peuvent échanger des gènes de résistance, ce qui contribue à l'émergence de souches résistantes.

Les biofilms microbiens sont des colonies fixées à une surface et encapsulées dans une matrice extracellulaire protectrice, ce qui rend les cellules bactériennes moins sensibles aux effets des antibiotiques par rapport aux cellules planctoniques non adhérentes [26]. Les infections associées aux biofilms sont bien plus difficiles à traiter que celles non liées aux biofilms, ce qui les rend particulièrement complexes à guérir. La capacité des fractions de *S. minor* à réduire la formation de biofilms microbiens à des concentrations égales ou inférieures à la CMI suggère le potentiel de cette plante alimentaire à prévenir la contamination des aliments et l'émergence de pathogènes résistants aux biofilms. Ces fractions ont également inhibé le mouvement d'essaimage, une étape clé avant la formation de biofilms chez les bactéries.

III. 7. Résultats et discussions des études d'électrodéposition

III. 7. 1. Affinement des paramètres de revêtement

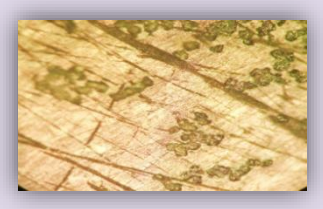
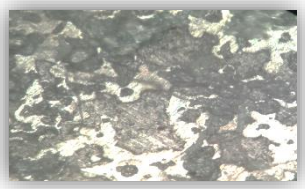
De nombreux paramètres influencent les caractéristiques du revêtement, tels que la résistance à la corrosion, la porosité et l'adhérence de la couche appliquée. Parmi ces facteurs, on compte le pH de la solution électrolytique, l'intensité du courant, la durée du processus de revêtement et la concentration des additifs. À cet égard, divers facteurs ont été étudiés. L'analyse de l'effet de l'agitation sur la qualité du revêtement est essentielle, car elle a un impact direct sur la surface des substrats.

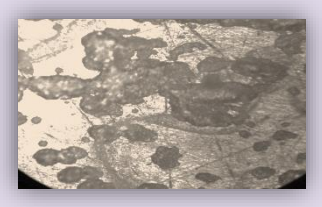
III. 7. 1. 1. Influence de la durée de revêtement

L'évaluation du type de dépôt en fonction de la durée du processus d’électrodéposition du zinc sur les échantillons d’acier a inclus, en plus de l'aspect extérieur, l'épaisseur de la couche déposée.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 14. Cette section analyse l'impact de ce paramètre pour des durées allant de 15 à 60 minutes, avec un intervalle de 5 minutes.

Tableau 14 : Effet du temps de l'étape d'électrodéposition sur la qualité des revêtements des substrats en acier.

Durée (min)	**pH**	**I(A)**	**Agitation (tour/s)**	**Épaisseur de la couche d dépôt (µm)**	**Photo**
15	4	0.04	1	22.6979	
20	4	0.04	1	10.7481	
25	4	0.04	1	11.1264	
30	4	0.04	1	24.9222	
35	4	0.04	1	16.1434	
40	4	0.04	1	17.8023	

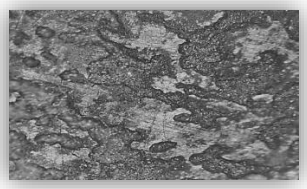
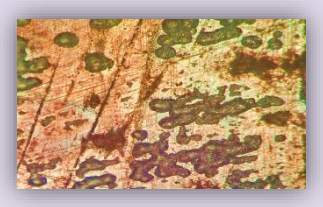
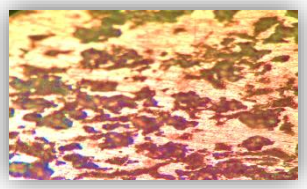
45	4	0.04	1	20.0276	
50	4	0.04	1	20.3917	
55	4	0.04	1	20.9177	
60	4	0.04	1	18.4965	

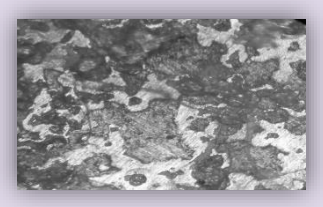
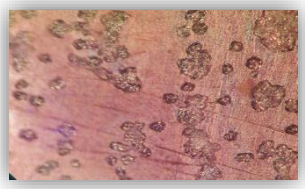
Les résultats du tableau indiquent que, lors des expériences, les substrats n'étaient pas complètement recouverts lorsque la durée de revêtement était d'environ 25 minutes. Toutefois, pour des durées comprises entre 35 et 60 minutes, le revêtement était plus important. L'épaisseur de la couche de revêtement atteignait une valeur notable d'environ 24.92 µm. Cette épaisseur présente une surface plus compacte après un temps de traitement de 30 minutes. Ces observations constitueront un point de départ pour orienter nos recherches à l'avenir.

III. 7. 1. 2. Impact du pH de la solution

Le pH joue un rôle déterminant dans le bain électrolytique, car il affecte directement le processus de dépôt du revêtement. Les données relatives à l'optimisation de ce paramètre sont présentées dans (Tableau 15).

Tableau 15 : Effet de la fluctuation du pH sur le dépôt électrolytique de zinc.

pH	Temps (min)	I(A)	Agitation (tours/s)	épaisseur du revêtement déposée (µm)	Image
1	30	0.04	1	13.0034	
1.5	30	0.04	1	16.1434	
2	30	0.04	1	13.5945	
2.5	30	0.04	1	15.1319	
3	30	0.04	1	13.3517	
3.5	30	0.04	1	23.3655	

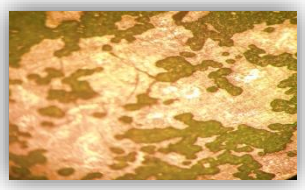
4	30	0.04	1	15.1319	
4.5	30	0.04	1	13.6299	
5	30	0.04	1	20.0943	
5.5	**30**	**0.04**	**1**	**14.0193**	

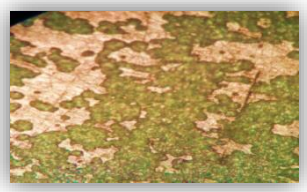
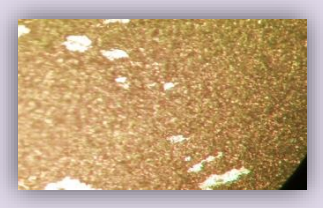
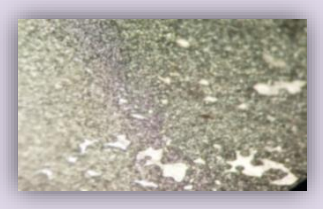
Les résultats présentés dans ce tableau montrent que le pH a un impact significatif sur la qualité des dépôts. En se basant sur les valeurs d'épaisseur obtenues et l'apparence des surfaces recouvertes, il a été observé que lorsque le pH était ≤ 3, ou ≥ 4, les surfaces n'étaient pas suffisamment revêtues. En revanche, lorsque le pH était de 3.5, l'échantillon a présenté un bon revêtement avec une épaisseur de 23.36 µm. Ainsi, maintenir la solution d'électrodéposition à un pH acide approprié et stable permet d'éviter des dépôts de mauvaise qualité. Par conséquent, pour obtenir des revêtements optimaux, la valeur idéale du pH est de 3.5.

III. 7. 1. 3. Effet du courant sur le dépôt d'électrodéposition

L'impact de la variation de l'intensité du courant, modifiée de 0.01 à 0.1 A, sur les caractéristiques du dépôt de zinc sur les substrats a été analysé. Les paramètres opératoires du bain électrolytique et les valeurs d'épaisseur obtenues lors de cette analyse sont présentés dans le tableau 16.

