



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté Des Sciences Exactes Et Des Science De La Nature et de la Vie
Département Des Science De La Nature

MÉMOIRE DE MASTER

En vue de l'obtention d'un diplôme de Master dans le cadre de l'arrêté ministériel n° 1275

Domaine : Sciences de la Matière

Filière : Chimie

Spécialité : Chimie des matériaux

Réf. :

Présenté et soutenu par :

BEN CHENNAF Samah

Le : 25/06/2023

Étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier en milieu acide par l'extrait des plantes

Jury :

Me	NECIRA Zelikha	MCB	Université Med Khider Biskra	Présidente
Mr	Djail Kamel	MAA	Université Med Khider Biskra	Rapporteur
Mr	DERRADJI Sahnoune	Dr	CRAPCBiskra	C0-Rapporteur
Mr	BOUKRAA Aissam	MCB	Université Med Khider Biskra	Examineur

Année universitaire : 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciement

Au nom de ALLAH Le Plus Clément et Le Plus Miséricordieux

Tout d'abord, je remercie ALLAH le Tout Puissant qui m'a accordé la volonté et le courage pour mener à bien ce mémoire dans le cadre d'un projet Start-up.

Mes plus sincères remerciements vont au Mr **Djail Kamel** pour le suivi continu tout le long de la réalisation de ce mémoire, et qui n'a pas cessé de donner ses conseils et remarques.

Et J'exprime mes profonds remerciements au Mr **SahnounDerradji** pour le suivi au Plateau Technique de Biskra - CRAPC

Merci à Me **NeciraZelikha**, pour avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.

Je tiens également à remercier vivement Mr **BoukraaAissam**, pour avoir bien voulu participer au jury de ce mémoire et accepter d'être examinateur.

À toutes les personnes qui m'a aidé à élaborer et réaliser ce mémoire

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite,

à ma mère «*Ben chennaf Assia* » A mon père «*Tayeb* »

école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.

Que dieu les gardes et les protège.

A mes frères : *Tarek, Hani, Sadek*

A mes sœurs : *Loudjine Et Djouhina, Djihane, Amani, Widad*

A mes amies : *Sirine, Halima, Hayat, Chaima, Roumaïssa, Sabrina, Widad, Aïcha, Rokia, wafa et loubna.*

Et je n'oublierai pas tous ceux qui ont le plus grand mérite de me soutenir.

On m'a conseillé et tous ceux qui m'ont dit du bien des plus vulnérables, merci beaucoup.

A ma grand-mère, mes oncles et mes tantes

A tout ma **famille ben chennaf**

A toute promotion « Master 2 » **Chimie des Matériaux 2023.**

A tous ceux qui me sont chères.

A tous ceux qui m'aiment.

A tous ceux que j'aime.

Samah Ben chennaf

Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des photos	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	01

Partie théorique

Chapitre I: Généralité sur la corrosion des métaux

Introduction	05
I- Corrosion.....	05
I-1.Définition de la corrosion	05
I-2. Importance de l'étude de la corrosion	05
I-3.Les processus de la corrosion	06
I-3-1.Corrosion chimique (sèche)	06
I-3-2.Corrosion biologique	07
I-3-3.Corrosion électrochimique (humide).....	07
I-3-4.Corrosionaccompagnéed'usure	07
I-4.Les différentes formes de corrosion	07
I-4-1.La corrosion généralisée (uniforme)	07
I-4-2.La corrosion localisée (ponctuelle)	08
1. La corrosion galvanique	09
2.La corrosion intergranulaire	09
3. La corrosion par piqûres	09
4.La corrosion caverneuse	10
5. La corrosion sélective	10
6. La corrosion-érosion	11
7. Corrosion sous contrainte (C.S.C)	11
I-5. Les facteurs de la corrosion	12
I-6. Réactions de corrosion.....	12
I-7. Protection contre la corrosion.....	13

1- Mesures préventives	13
2- Moyens de protection contre la corrosion	14
II- Inhibiteurs de corrosion	14
II-1. Historique	14
II-2. Définition	14
II-3. Propriétés d'inhibiteur	15
II-4. Classification des inhibiteurs de corrosion	15
II-4-1.Selon la nature de produit chimique.....	15
1. Les inhibiteurs organiques	15
2. Les inhibiteurs inorganiques	16
3. Les inhibiteurs minéraux	16
II-4-2.Selon leur mécanisme d'action chimique	16
1. Les inhibiteurs anodiques	16
2. Les inhibiteurs cathodiques	17
3. Les inhibiteurs mixtes	17
II-4-3.Selon leur mécanisme réactionnel	17
1. Inhibition par passivation	17
2. Inhibition par adsorption.....	18
3. Inhibition par précipitation	18
4. Inhibition par élimination de l'agent corrosif.....	18
II-4-4. Selon leur domaine d'application.....	18
II-5. Différence entre l'adsorption physique et chimique	19
1-l'adsorption physique (physisorption)	19
2-l'adsorption chimique (chimisorption).....	19
II-6. Inhibition de la corrosion en milieu acide	20
II-7. Les inhibiteurs verts	20
III- Les méthodes d'évaluation de la corrosion	21
III-1. La gravimétrie	21
III-2. Méthode électrochimique.....	22
III-2-1. Méthode stationnaire: courbes de polarisation	22
III-2-2.Méthode transitoire: la spectroscopie d'impédance électrochimique(SIE)..	23

Chapitre II: Matière végétale

I- Présentation des plantes étudiées	26
I-1. Famille des Astéracées	26
I-2. Classification botanique des plantes étudiées.....	26
I-3. Anvillea radiata.....	27
I-3-1. Description botanique.....	27
I-3-2. Répartition géographique	27
I-3-3. Composition chimique.....	27
I-3-4. Utilisation traditionnelle	28
I-4. Artemisia campestris	28
I-4-1. Description botanique.....	28
I-4-2. Répartition géographique	29
I-4-3. Composition chimique.....	29
I-4-4. Utilisation traditionnelle	29
II- Etude phytochimique.....	29
II-1. Définition des métabolites secondaires	30
II-2. Classement des métabolites secondaires	30
II-2-1. Les composés phénoliques	30
2-2-1-1. Acides phénoliques.....	31
2-2-1-2. Flavonoïdes.....	31
2-2-1-3. Anthocyanes	32
2-2-1-4. Tanins	32
2-2-1-5. Coumarines	33
2-2-1-6. Saponines.....	33
2-2-2. Alcaloïdes	34
2-2-3. Les terpènes et les stérols.....	34
2-2-3-1. Les terpènes	34
2-2-3-2. Les stérols	35
III- les méthodes d'extraction	35
III-1. Définition	35
III-2. Méthode d'extraction	36
III-2-1. Macération	36
III-2-2. Soxhlet	36
III-2-3. Hydrodistillation	37

Partie Expérimentale

Chapitre III: Matérielle est méthodes

I- Criblage phytochimique pour les deux plantes	41
I-1. Composition chimique des deux plantes	41
I-1-1. Test des alcaloïdes	41
I-1-2. Test des flavonoïdes	41
I-1-3. Test des tanins	42
I-1-4. Test des saponosides.....	42
I-1-5. Test des stérols non saturés et terpènes	43
I-1-6. Test des anthocyanes	43
I-1-7. Test des leuco anthocyanes	44
I-1-8. Test de l'amidon	44
I-1-9. Test des glucosides	45
I-2. Inhibiteurs verts utilisés.....	45
I-2-1. Préparation de l'inhibiteur	45
II- Etude de l'inhibition de la corrosion.....	47
1. Définition de l'acier.....	47
2. Les types d'acier.....	47
II-1. Etude gravimétrique	47
II-1-1. Matière étudiée.....	47
II-1-2. Préparation des échantillons.....	48
1. Découpage	48
2. Polissage	48
3. Préparation des milieux corrosif.....	49
4. Protocole de la méthode gravimétrique	49
II-2. Etude électrochimique.....	52
II-2-1. Montage électrochimique.....	52
II-2-2. Cellule électrochimique	52

Chapitre IV : Résultats et discussions

I. Criblage phytochimique	55
II. Etude gravimétrique	58
II-1. Caractérisation de la surface par microscope électronique à balayage	58
II-2. Energie dispersion rayon X (EDX)	59
II-3. Effet de concentration et de temps d’immersion.....	59
II-4. Effet de concentration de l’inhibiteur D et N	62
III- Méthode électrochimique	64
III-1. Mesure de potentiel libre	64
III-2. Courbe de polarisation	64
III-3. Courbes de l’impédance électrochimique	65
Conclusion générale	68
Référence bibliographique	
Résumé	

Liste des figures

Figure I-1 : Corrosion généralisé.....	08
Figure I-2 :Corrosion localisée (a) et Corrosion uniforme (b) d'un métal.....	08
Figure I-3 : Corrosion localisée.....	08
Figure I-4 : Corrosion galvanique	09
Figure I-5 :Corrosion intergranulaire.....	09
Figure I-6 :Corrosion par piqûres.....	10
Figure I-7 : Corrosion caverneuse	10
Figure I-8 : Corrosion sélective	10
Figure I-9 : Corrosion-érosion	11
Figure I-10 : Corrosion sous contrainte	11
Figure I-11 : Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel.....	23
Figure I-12 :Spectroscopie d'impédance électrochimique	24
Figure II-1 : La plante de Anvillea radiata.....	27
Figure II-2 : La plante de Artemisia campestris.....	28
Figure II-3 : Structure chimique d'acide phénolique(acide caféique).....	31
Figure II-4 : Structure de base des flavonoïdes	31
Figure II-5 : Structure générale des anthocyanes	32
Figure II-6 : Structure des tanins	32
Figure II-7 : Structure de coumarine	33
Figure II-8 : Structure de saponines	34
Figure II-9 : Structure alcaloïdes	34
Figure II-10 :Structure de la molécule d'isoprène.....	35
Figure II-11 : Quelques exemples de stéroïdes.....	35
Figure II-12 :Schéma du principe de la technique de Macération.....	36
Figure II-13 : Schéma du principe de la technique de Soxhlet.....	37