Tableau 16 : Effet de l'intensité du courant sur le procédé d'électro zingage de l'acier examiné.

I (A)	Temps (min)	PH	Agitation (tours/s)	épaisseur de la couche déposée (µm)	Image
0.01	30	3.5	1	8.0110	
0.02	30	3.5	1	10.2363	
0.03	30	3.5	1	12.9067	
0.04	30	3.5	1	24.9222	

0.05	30	3.5	1	13.5520	
0.06	30	3.5	1	19.5051	
0.07	30	3.5	1	19.6270	
0.08	30	3.5	1	24.5953	
0.09	30	3.5	1	21.9636	
0.1	30	3.5	1	24.30020	

Pour les valeurs présentées dans le tableau ci-dessus, l'intensité du courant exerce une influence significative sur la formation de la couche d'électrodéposition. Il a été observé que lorsque le courant est < 0.08 A, les substrats ne sont pas bien recouverts. En revanche, à partir d'une valeur de courant de 0.08 A ou plus, le revêtement est satisfaisant. Il convient de noter qu'une valeur de courant de 0.08 A, a permis d'obtenir une épaisseur notable de 24.59 µm, accompagnée d'un meilleur aspect, notamment en termes de brillance.

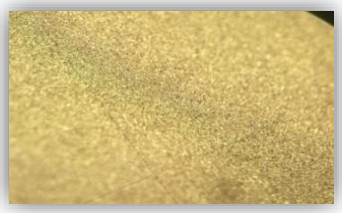
III. 7. 1. 4. Influence des proportions des additifs

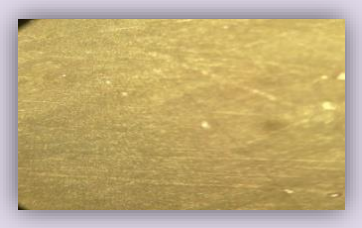
Toujours en recherche d'une qualité de revêtement améliorée, d'autres essais ont été effectué par l'utilisation des extraits investigués à déférentes concentrations dans le bain électrolytique. Dans cette perspective, Une étude de la configuration de dépôt, accompagnée de plusieurs autres critères, tels que l'épaisseur, l'adhérence et la brillance de la couche de zinc déposée, a été effectuée. Les observations recueillies sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

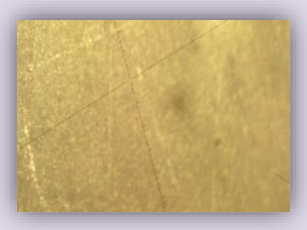
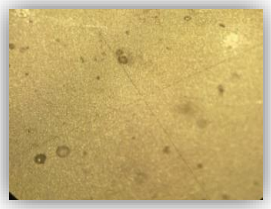
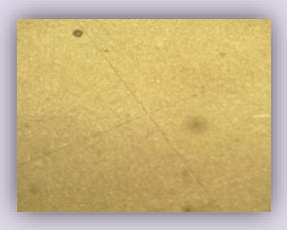
Tableau 17 : Caractéristiques du revêtement lors de l'utilisation de différentes concentrations d'extraits comme additifs dans le bain électrolytique (pH=3.5 ; I= 0.08 A ; t=30 min ; agitation = 1 tour/s).

Extrait	C (g/L)	Épaisseur de la couche déposée (µm)	Adhésion	Brillance (GU)	Qualité du dépôt	Image
SE	0	15.9310	++	5.2	Moins lisse et matte	
	0.1	24.5440	+++	103	Lisse et brillan	

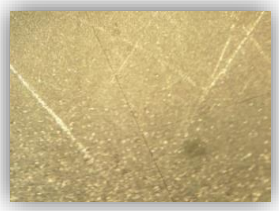
EB	0.12	20.6507	+++	61.4	Lisse et semi brillant	
	0.14	22.4309	+++	24.7	Lisse et semi brillant	
	0.16	24.8342	+++	25.9	Lisse et semi brillant	
	0.18	21.8385	++	26.9	Lisse et semi brillant	
	0.2	21.0757	+++	58.1	Lisse et semi brillant	
	0.4	20.8166	++	17.5	Lisse et semi brillant	

	0.6	23.7216	++	17.7	Lisse et semi brillant	
	0.8	24.3002	+++	20.2	Lisse et semi brillant	
	1	20.9440	+++	17.6	Lisse et semi brillant	
	1.2	22.4698	++	8.7	Lisse et matte	
	1.4	21.5408	++	9.3	Lisse et matte	
	1.6	24.7787	++	16	Lisse et semi brillant	

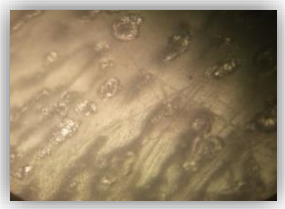
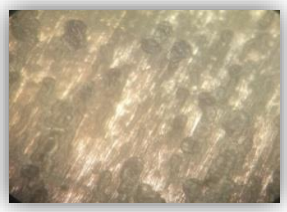
	1.8	17.5798	++	8.5	Lisse et matte	
	2	19.7439	+	9.9	Lisse et matte	
	2.2	21.1224	+	9.4	Lisse et matte	
	2.4	24.2111	+	8.7	Lisse et matte	
	0.2	23.6115	+++	35.3	Lisse et semi brillant	
	0.4	21.7633	+++	38	Lisse et semi brillant	

EM	0.6	19.0748	+++	33.2	Lisse et semi brillant	
	0.8	24.4782	+++	24	Lisse et semi brillant	
	1	22.1972	+++	25,6	Lisse et semi brillant	
	1,2	23.0681	++	24.7	Lisse et semi brillant	
	1.4	22.5293	++	10.8	Lisse et matte	
	1.6	22.8557	++	9.4	Lisse et matte	

	1.8	24.2577	+	22.9	Lisse et semi brillant	
	2	23.4062	+++	9.9	Lisse et matte	
	2.2	24.7897	+++	9.8	Lisse et matte	
	2.4	21.2839	+++	9.8	Lisse et matte	
	2,6	22.2907	++	5.1	Lisse et matte	
	2.8	24.3002	++	9.7	Lisse et matte	

EAE	0.2	18.9048	+++	28.2	Lisse et semi brillant	
	0.4	21.0290	++	29.4	Lisse et semi brillant	
	0.6	23.7904	++	27.2	Lisse et semi brillant	
	0.8	20.4726	+++	27.4	Lisse et semi brillant	
	1	21.8078	+++	8.3	Lisse et matte	
	1.2	21.8361	+++	10.6	Lisse et matte	

	1.4	20.8888	+++	19.2	Lisse et sem brillant	
	1.6	20.9440	+	8.7	Lisse et matte	
	1.8	24.2126	++	8.6	Lisse et matte	
	2	22.8373	++	8.6	Lisse et matte	
	2.2	23.5281	+	8.7	Lisse et matte	
	2.4	21.0957	++	9.1	Lisse et matte	

	2.6	24.3814	++	8.2	Lisse et matte	
	2.8	21.7188	++	8.5	Lisse et matte	
EDCM	**0.2**	19.1130	**+++**	6.8	Moins lisse et matte	
	0.4	24.0331	+++	7.2	Moins lisse et matte	
	0.6	21.3405	+++	6.0	Moins lisse et matte	
	0.8	21.9433	+++	6.4	Moins lisse et matte	

	1	22.3419	+++	6.8	Moins lisse et matte	
	1.2	23.3188	+++	6.1	Moins lisse et matte	
	1.4	22.0476	++	6.7	Moins lisse et matte	
	1.6	20.9015	+	7.2	Moins lisse et matte	

Il est important de souligner que les additifs sont habituellement ajoutés en faibles proportions pour optimiser la brillance, réduire la porosité et ajuster la structure ainsi que l'aspect des dépôts. D'après les expériences réalisées, les dépôts obtenus étaient généralement lisses et moins poreux avec les extraits EM, EAE et EB. Toutefois, l'extrait EDCM a engendré une surface légèrement moins lisse. Par ailleurs, toutes les épaisseurs mesurées respectaient les normes ASTM A879 et ASTM B633 [27-29].