Figure II-14 : Schéma du principe de la technique de Hydrodistillation	38
Figure III-1 : Forme et dimensions des échantillons en cm.....	48
Figure III-2 :Dispositif pour l'étude gravimétrique	50
Figure IV-1 : Micrographies MEB de l'acier avant (a) et après l'immersion dans 7% HCl sans (b) et avec l'inhibiteur (c) et (d)	58
Figure IV-2 : Spectres de l'énergie dispersion EDX de l'acier avant (1) et après l'immersion dans 7% HCl sans (2) et avec l'inhibiteur (3) et (4).....	59
Figure IV-3 : Variations de la perte de masse Δm de l'acier X70 à différentes concentration de HCl en fonction du temps d'immersion.	60
Figure IV-4 : Variations de la V corrosion à différentes concentration de HCl en fonction du temps d'immersion.....	61
Figure IV-5 : Variations de V corrosion après 42hd'immersion en fonction du concentration HCl	61
Figure IV-6 : Variations de la perte de masse Δm après 42h d'immersion en fonction de la concentration de l'inhibiteur D et N dansHCl	62
Figure IV-7 : Variations de V de la corrosion après 42h d'immersion en fonction de la concentration de l'inhibiteur D et N dans HCl	63
Figure IV-8 :L'efficacité inhibitrice en fonction de la concentration de D et N	63
Figure IV-9 : Courbe de polarisation $i=f(E)$ de l'acier X70 dans un milieu acide sans et avec inhibiteur.....	64
Figure IV-10 : Courbe de Tafel de l'acier X70 en milieu acide sans et avec inhibiteur N / D	64
Figure IV-11 : Diagrammes de la spectroscopie d'impédance électrochimique en milieu acide sans et avec inhibiteur.	66

Liste des photos

Photo III-1: Détection des alcaloïdes	41
Photo III-2: Détection des flavonoïdes	42
Photo III-3: Détection des tanins	42
Photo III-4: Détection des saponosides.....	43
Photo III-5: Détection des stérols non saturés et terpènes	43
Photo III-6: Détection des anthocyanes	44
Photo III-7: Détection des leuco anthocyanes	44
Photo III-8: Détection de l'amidon	44
Photo III-9: Détection des glucosides	54
Photo III- 10: Les étapes de préparation l'inhibiteur	46
Photo III-11 : L'échantillon après polissage	49
Photo III-12 : L'acier x70 dans milieu acide HCl sans inhibiteur	50
Photo III-13 : L'acier x70 dans milieu acide HCl avec inhibiteur	51
Photo III-14 : Montage électrochimique	52
Photo III-15 : Cellule électrochimique.....	53

Liste des tableaux

Tableau I-1: Les facteurs influençant la corrosion	12
Tableau I.2 : Différences principales entre les deux types d'adsorption	19
Tableau II-1 : Classification botanique des plantes étudiées	26
Tableau III-1: Composition chimique de l'acier utilisé.....	48
Tableau III-2 : Les propriétés physico-chimiques d'acide chlorhydrique	49
Tableau IV-1 : Résultats des tests phytochimiques	55
Tableau IV-2 : Variations de la perte de masse, la vitesse de la corrosion	60
Tableau IV-3 : Variations de l'effet inhibitrice en fonction de C_{inh}	62
Tableau IV-4: Les valeurs des paramètres électrochimiques	65

Liste des abréviations

C.S.C : Corrosion sous contrainte

NACE : National Association of Corrosion Engineers

REACH : Registration, Evaluation, Authorization and restriction of CHemicals

Icorr : Densité du courant de corrosion

Ecorr : Potentiel de corrosion

Rp : Résistance de polarisation

SIE : Spectroscopie d'impédance électrochimique

N (negd) : Anvillea radiata

D (Dgouft) : Artemisia campestris

MeOH : méthanol

AcOEt : Acétate D'éthyle

Introduction générale

Introduction générale

L'acier au carbone est largement utilisé dans l'industrie et notamment dans l'industrie des hydrocarbures, et il se trouve souvent exposé à des milieux acides.

Ces milieux acides sont largement utilisés dans l'industrie et dans de nombreux procédés industriels, notamment dans les bains de décapage des métaux, le nettoyage des installations industrielles, la stimulation des puits de pétrole et les procédés pétrochimiques. Ces traitements à l'acide conduisent à la détérioration partielle des surfaces métalliques ^[1].

La corrosion est un phénomène qui affecte le comportement mécanique et physique des matériaux. Elle résulte d'une action chimique ou électrochimique d'un environnement sur les métaux et leurs alliages. Ses conséquences engendrent des coûts importants dans différents domaines et en particulier dans l'industrie, et peut provoquer des accidents graves à l'environnement et même des pertes en vie humaine puisqu'elle est susceptible d'entraîner des problèmes de santé (pollution, contamination...), et demande donc la mise en place d'une politique de prévention et de lutte ^[2,3].

L'inhibiteur de corrosion est l'une des méthodes les plus économiques de réduire le taux de corrosion, protéger les structures métalliques et de préserver les installations industrielles. Cette méthode suit le stand up en raison de son faible coût et de sa méthode de pratique. Un inhibiteur est un composé chimique que l'on ajoute, en faible quantité, au milieu pour diminuer la vitesse de corrosion des matériaux, Il peut être destiné à une protection permanente de la pièce, ou provisoire (notamment lorsque la pièce est particulièrement sensible à la corrosion). Sachant que les inhibiteurs verts font l'objet d'une grande attention dans le monde de l'industrie et vue leurs non toxicité et efficacité dans le domaine de la corrosion^[4,5], notre travail c'est basé sur l'utilisation de deux extraits de plantes, le premier à base de *Anvillea radiata*, et le second à base *Artemisia campestris*.

L'objectif de notre travail est d'étudier le phénomène de la corrosion de l'acier X70 dans un milieu acide HCl de différentes concentrations, et de la préparation des inhibiteurs vert à base d'extrait des plantes (*Anvillea radiata* et *Artemisia campestris*). En vue d'étudier l'efficacité inhibitrice de ces extraits par la méthode gravimétrique et la méthode électrochimique pour déterminer la plante la plus efficace contre la corrosion.

Ce manuscrit a été divisé en quatre chapitres. Le premier présente une étude bibliographique sur la corrosion de l'acier et les inhibiteurs de corrosion ainsi que les méthodes utilisées pour l'évaluation de la corrosion.

Le deuxième chapitre est consacré aux a une généralité sur les plantes étudiées et les méthodes d'extraction.

Le troisième chapitre rassemble les méthodes les plus utilisées pour l'évaluation de l'efficacité inhibitrice et les protocoles expérimentaux adoptés pour réaliser ce travail

Les résultats expérimentaux et les discussions sont regroupés dans le quatrième chapitre.

Ce travail se termine par une conclusion générale résumant l'essentiel des résultats et les perspectives pour approfondir l'étude.

Références bibliographiques :

- [1] Benarioua, M. (2019). Etude de l'inhibition de la corrosion d'un acier doux en milieu acide par l'emploi d'inhibiteurs à base de plantes (thèse de doctorat). Université de batna2 – mostefa ben boulaïd.
- [2] Abderrahim, K. (2017). Etude du pouvoir filmant et de l'efficacité inhibitrice de l'ASCOTEC-FU et de la tetrathiafulvalene sur la corrosion du cuivre en milieu salin aqueux thèse de doctorat). Université Badji Mokhtar Annaba.
- [3] Tradi, H ; Khaled, B. (2022). Etude de l'efficacité inhibitrice de substances vertes sur la corrosion de l'acier au carbone dans un milieu acide (mémoire de master). université larbi tebessi-tebessa.
- [4] Hamadi, L. (2020). Application des inhibiteurs verts sur la corrosion des aciers en milieux agressifs (these de doctorat). Universite de batna 2 – mostefa ben boulaïd.
- [5] Oulabbas, A. (2019). Effets des inhibiteurs verts sur la corrosion des aciers ordinaires dans deux milieux acides (thèse de doctorat). Universite badji mokhtar-annaba.

Partie théorique

CHAPITRE I

CHAPITRE I

Généralité sur la corrosion des métaux



Introduction

L'importance considérable de la corrosion dans la vie quotidienne (domestique ou industrielle) n'est plus à démontrer. En effet, ce phénomène touche pratiquement toutes les réalisations de l'ingénieur, des plus grandes au plus petites: production de l'énergie, construction, transport, secteur médical, l'électronique, etc.... Dans les pays industrialisés les conséquences de la corrosion ne résident pas seulement dans le coût économique (gaspillage de matière première, énergie et temps) mais également dans les accidents que peut provoquer (sécurité publique en jeu) ainsi que le mauvais impact sur l'environnement.