En prenant en compte la structure, l'épaisseur des surfaces revêtues et les résultats d'adhérence, il a été démontré que les recouvrements les plus performants, caractérisés par une nucléation et une croissance optimales, ont été obtenus à des concentrations spécifiques : 2.2 g/L, 2.6 g/L, 0.16 g/L et 0.4 g/L pour les extraits EM, EAE, EB et EDCM, respectivement. Ces résultats soulignent que le type d'additif, ainsi que sa concentration dans le bain électrolytique, ont une influence majeure sur l'amélioration des performances des dépôts, notamment en ce qui concerne la microstructure, l'adhérence et l'aspect esthétique. Bien que les additifs puissent influencer les dépôts par divers

mécanismes tels que la cinétique des réactions, l'interaction de surface ou la formation de complexes, il reste difficile de définir un mode d'action généralisé, chaque additif ayant un comportement spécifique selon son environnement [30].

De plus, les mesures de brillance des couches revêtues, reflétant leur aspect extérieur, étaient conformes aux normes ASTM D523, ASTM D2457, BS 3900, DIN EN ISO 2813 et DIN 67530 [31,32]. Les niveaux de brillance variaient de semi-brillant à mat pour les extraits EM et EA, tandis que les dépôts réalisés avec l'extrait EB présentaient une brillance allant de brillant à semi-brillant, voire mat, en fonction de la concentration. Il convient de souligner que les surfaces traitées avec l'extrait dichlorométhanolique (EDCM) présentaient un aspect généralement mat, indépendamment de la concentration utilisée.

En résumé, l'incorporation des extraits EM, EAE, EB et EDCM comme additifs dans les bains d'électrodéposition a considérablement amélioré les propriétés des dépôts, notamment en termes de brillance, de porosité, de régularité de surface et d'épaisseur, par rapport aux dépôts réalisés sans ces additifs.

III. 7. 2. Investigation de l'efficacité anti corrosion des substrats métalliques traités en présence des extraits de *Sanguisorba minor* L

III. 2. 1. Étude électrochimique

III. 2. 1. 1. Mesures de polarisation potentiodynamique

Les essais de polarisation ont été conduits à température ambiante dans un bain d'eau de mer, en utilisant des substrats en acier comme électrode de travail. Ces tests ont été réalisés sur une plage de potentiel de ± 250 mV autour du potentiel à circuit ouvert, pendant une durée de 15 minutes, avec une vitesse de balayage de 1 mV/s [33]. La porosité des surfaces recouvertes a été estimée à l'aide de la relation suivante :

$$\boldsymbol{P = \frac{Rps}{Rp}\, 10^{\Delta Ecorr/\beta a}} \qquad (1)$$

$$\boldsymbol{\Delta E_{corr} = E_{corr} - E_{corrFe}} \quad (2)$$

Où :

$\boldsymbol{P}$ **:** Porosité de la couche de zinc déposée**.**

Rps : Résistance de polarisation du substrat non revêtu ($\Omega . cm^2$).

Rp : Résistance de polarisation des substrats revêtus ($\Omega . cm^2$).

$\boldsymbol{\Delta Ecorr}$**:** Potentiel de corrosion.

$\boldsymbol{\beta a}$ **:** Pont de Tafel des réactions anodiques ($mV . Dec^{-1}$).

$\boldsymbol{E_{corr}}$**:** Potentiel de corrosion du substrat revêtu (V).

E_{corrFe} : Potentiel de corrosion du fer (V).

L'évaluation de l'efficacité inhibitrice s'appuie sur l'application de la formule suivante [34]:

$$EI\% = \frac{I°corr - Icorr}{I°corr}.100 \qquad (3)$$

Où :

I°corr : Intensité de courant de corrosion en absence de l'extrait.

Icorr : Intensité de courant de corrosion en présence de l'extrait.

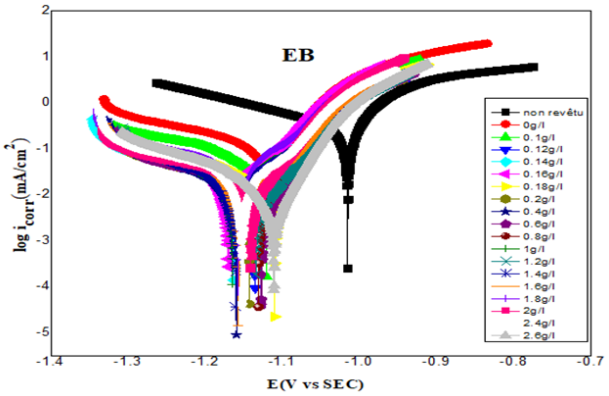


Figure 45 : Courbes de polarisation potentiodynamique pour les aciers non revêtus et revêtus, en présence et en absence de diverses concentrations d'EB.

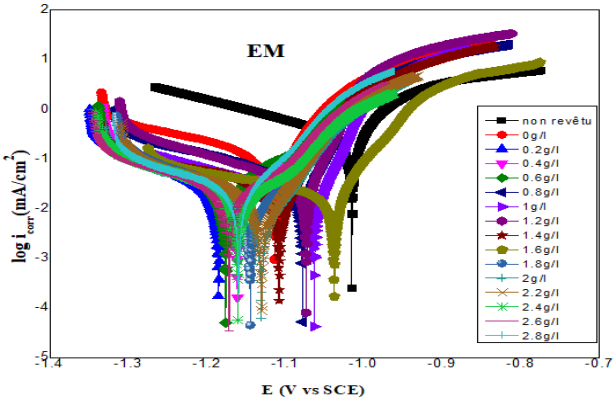


Figure 46 : Courbes de polarisation potentiodynamique pour les aciers non traités et traités, en présence et en absence de diverses concentrations d'EM.

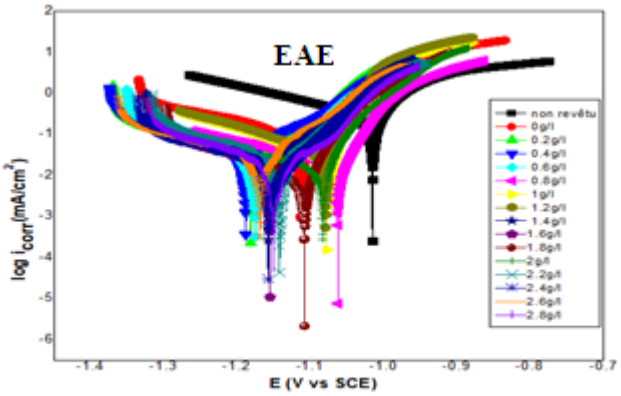


Figure 47 : Courbes de polarisation potentiodynamique pour les aciers non traités et traités, en présence et en absence de diverses concentrations d'EA.

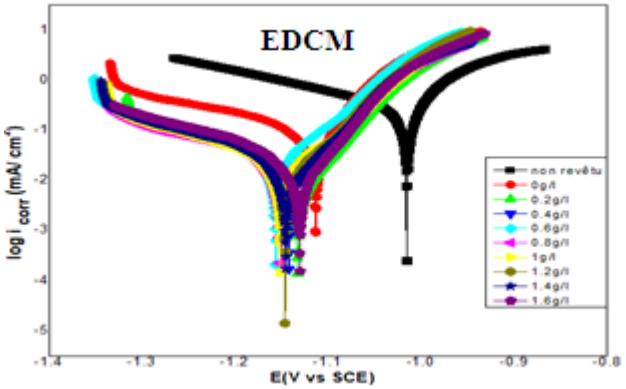


Figure 48 : Courbes de polarisation potentiodynamique pour les aciers non traités et traités, en présence et en absence de diverses concentrations d'EDCM.