I- Corrosion

I-1. Définition de la corrosion

On peut dire qu'il n'existe pas une définition précise de la corrosion étant donnée la diversité des environnements rencontrés (aqueux, biologique, avec ou sans contrainte mécanique, etc..)^[1].

En générale la corrosion est la destruction chimique ou électrochimique des matériaux métalliques par leur environnement. C'est, en fait, le phénomène suivant lequel les métaux ont tendance à revenir à leur état naturel d'oxyde, sulfate, carbonate ... plus stable par rapport au milieu corrosif, et ainsi à subir une dégradation de leurs propriétés. On pourrait en conclure que la corrosion étant la manifestation de l'affinité chimique des métaux pour certains éléments constitue une branche de la chimie. Malheureusement ce concept purement chimique ne permet pas d'interpréter bien des phénomènes de corrosion qui font intervenir un certain nombre des facteurs présentant un caractère chimique, électrochimique, métallurgique, mécanique, et agissant souvent simultanément^[2].

I-2. Importance de l'étude de la corrosion

L'importance de l'étude de la corrosion est double. La première est économique, elle concerne de nombreuses installations : Tubes, bacs de stockage, échangeurs de chaleur, ...etc. Dans l'impact de la corrosion on distingue les pertes directes et les pertes indirectes, que nous allons examiner. La seconde est la conservation appliquée premièrement aux ressources de métal dont les réserves mondiales sont limitées et dont la destruction implique des pertes correspondantes d'énergie, et de réserves d'eau accompagnant la production et la fabrication des structures métalliques^[3].

Le cout des dégradations provoquées par la corrosion électrochimique s'élève à des dizaines de milliards dinars par an. Un des défis pour l'électrochimie est donc de ralentir le plus judicieusement possible ce processus naturel d'usure métallique. Ces chiffres prennent en compte :

- Les pertes directes: remplacement des matériaux corrodés et des équipements dégradés par la corrosion.
- Les pertes indirectes: réparation, pertes de production.
- Les mesures de protection: utilisation de matériaux résistants à la corrosion, revêtements et de protection cathodique.
- Les mesures de prévention: surdimensionnement des structures porteuses, inspections, entretiens^[4,5].

I-3. Les processus de la corrosion

La corrosion traduit la réactivité de la plupart des matériaux industriels vis-à-vis des environnements au contact desquels ils sont placés au cours de leur emploi. On distingue quatre principaux processus de corrosion^[6].

I-3-1. Corrosion chimique (sèche)

C'est la réaction entre le métal et une phase gazeuse ou liquide non électrolytique. Si cette corrosion se produit à haute température elle est alors appelée « corrosion sèche » ou corrosion à haute température. Au cours de la corrosion chimique, l'oxydation du métal et la réduction de l'oxydant se fait en une seule action, c'est-à-dire les atomes du métal forment directement des liaisons chimiques avec l'oxydant qui arrache les électrons de valence des atomes métalliques.

L'attaque du métal par une réaction chimique avec le milieu ambiant sans intervention du courant électrique nécessite généralement des températures élevées, la réaction qui se produit est de la forme :



Il est très difficile de donner des exemples de corrosion purement chimique, puisque le plus souvent elle est accompagnée de corrosion électrochimique. On peut considérer comme corrosion chimique l'attaque d'un métal par un autre métal liquide (Hg), par un sel fondu ou

par une solution aqueuse (A1 dans CCl_4) l'exemple de la corrosion sèche en atmosphère oxydante à haute température [7,8].

I-3-2. Corrosion biologique

Elle résulte de l'action des bactéries ou des produits provenant de l'activité bactérienne tels que des acides organiques ou des gaz comme CO_2 et SO_2 , sur le matériau métallique. Les canalisations enterrées sont sujettes à ce type de corrosion [9].

I-3-3. Corrosion électrochimique (humide)

C'est le phénomène de corrosion le plus important et elle se manifeste lorsque le réactif est un liquide ou lorsqu'il existe une hétérogénéité soit dans le métal ou dans le réactif, présentant une dissymétrie de composition. L'existence de ces hétérogénéités détermine la formation d'une pile, alors un courant électrique circule entre anodes et cathodes dans le réactif et les zones qui constituent les anodes sont attaquées (corrodées) donc dans tous les cas c'est l'oxydation d'un métal M à l'état d'ion Mn^+ et la réduction d'une espèce oxydée (Ox) en espèces réduites (Red). Pour une corrosion électrochimique on a



I-3-4. Corrosion accompagnée d'usure

Lorsque les produits de corrosion forment un dépôt adhérent et continu sur la surface du métal, ils ralentissent la vitesse de corrosion. Cette couche peut être éliminée en certains points par usure, abrasive ou érosive. Il y a alors accélération de la corrosion parce que la surface du métal est mise à nu [11].

I-4. Les différentes formes de corrosion

Le processus de corrosion des métaux prend quelques nombreuses formes, qui sont classées principalement selon la forme qui se manifeste à la surface corrodée. Elle est divisée en deux grandes catégories : "généralisée" (uniforme) caractérisée par une fluctuation aléatoire des sites anodiques et cathodiques sur la surface et "localisée" (ponctuelle) caractérisée par une séparation dans l'espace des sites anodiques et cathodiques [12,13].

I-4-1. La corrosion généralisée (uniforme)

La forme la plus classique de corrosion, mais pas toujours la plus importante en termes économiques ou sécuritaires.

La corrosion généralisée se traduit par une dissolution quasi uniforme en tout point de

la surface, en opposition aux autres formes de corrosion qui sont localisées. qui est une perte de matière plus ou moins régulière sur la surface. Ce type de corrosion est rencontré dans des milieux très acides où le film passif n'est pas stable (pH inférieur au pH de dépassivation).

Exemples :Oxydation; dissolution active dans l'acide; oxydation et passivité anodiques; polissage chimique et électrochimique; corrosion atmosphérique^[12,13,14](Figure I-1)



Figure I-1 : Corrosion généralisée

I-4-2. La corrosion localisée (ponctuelle)

C'est une corrosion qui se déroule en un lieu spécifiquement anodique d'une surface ou d'une structure métallique. Elles diffèrent de la corrosion uniforme par la distinction claire des endroits anodiques et cathodiques. En pratique la corrosion localisée provient d'une hétérogénéité du matériau ou de l'environnement et souvent elle pose beaucoup de problèmes. Donc c'est l'aspect de corrosion le plus dangereux car l'attaque se fait en certains endroits de la surface du métal ^[8] (Figure I-2 et Figure I-3). Les différents types de la corrosion localisée sont :

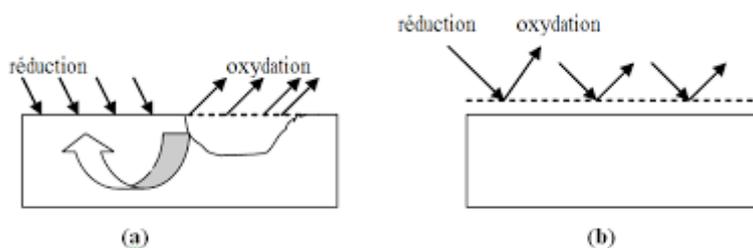


Figure I-2: Corrosion localisée (a) et Corrosion uniforme (b) d'un métal



Figure I-3 : corrosion localisée

1. La corrosion galvanique

Est due à la formation d'une pile électrochimique entre deux métaux différents et immergés dans la même solution. La dégradation du métal le moins résistant s'intensifie. C'est une des formes de corrosion les plus fréquentes en milieu aqueux. Les zones où se produisent les réactions anodique (corrosion du matériau) et cathodique (réduction de l'oxydant) sont distinctes. Cette localisation des réactions est essentiellement liée à une hétérogénéité provenant du métal, du milieu ou des conditions physico-chimiques à l'interface^[15] (Figure I-4).



Figure I-4 : Corrosion galvanique

2. La corrosion intergranulaire

La corrosion intergranulaire est une forme de corrosion localisée qui se propage selon les joints de grains du matériau. La profondeur de l'attaque peut être très importante et dégrader rapidement le cœur du matériau. Cela a pour conséquences de diminuer fortement les propriétés mécaniques du matériau et favoriser la croissance de fissures qui peuvent engendrer, dans le pire des cas, une rupture de la pièce en conditions de service ^[16] (Figure I-5).



Figure I-5 : Corrosion intergranulaire.

3. La corrosion par piqûres

Attaque très localisée en certains points de la surface métallique produite par certains anionhalogénure (chlorure) sur la surface des métaux qui se protègent par un film

d'oxyde passif tel que le cuivre, l'aluminium, l'acier inoxydable... cette attaque peut se progresser en profondeur alors que le reste de la surface reste indemne ^[17] (Figure I-6).

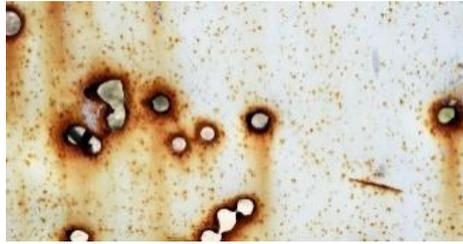


Figure I-6: Corrosion par piqûres

4. La corrosion caverneuse

Cette forme est due à une différence d'accessibilité de l'oxygène entre deux parties d'une structure, créant ainsi une pile électrochimique. Cette attaque sélective du métal est observée dans les fissures et dans d'autres endroits peu accessibles à l'oxygène ^[18] (Figure I-7).