Il a été observé que l'ajout d'additifs au recouvrement des substrats a entraîné une réduction considérable des densités de courant et de la vitesse de corrosion, voyant les figures précédentes et les données du (Tableau 17), comparativement aux aciers non revêtus ou revêtus sans additifs. De même que la vitesse de corrosion, comparativement aux substrats non revêtus ou revêtus sans additifs. Ces résultats démontrent clairement que les extraits étudiés renforcent de manière notable la qualité des dépôts, en produisant des revêtements bien plus résistants à la corrosion. En particulier, l'incorporation de l'extrait butanolique a conduit à une efficacité exceptionnelle de 97.40 %. Les potentiels d'abandon des substrats revêtus en présence des extraits se sont révélés plus cathodiques comparativement à ceux enregistrés sans l'ajout d'additifs.

Les essais ont révélé que la densité de courant et la vitesse de corrosion ne varient pas de manière linéaire avec la concentration des additifs. Cela s'explique probablement par la présence dans chaque processus d'électrodéposition d'une concentration optimale d'additifs permettant d'obtenir une qualité de dépôt supérieure [35].

Pour chaque concentration de chaque extrait, une efficacité d'inhibition maximale a été atteinte, comme le montrent les résultats suivants :

- ✓ EB : 97.40 % à 0.16 g/L.
- ✓ EM : 94.55 % à 2.2 g/L.
- ✓ EAE : 95.97 % à 2.6 g/L.
- ✓ EDCM : 93.96 % à 0.4 g/L.

III. 2. 1. 2. Spectroscopie d'impédance électrochimique (S.I.E)

Les figures 49, 50, 51 et 52 présentent les spectres d'impédance de Nyquist obtenus pour les substrats traités. Ces spectres comparent les substrats avec et sans l'ajout de diverses concentrations d'extraits.

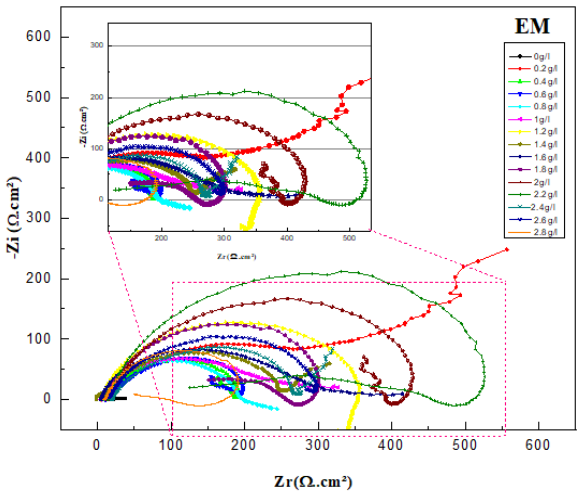


Figure 49 : Courbe d'impédance électrochimique des substrats traités, avec et sans l'ajout de diverses concentrations d'EM.

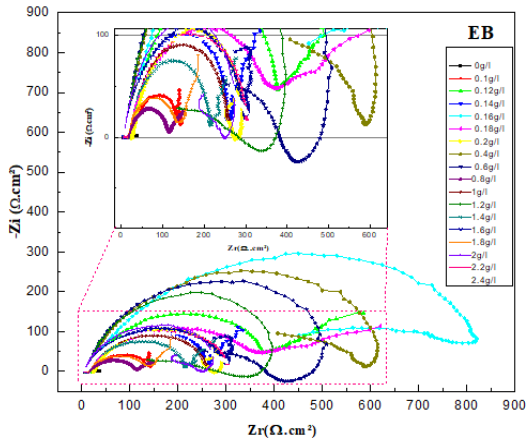


Figure 50 : Courbe d'impédance électrochimique des substrats traités, avec et sans l'ajout de diverses concentrations d'EB.

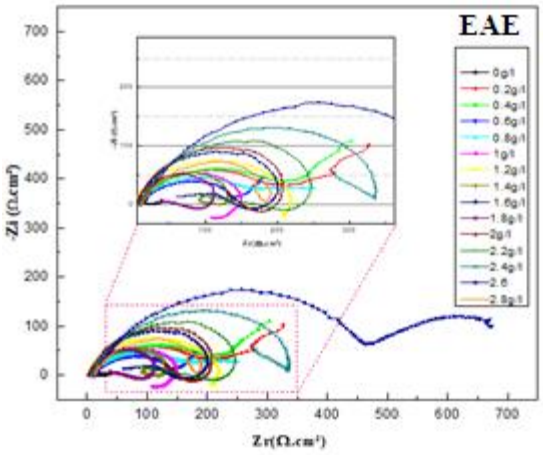


Figure 51 : Courbe d'impédance électrochimique des substrats traités, avec et sans l'ajout de diverses concentrations d'EAE.

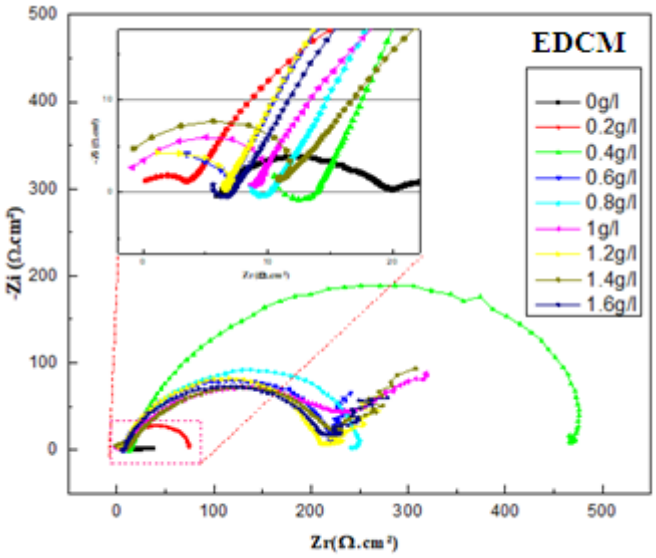


Figure 52 : Courbe d'impédance électrochimique des substrats traités, avec et sans l'ajout de diverses concentrations d'EDCM.

Les diagrammes présentés dans les figures ci-dessus montrent des boucles de formes variées pour tous les extraits. Une boucle puissante, observée pour tous les extraits à haute fréquence, est liée au transfert de charge [27]. Les boucles à basse fréquence pourraient correspondre à des boucles inductives ou à d'autres types de comportements [37]. Des résultats similaires ont été rapportés dans la littérature [38].

L'efficacité d'inhibition (EI%) est déterminée selon la formule suivante [36] :

$$EI\% = \frac{Rp - Rp^{\circ}}{Rp} \qquad (4)$$

Rp et Rp: sont les valeurs de résistances de polarisation obtenues avec et sans l'ajout d'additifs respectivement. Les paramètres électrochimiques, Potentiel à Circuit Ouvert (**OCP**) , résistance de transfert de charge ($\mathbf{R_{Ct}}$), ($\mathbf{C_{dl}}$) et l'efficacité inhibitrice (**EI%**) sont listés dans le tableau 18.

Tableau 18 : Paramètres d'impédance électrochimique et valeurs d'efficacité inhibitrice pour les substrats revêtus en présence et en absence de différentes concentrations d'extraits.