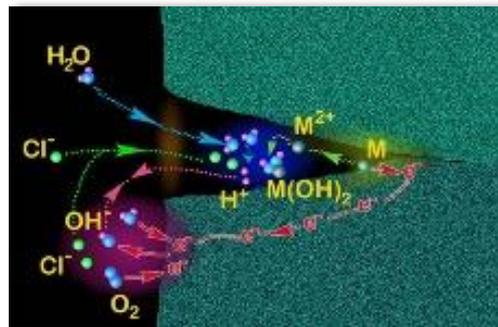


Figure I-7: Corrosion caverneuse

5. La corrosion sélective

Correspond à une oxydation d'un composant de l'alliage, conduisant à la formation d'une structure métallique poreuse (dont les différents constituants réagissent en proportion différente de leur teneur)

Exemple :Dézincification des laitons (CuZn)^[15,19] (Figure I-8).

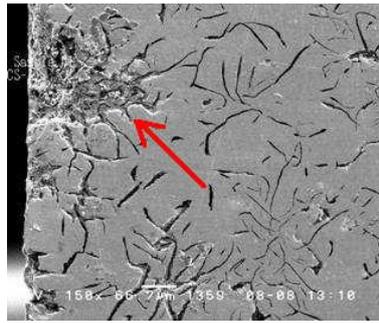


Figure I-8: corrosion sélective

6. La corrosion-érosion

Ce phénomène correspond à une dégradation de la surface sous l'effet de l'impact de particules, de gouttelettes, d'un jet, ou sous l'action d'un écoulement turbulent au voisinage d'un défaut de surface, et conduit à un amincissement local qui revêt souvent l'aspect d'une piqûre allongée ^[20](Figure I-9).



Figure I-9: corrosion-érosion

7. Corrosion sous contrainte (C.S.C)

La corrosion sous contrainte est le résultat de l'action simultanée d'un milieu corrosif et d'une contrainte mécanique. Ce type de corrosion se manifeste sous la forme de fissures qui peuvent être intergranulaire, soit transgranulaires. Les contraintes peuvent être, d'origine interne, provenant des opérations de mises en forme et des traitements thermiques, ou d'origine externe, qui résultent des conditions d'utilisations ^[1,8](Figure I-10).



Figure I-10: Corrosion sous contrainte

I-5. Les facteurs de la corrosion

Les phénomènes de corrosion dépendent d'un grand nombre des facteurs qui peuvent être classés en quatre groupes principaux comme le montre le tableau suivant:^[1,21]

Tableau I-1: Les facteurs influençant la corrosion

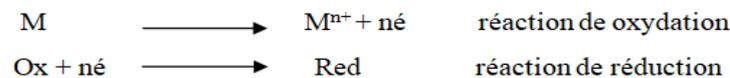
Facteurs relatifs au milieu et définissant le mode d'attaque	<ul style="list-style-type: none"> - Concentration du réactif. - Teneur en Oxygène, en impuretés, en gaz dissous (CO₂, NH₃, H₂S..). - Acidité du milieu, salinité, résistivité. - Température, pression. - Présence de bactéries.
Facteurs Métallurgiques	<ul style="list-style-type: none"> - Composition d'alliage, hétérogénéités cristallines. - Procédés d'élaboration. - Impuretés dans l'alliage, inclusions. - Traitements thermiques, mécaniques. - Additions protectrices.
Facteurs définissant les conditions d'emploi	<ul style="list-style-type: none"> - Etat de surface, défauts de fabrication. - Formes de pièces. - Sollicitations mécaniques. - Emploi d'inhibiteurs. - Procédés d'assemblage (couples galvaniques, soudures, etc.). - Croûte d'oxydes superficiels. - Force électromotrice extérieure (électrolyse).

Facteurs dépendants du temps	<ul style="list-style-type: none"> - Vieillessement. - Tensions mécaniques internes ou externes. - Température - modalité d'accès de l'oxygène ou autre gaz dissous. - Modification des revêtements protecteurs. - Apparition d'un dépôt (calcaïque ou autre).
------------------------------	--

I-6. Réactions de corrosion

La corrosion est un processus électrochimique. C'est que la corrosion ne se produit généralement pas par réaction chimique directe d'un métal avec son environnement, mais plutôt par l'opération de couplage réactions de demi-pile électrochimique. Une réaction demi-pile est celle dans laquelle les électrons apparaissent sur un côté ou l'autre de la réaction correspondante. Si les électrons sont produits (côté droit de la réaction), alors la réaction demi-pile est une réaction d'oxydation. Si les électrons sont des réactifs (côté gauche de la réaction), alors la réaction demi-pile est une réaction de réduction.