Extraits	$C(g/l)$	-Eocp (mv)	R_{Ct} $(\Omega.cm^2)$	C_{dl} $(\mu F/cm^2)$	EI (%)
SE	0	1051	18.93	299.3	/
EB	0.1	1088	140.9	158.0	86.56
	0.12	1089	437.7	57.44	95.67
	0.14	1098	262.8	54.25	92.79
	0.16	1071	786.8	11.32	97.59
	0.18	1088	488.2	102.9	96.12
	0.2	1083	252.1	35.34	92.49
	0.4	1082	572.0	22.25	96.69
	0.6	1066	400.3	14.15	95.27
	0.8	1085	111.3	200	82.99
	1	1086	260.3	77.03	92.72
	1.2	1060	306.1	23.29	93.81
	1.4	1085	221.3	80.51	91.44
	1.6	1080	306.5	41.53	93.82
	1.8	1097	132.8	189.3	85.74
	2	1088	237.5	26.79	92.02
	2.2	1089	307.7	41.36	93.84
	2.4	1064	300.9	16.71	93.70
EM	0.2	1100	370.4	229.6	94.88
	0.4	1083	180.4	49.38	89.50
	0.6	1088	183.7	69.27	89.69
	0.8	1065	203.3	247.3	90.68
	1	1057	347.2	289.6	94.54
	1.2	1064	338.7	59.20	94.41
	1.4	1081	266.4	29.86	92.89
	1.6	1067	340.1	219.10	94.43
	1.8	1066	248.5	16.00	92.38
	2	1079	386.9	18.42	95.10
	2.2	1060	439.5	12.89	95.69
	2.4	1089	265.30	42.70	92.86
	2.6	1096	288.0	39.34	93.42
	2.8	1090	129.4	19.43	85.37
	0.2	1118	268	296.9	92.58
	0.4	1124	246.8	207.4	92.32
	0.6	1096	146.50	243.1	87.07
	0.8	1054	227.7	262.1	91.68

EAE	1	1061	132.4	151.3	85.7
	1.2	1067	211.4	188.1	91.04
	1.4	1083	105.9	94.92	82.12
	1.6	1076	150.8	26.38	87.44
	1.8	1062	78.77	28.28	75.96
	2	1061	161.1	27.64	88.24
	2.2	1065	186.3	186.3	89.83
	2.4	1086	322.7	49.31	94.13
	2.6	1045	614.5	25.89	96.91
	2.8	1070	172.0	41.45	88.99

D'après les résultats présentés dans le Tableau 18, il apparaît que la variation des valeurs de la résistance de transfert de charge, de la capacité de la double couche et de la concentration d'additif n'est pas linéaire. Cela peut s'expliquer par le fait que, pour chaque procédé d'électrodéposition, il existe une concentration optimale d'additif permettant d'obtenir la meilleure qualité de dépôt [35].

L'efficacité inhibitrice maximale obtenue aux concentrations optimales des extraits analysés était la suivante :

- ✓ EB : 97.59 % à 0.16 g/L.
- ✓ EAE : 96.91 % à 2.6 g/L.
- ✓ EDCM : 95.95 % à 0.4 g/L.
- ✓ EM : 95.69 % à 2.2 g/L.

Ces performances sont en parfaite concordance avec les données issues des courbes de polarisation.

III. 2. 1. 3. Analyse gravimétrique

Pour évaluer l'inhibition de la corrosion des aciers recouverts, un essai gravimétrique (perte en poids) a été réalisé. Les échantillons, qu'ils soient recouverts ou non avec l'ajout d'extraits à diverses concentrations, ont été pesés avant et après être plongés dans de l'eau de mer (milieu corrosif) à température ambiante pendant une durée de 30 jours. Il est important de noter que les surfaces recouvertes des substrats ont été évaluées avec exactitude avant leur immersion. Les valeurs de la perte en poids de ces échantillons ont été enregistrées tous les cinq jours successifs. Le tableau 19 présente les valeurs de la vitesse de corrosion ainsi que l'efficacité inhibitrice des substrats couverts, tant en l'absence qu'en présence des extraits testés séparément comme additifs dans les bains d'électrodéposition.

Tableau 19 : Paramètres de la corrosion dérivée des observations sur la réduction de poids de l'acier recouvert en présence des extraits analysés.

Durées **Extrait**	**[C] g/L**	**5**		**10**		**15**		**20**		**25**	
/	**/**	**V (mg .cm^{-2}.h^{-1})**	**E (%)**	**V (mg .cm^{-2}.h^{-1})**	**E (%)**	**V (mg.cm^{-2}.h^{-1})**	**E %**	**V (mg .cm^{-2}.h^{-1})**	**E (%)**	**V (mg.cm^{-2}.h^{-1})**	**E (%)**
Substrat non recouvert	/	0.2587	/	0.1511	/	0.1589	/	0.1246	/	0.1063	/
Substrat recouvert en absence d'additif	0	0.2351	/	0.1367	/	0.1187	/	0.1125	/	0.0968	/
EM	0.2	0.0398	83.09	0.0237	82.67	0.0148	87.52	0.0150	86.68	0.0126	87.01
	0.4	0.0444	81.1	0.0317	76.78	0.0201	83.06	0.0132	88.24	0.0107	88.90
	0.6	0.1177	49.93	0.0684	49.97	0.0404	65.97	0.0282	74.96	0.0205	78.79
	0.8	0.0749	68.16	0.0329	75.94	0.0212	82.10	0.0150	86.68	0.0085	91.24
	1	0.0358	84.76	0.0165	87.91	0.0112	90.56	0.0070	93.77	0.0056	94.2
	1.2	0.0833	64.55	0.0414	69.7	0.0273	77.01	0.0201	82.13	0.0158	83.63
	1.4	0.0476	79.75	0.0229	83.26	0.014	88.19	0.0101	91.01	0.0079	91.8
	1.6	0.1116	52.51	0.0549	59.84	0.0356	69.99	0.0265	76.43	0.0210	78.35
	1.8	0.0664	71.76	0.0389	71.55	0.0253	78.70	0.0194	82.72	0.0149	84.62
	2	0.0558	76.27	0.0376	72.52	0.0240	79.79	0.0221	80.35	0.0177	81.73
	2.2	0.015	92.63	0.0075	94.52	0.0066	94.44	0.0045	95.97	0.0041	95.76
	2.4	0.0278	88.18	0.0144	89.5	0.0120	89.92	0.0112	90.02	0.0090	90.72
	2.6	0.0238	89.87	0.0136	90.03	0.01	91.61	0.0091	91.95	0.0072	92.51
	2.8	0.0708	69.87	0.05	63.42	0.0327	72.46	0.0308	72.65	0.0263	72.85
	0.2	0.0416	82.27	0.025	81.71	0.0194	83.62	0.0211	81.23	0.0176	81.75
	0.4	0.0363	84.53	0.0199	85.41	0.0232	80.43	0.0213	81.03	0.0176	81.79
	0.6	0.0815	65.30	0.0465	65.92	0.0319	73.12	0.0264	76.49	0.0258	73.34
	0.8	0.0640	72.76	0.0357	73.87	0.0254	78.6	0.0227	79.78	0.0168	82.62

EAE	1	0.1621	31.02	0.0867	36.52	0.0567	52.16	0.0379	66.31	0.0250	74.15
	1.2	0.0920	60.84	0.0445	67.39	0.0247	79.12	0.0172	84.71	0.0123	87.21
	1.4	0.1828	22.24	0.1023	25.11	0.0582	50.89	0.0474	57.79	0.0370	61.68
	1.6	0.0611	74	0.0293	78.52	0.0179	84.84	0.0133	88.12	0.0086	91.04
	1.8	0.0716	69.50	0.0332	75.71	0.0306	74.15	0.0221	80.31	0.0155	83.98
	2	0.0605	74.24	0.0263	80.7	0.0180	84.79	0.0120	89.32	0.0078	91.91
	2.2	0.0537	77.15	0.0301	77.94	0.0251	78.83	0.0195	82.6	0.0097	89.89
	2.4	0.0283	87.93	0.0130	90.48	0.0112	90.56	0.0098	91.23	0.0083	91.36
	2.6	0.0166	92.91	0.0080	94.1	0.0065	94.50	0.0068	93.94	0.0049	94.86
	2.8	0.0641	72.70	0.0286	79.07	0.0173	85.41	0.0136	87.9	0.0106	89.04
EB	0.1	0.0876	62.75	0.0374	72.61	0.0279	76.52	0.0198	82.42	0.0160	83.43
	0.12	0.0537	77.15	0.0262	80.84	0.0168	85.88	0.012	89.30	0.0106	88.95
	0.14	0.0873	62.86	0.0364	73.39	0.0213	82.02	0.0145	87.12	0.0115	88.08
	0.16	0.0292	87.56	0.0141	89.66	0.0086	92.74	0.0063	94.41	0.0031	96.75
	0.18	0.0466	80.19	0.0317	76.77	0.0203	82.91	0.0181	83.95	0.0127	86.88
	0.2	0.0720	69.39	0.0323	76.38	0.0208	82.46	0.0130	88.41	0.0101	89.56
	0.4	0.0655	72.14	0.0319	76.68	0.0247	79.22	0.0175	84.40	0.0136	85.86
	0.6	0.0550	76.59	0.0272	80.06	0.0265	77.71	0.0205	81.77	0.0136	85.89
	0.8	0.0860	63.42	0.0411	69.90	0.0269	77.34	0.0205	81.71	0.0148	84.64
	1	0.1178	49.90	0.0603	55.90	0.0410	65.44	0.0331	70.55	0.0246	74.57
	1.2	0.0521	77.83	0.0275	79.87	0.0173	85.43	0.0152	86.41	0.0122	87.37
	1.4	0.0812	65.45	0.0533	61	0.0371	68.72	0.0308	72.60	0.0310	67.96
	1.6	0.1211	48.48	0.0689	49.60	0.0532	55.14	0.0395	64.81	0.0316	67.28
	1.8	0.0664	71.75	0.0333	75.61	0.0220	81.42	0.0166	85.24	0.0166	82.78
	2	0.0646	72.51	0.0257	81.17	0.0152	87.19	0.0103	90.83	0.0080	91.72

	2.2	0.0470	80.02	0.0223	83.65	0.0188	84.18	0.0140	87.54	0.0091	90.50
	2.4	0.1025	56.39	0.0515	62.31	0.0355	70.07	0.0236	79.01	0.0205	78.81
EDCM	0.2	0.0926	60.57	0.0578	57.69	0.0301	74.61	0.0155	86.13	0.0122	87.32
	0.4	0.0357	84.79	0.0147	89.22	0.0090	92.33	0.0062	94.47	0.0050	94.80
	0.6	0.1169	50.27	0.0530	61.21	0.0330	72.18	0.0218	80.56	0.0143	85.12
	0.8	0.0759	67.70	0.0317	76.77	0.0246	79.19	0.0191	82.95	0.1153	88.08
	1	0.060	74.11	0.0255	81.32	0.0141	88.03	0.0091	91.82	0.0062	93.49
	1.2	0.1411	39.97	0.0622	54.48	0.0301	74.57	0.0248	77.90	0.0176	81.80
	1.4	0.0822	65.02	0.0358	73.78	0.0254	78.54	0.0175	84.38	0.0097	89.95
	1.6	0.1080	54.02	0.0486	64.43	0.0271	77.09	0.0274	75.58	0.0128	86.74

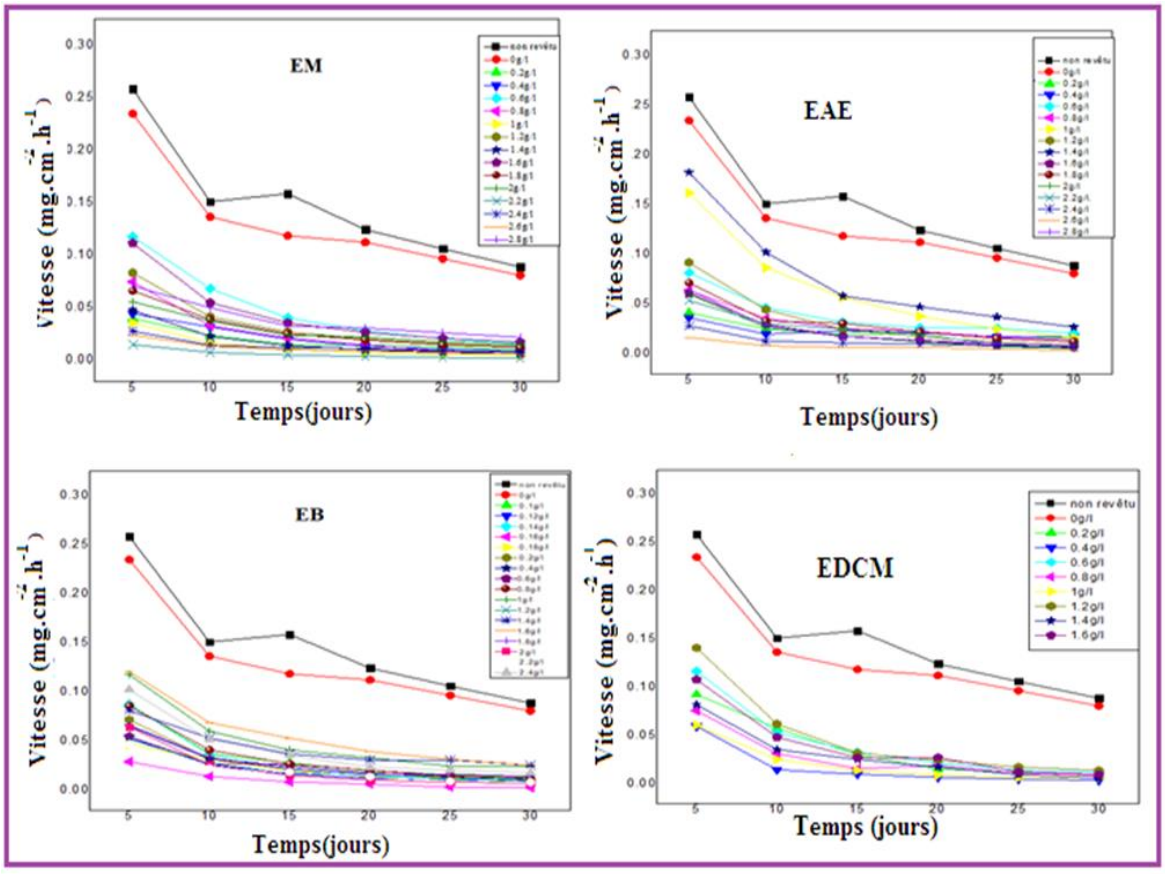


Figure 53 : Évolution de la corrosion des échantillons non revêtus et revêtus, avec et sans l'incorporation des extraits testés, en fonction du temps.

L'étude des résultats présentés dans le tableau 19 révèle que les échantillons revêtus avec l'ajout d'additifs lors de l'électrodéposition présentent une meilleure résistance à la corrosion que ceux dépourvus d'additifs lors de leur revêtement. En particulier, après 30 jours d'exposition à l'eau de mer, l'échantillon non traité avec des additifs a affiché une vitesse de corrosion de 0,0809 mg. cm^{-2}. h^{-1}. En revanche, pour les surfaces revêtues avec l'ajout des extraits, celles-ci présentaient des valeurs comprises entre 0,0269 mg. cm^{-2}. h^{-1} et 0,0029 mg. cm^{-2}. h^{-1}. Le meilleur résultat a été observé avec l'extrait butanolique, indiquant que les substrats revêtus en présence de cet extrait offrent une résistance accrue à la corrosion.

Il convient également de noter que ces résultats concordent bien avec ceux obtenus par les méthodes électrochimiques.

RÉFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Tamfu, A.N. ; Kucukaydin, S. ; Ceylan, O. ; Sarac, N. ; Duru, M.E. (2021). Phenolic composition, enzyme inhibitory and anti-quorum sensing activities of cinnamon (*Cinnamomum zeylanicum* Blume) and Basil (*Ocimum basilicum* Linn). *Chem. Afr.*, *4*, 759–767.

[2] Alain, K.Y.; Tamfu, A.N.; Kucukaydin, S.; Ceylan, O.; Pascal, A.D.; Félicien, A.; Dominique, S.C.; Duru, (2022)M.E.; Dinica, R.M. Phenolic profiles, antioxidant, antiquorum sensing, antibiofilm and enzyme inhibitory activities of selected Acacia species collected from Benin. *LWT-Food Sci. Technol.*, *171*, 114162.

[3] Tamfu, A.N.; Roland, N.; Mfifen, A.M.; Kucukaydin, S.; Gaye, M.; Botezatu, A.V.; Emin Duru, M.; Dinica, R.M., (2022). Phenolic composition, antioxidant and enzyme inhibitory activities of Parkia biglobosa (Jacq.) Benth., Tithonia diversifolia (Hemsl) A. Gray, and Crossopteryx febrifuga (Afzel.) Benth. Arab. J. Chem., 15, 103675.

[4] Küçükaydın, S.; Çayan, F.; Tel-Çayan, G.; Duru, M.E., (2021). HPLC-DAD phytochemical profiles of Thymus cariensis and T. cilicicus with antioxidant, cytotoxic, anticholinesterase, anti-urease, anti-tyrosinase, and antidiabetic activities. S. Afr. J. Bot., 143, 155–163.

[5] Zhou, P.; Li, J.; Chen, Q.; Wang, L.; Yang, J.; Wu, A.; Jiang, N.; Liu, Y.; Chen, J.; Zou, W.; et al. (2021). A Comprehensive Review of Genus Sanguisorba: Traditional Uses, Chemical Constituents and Medical Applications. Front. Pharmacol., 12, 750165. [CrossRef]

[6] Kaufmann, D.; Herrmann, F.; Wink, M. (2009). Extracts from traditional Chinese medical plants inhibit glycogen synthase kinase 3β activity, a potential Alzheimer target. Z. Für Phytother., 30, 16.

[7] Finimundy, T. C., Karkanis, A., Fernandes, Â., Petropoulos, S. A., Calhelha, R., Petrović, J., ... & Ferreira, I. C. (2020). Bioactive properties of *Sanguisorba minor* L. cultivated in central Greece under different fertilization regimes. *Food Chemistry*, *327*, 127043.

[8] Karkanis, A. C., Fernandes, Â., Vaz, J., Petropoulos, S., Georgiou, E., Ciric, A., ... & Ferreira, I. C. (2019). Chemical composition and bioactive properties of *Sanguisorba minor* Scop. under Mediterranean growing conditions. *Food & function*, *10*(3), 1340-1351.

[9] Tocai, A. C., Ranga, F., Teodorescu, A. G., Pallag, A., Vlad, A. M., Bandici, L., & Vicas, S. I. (2022). Evaluation of Polyphenolic Composition and Antimicrobial Properties of Sanguisorba officinalis L. and *Sanguisorba minor* Scop. *Plants*, *11*(24), 3561.

[10] Arab, Y., Sahin, B., Ceylan, O., Zellagui, A., Olmez, O. T., Kucukaydin, S., ... & Gherraf, N. (2022). Assessment of in vitro activities and chemical profiling of Senecio hoggariensis growing in Algerian Sahara. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, *23*(7).

[11] Gatto, M. A., Sergio, L., Ippolito, A., & Di Venere, D. (2016). Phenolic extracts from wild edible plants to control postharvest diseases of sweet cherry fruit. *Postharvest Biology and Technology*, *120*, 180-187.

[12] KARKANIS, A., VELLIOS, E., THOMAIDIS, T., BILALIS, D., EFTHIMIADOU, A., & TRAVLOS, I. (2014). Phytochemistry and biological properties of burnet weed (Sanguisorba spp.): A review. *Notulae Scientia Biologicae*, *6*(4), 395-398.

[13] Cristina, T. A., Ramona, M. A., Ioana, V. S., & Petru, B. (2021). Antioxidant capacity of Sanguisorba officinalis L. and *sanguisorba minor* scop.

[14] Ćirović, T., Barjaktarević, A., Cupara, S., Mitić, V., Nikolić, J., & Stankov, J. V. (2022). Antioxidant and antimicrobial activity of *Sanguisorba minor* L. extracts. *Serbian Journal of Experimental and Clinical Research*, *23*(1), 51-57.

[15] Ceccanti, C., Landi, M., Rocchetti, G., Miras Moreno, M. B., Lucini, L., Incrocci, L., & Guidi, L. (2019). Hydroponically grown *Sanguisorba minor* scop.: Effects of cut and storage on fresh-cut produce. *Antioxidants*, *8*(12), 631.

[16] Caruso, G., Godos, J., Privitera, A., Lanza, G., Castellano, S., Chillemi, A., ... & Grosso, G. (2022). Phenolic acids and prevention of cognitive decline: Polyphenols with a neuroprotective role in cognitive disorders and Alzheimer's disease. *Nutrients*, *14*(4), 819.

[17] Hamaguchi, T., Ono, K., Murase, A., & Yamada, M. (2009). Phenolic compounds prevent Alzheimer's pathology through different effects on the amyloid-β aggregation pathway. *The American journal of pathology*, *175*(6), 2557-2565.

[18] Rahman, M. M., Rahaman, M. S., Islam, M. R., Rahman, F., Mithi, F. M., Alqahtani, T., & Uddin, M. S. (2021). Role of phenolic compounds in human disease: Current knowledge and future prospects. *Molecules*, *27*(1), 233.

[19] Ali Asgar, M. D. (2013). Anti-diabetic potential of phenolic compounds: A review. *International Journal of Food Properties*, *16*(1), 91-103. [21] Krzyz˙ek, P. Challenges and Limitations of Anti-quorum Sensing Therapies. Front. Microbiol. 2019, 10, 2473.

[22] Kocak, G., Tamfu, A. N., Bütün, V., & Ceylan, O. (2021). Synthesis of quaternary piperazine methacrylate homopolymers and their antibiofilm and anti-quorum sensing effects on pathogenic bacteria. *Journal of Applied Polymer Science*, *138*(21), 50466.

[23] Raju, D. V., Nagarajan, A., Pandit, S., Nag, M., Lahiri, D., & Upadhye, V. (2022). Effect of bacterial quorum sensing and mechanism of antimicrobial resistance. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, *43*, 102409.

[24] Tamfu, A.N.; Boukhedena, W.; Boudiba, S.; Deghboudj, S.; Ceylan, O. (2022). Synthesis and evaluation of inhibitory potentials of microbial biofilms and quorum sensing by 3-(1, 3-dithian-2-

ylidene) pentane-2, 4-dione and ethyl-2-cyano-2-(1, 3-dithian-2-ylidene) acetate. Pharmacia, 69, 973–980.

[25] Tamfu, A. N., Kocak, G., Ceylan, O., Valentine, F., Bütün, V., & Çiçek, H. (2023). Synthesis of cross-linked diazaborine-based polymeric microparticles with antiquorum sensing, anti-swarming, antimicrobial, and antibiofilm properties. *Journal of Applied Polymer Science*, *140*(11), e53631.

[26] Hall, C. W., & Mah, T. F. (2017). Molecular mechanisms of biofilm-based antibiotic resistance and tolerance in pathogenic bacteria. *FEMS microbiology reviews*, *41*(3), 276-301.

[27] ASTM, C. A879/A879M-06–Standard Specification for Steel Sheet. *Zinc* Coated by the Electrolytic Process for Application Requiring Designation of the Coating Mass on Each Surface.

[28] ASTM, D., 3359-02: (2002). Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test. ASTM International, West Conshohocken, PA,.

[29] Tape, S. (2012). Standard test methods for measuring adhesion by tape test1. *ASTM International, Pennsylvania, United States*.

[30] Youssef, K. M., Koch, C. C., & Fedkiw, P. S. (2004). Influence of additives and pulse electrodeposition parameters on production of nanocrystalline zinc from zinc chloride electrolytes. *Journal of The Electrochemical Society*, *151*(2), C103.

[31] ASTM, D. (1999). 523-89, Standard Test Method for Specular Gloss. *ASTM International*.

[32] Gurleyen, L., Ayata, U., Esteves, B., & Cakicier, N. (2017). Effects of heat treatment on the adhesion strength, pendulum hardness, surface roughness, color and glossiness of Scots pine laminated parquet with two different types of UV varnish application. *Maderas. Ciencia y tecnología*, *19*(2), 213-224.

[33] Daoud, D., Douadi, T., Issaadi, S., & Chafaa, S. (2014). Adsorption and corrosion inhibition of new synthesized thiophene Schiff base on mild steel X52 in HCl and H2SO4 solutions. *Corrosion science*, *79*, 50-58.

[34] Marmi, H. (2017). *Amélioration de la résistance à la corrosion électrochimique des aciers par utilisation des inhibiteurs* (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).

[35] Muresan, L. M., & Varvara, S. C. (2005). Leveling and brightening mechanisms in metal electrodeposition. *Metal electrodeposition*, 1-45.

[36] Gu, T., Chen, Z., Jiang, X., Zhou, L., Liao, Y., Duan, M., ... & Pu, Q. (2015). Synthesis and inhibition of N-alkyl-2-(4-hydroxybut-2-ynyl) pyridinium bromide for mild steel in acid solution: Box–Behnken design optimization and mechanism probe. *Corrosion Science*, *90*, 118-132.

[37] Yurt, A. Y. S. E. L., Ulutas, S., & Dal, H. (2006). Electrochemical and theoretical investigation on the corrosion of aluminium in acidic solution containing some Schiff bases. *Applied Surface Science*, *253*(2), 919-925.

[38] Lee, E. J., & Pyun, S. I. (1995). The effect of oxide chemistry on the passivity of aluminium surfaces. *Corrosion science*, *37*(1), 157-168.

[39] Karima, H., (2020). Inhibition de la corrosion d'un acier au carbone Par Les Plantes Taxus baccata et Cedrus atlantica et leurs utilisations comme additives dans les bains d'électrodéposition, , Thèse de doctorat, Universite Laarbi Tebessi -Tebessa.

CONCLUSION

Les travaux élaborés dans cette thèse se concentrent sur les applications biologiques et anticorrosion des extraits de *Sanguisorba minor* L., en mettant l'accent sur les polyphénols dérivés de cette plante. L'étude commence par la sélection du matériel végétal, suivie de l'extraction et de l'analyse chimique des composés polyphénoliques par HPLC-DAD. Ensuite, ils évaluent leurs activités biologiques, notamment leurs propriétés antioxydantes, anti-enzymatiques, antibiofilm et de quorum quenching.

Les résultats obtenus révèlent que les polyphénols de *S. minor* possèdent une activité antioxydante remarquable, ce qui suggère leur potentiel dans la prévention des maladies liées au stress oxydatif. Ces composés présentent également une capacité à inhiber les cholinestérases et les enzymes digestives glucidiques, ce qui pourrait avoir des implications thérapeutiques prometteuses dans le traitement de maladies telles que l'Alzheimer et le diabète. De plus, les polyphénols perturbent la formation de biofilms et d'autres processus liés à la détection du quorum, ouvrant ainsi des perspectives pour leur utilisation comme base dans le développement de nouveaux antibiotiques visant à réduire la virulence pathogène et la résistance bactérienne.

Dans la deuxième partie de l'étude, une activité complémentaire a été élaborée pour évaluer l'efficacité inhibitrice des extraits polyphénoliques investigués contre la corrosion. Ces extraits ont été utilisés comme additifs dans les bains d'électrodéposition pour les dépôts de zinc sur l'acier doux E24-2. Les analyses, incluant la perte de masse, les courbes de polarisation et la spectroscopie d'impédance électrochimique, ont révélé que les surfaces revêtues avec ces extraits exhibaient une bonne dureté et une efficacité inhibitrice élevée : 95.82 % pour l'extrait méthanolique, 97.59 % pour l'extrait butanolique, 96.91 % pour l'extrait d'acétate d'éthyle et 95.95 % pour l'extrait de dichlorométhane. Ces extraits ont également amélioré la qualité du revêtement en réduisant la porosité, en augmentant l'adhérence et en rehaussant la brillance, l'extrait butanolique se distinguant particulièrement comme agent de brillance efficace.

PERSPECTIVES

Plusieurs perspectives sont attendues pour approfondir les études sur *Sanguisorba minor* L., notamment :

- ✓ L'utilisation des extraits testés comme additifs dans certains produits alimentaires est une pratique prometteuse, car elle permet d'étudier la dose nécessaire pour conserver efficacement ces aliments. En effet, ces additifs peuvent jouer un rôle crucial dans la préservation de la qualité et de la sécurité alimentaire, ainsi que dans l'industrie des cosmétiques, tout en offrant des alternatives naturelles aux conservateurs chimiques traditionnels. L'optimisation de la dose de ces

additifs est essentielle pour garantir leur efficacité tout en minimisant les risques potentiels pour la santé humaine.

- ✓ L'étude de l'efficacité inhibitrice de ces extraits dans d'autres milieux agressifs tels que l'H_3PO_4 et l'HCl, pourrait être élargie en remplaçant l'acier par d'autres matériaux comme le cuivre, l'inox et le manganèse.
- ✓ L'élargissement du spectre des utilisations thérapeutiques in vitro et in vivo, telles que l'activité antitumorale, antivirale et allélopathique, ainsi que l'analgésique, l'antidiabétique (in vivo), l'antialzheimer (in vivo) et l'antiparkinson.
- ✓ Des techniques avancées comme la chromatographie liquide couplée à la spectrométrie de masse (LC/MS-MS) permettent une caractérisation et une identification précise des extraits de plantes, chaque interface ayant ses propres caractéristiques et applications, notamment pour l'analyse des métabolites secondaires.
- ✓ L'étude de la relation structure-activité entre les extraits de *S. minor* et leurs activités biologiques et anticorrosives par simulation théorique implique une approche multidisciplinaire. Cette méthode permet d'analyser comment les propriétés moléculaires des composés extraits de S. minor, telles que l'hydrophobie, les orbitales moléculaires (EHOMO et ELUMO), et la polarité, influencent leurs capacités biologiques et anticorrosives. Les simulations théoriques, souvent basées sur des méthodes de mécanique quantique (DFT), peuvent prédire comment ces composés interagissent avec des surfaces métalliques ou des cibles biologiques, éclairant ainsi sur les mécanismes sous-jacents à leurs activités. De plus, ces études peuvent aider à identifier les modifications structurales qui pourraient améliorer ces activités, ce qui est crucial pour le développement de nouveaux agents anticorrosifs et biologiquement actifs.