Elle résulte de l'établissement de courants locaux dus à l'existence de piles locales, la réduction cathodique et l'oxydation anodique étant localisées en deux zones distinct



Il s'agit d'un phénomène très général, qui affecte de nombreux domaines d'activité. Donc on peut dire que les phénomènes de corrosion dépendent du matériau et du milieu environnant. Lorsqu'un métal se dissout dans un milieu, sa surface est le siège d'une réaction anodique qui correspond à l'oxydation des atomes métalliques, c'est-à-dire dans le cas du fer :



En milieu acide, la réaction cathodique correspond à :



I-7. Protection contre la corrosion

La lutte contre la corrosion est une préoccupation constante dans beaucoup de domaines industriels, elle doit être prise en considération depuis le début d'un projet et jusqu'à sa réalisation, il s'agit de garantir une certaine durée de vie à un objet pour un minimum de charges. Différentes mesures sont prises pour protéger les matériaux métalliques

contre l'action destructive par corrosion des milieux acides. La protection la plus fiable immédiate est la prévention à la corrosion par le choix des métaux ou alliages résistants aux milieux agressifs. La protection contre la corrosion doit être considérée, dès la phase de conception d'une installation, pour éviter de nombreux problèmes et garantir une certaine durée de vie. La solution adoptée doit être compatible avec les prescriptions concernant la protection de l'environnement et permettre le recyclage ou l'élimination des différents composants à la fin de leur utilisation. Il existe plusieurs techniques de protection:

1- Mesures préventives

- a- Prévention par un choix judicieux des matériaux « utilisation des métaux nobles »
- b- Prévention par une forme adaptée des pièces

2- Moyens de protection contre la corrosion

- c- Protection par revêtements (métallique organique et inorganique)
- d- Protection par inhibition
- e- Protection électrochimique cathodique et anodique [24,25,11].

II- Inhibiteurs de corrosion

II-1. Historique

Tout comme pour bien d'autres domaines, il est difficile de déterminer l'origine exacte de l'inhibition considérée comme une technologie à part. L'idée d'inhiber est très ancienne et remonte au Moyen-âge : les maîtres armuriers ajoutaient de la farine ou de la levure pour éviter la fragilisation des armes lors d'un décapage acide. Néanmoins, il y a quelques décennies, il a été observé que le dépôt calcaire formé à l'intérieur des conduites transportant certaines eaux naturelles protège cette conduite. Plutôt que d'améliorer sans cesse la résistance à la corrosion des conduites, en agissant directement sur ces dernières, il s'avère plus pratique d'ajuster les concentrations minérales des solutions transportées, qui sont à l'origine de ces dépôts calcaires « protecteurs ».

En 1945, on comptait moins de 30 papiers traitant de l'inhibition. Dans un article de 1948, Waldrip se référait à un rapport datant de 1943 au sujet de sa discussion concernant la protection contre la corrosion des puits de pétrole. De nombreux articles concernant l'inhibition ont été rédigés durant la période couvrant 1945 à 1954 : ceux-ci traitaient entre autres de l'inhibition dans les domaines de l'aviation, des chaudières, des circuits de

refroidissement, des moteurs diesel, des sels de déneigement, des raffineries de pétrole, des pétroliers.... Les articles publiés durant cette période témoignent d'un grand développement technologique en matière d'inhibition. Durant les quarante dernières années, un nombre croissant de résumés, d'articles et autres ouvrages évoquant ce sujet a été recensé : au total, en 1970, 647 articles traitant de l'inhibition sont dénombrés^[26,27].

II-2. Définition

Le mot «inhiber» est dérivé du latin inhibere qui signifie arrêté, retenir. Le mot «inhibition» est employé en chimie et en corrosion depuis 1907.

Conformément à la définition donnée par la National Association of Corrosion Engineers (NACE) «un inhibiteur c'est une substance qui retarde la corrosion lorsqu'elle est ajoutée à un environnement en faible concentration».

Les inhibiteurs de corrosion sont l'une des méthodes de protection anticorrosion les plus pratiques et les plus rentables. Ils sont largement utilisés pour protéger les métaux et les alliages contre les effets d'environnements corrosifs. Les inhibiteurs de corrosion peuvent être organiques ou de nature inorganique et sont classés selon le mode d'utilisation et la spécificité de l'effet inhibiteur.^[1,28,29]

II-3. Propriétés d'inhibiteur

Pour beaucoup d'objets, la stratégie d'application d'un inhibiteur de corrosion est très intéressante. Ce type de composé ajouté à des faibles concentrations au milieu corrosif ralentit ou stoppe le processus de corrosion d'un métal. D'une manière générale, une formulation d'inhibiteurs doit:

- abaisser la vitesse de corrosion d'un métal,
- être stable en présence des autres constituants du milieu,
- être stable aux températures d'utilisation,
- être efficace à faible concentration,
- être compatible avec les normes de non-toxicité,
- être peu onéreux ^[30].

II-4. Classification des inhibiteurs de corrosion

Il existe plusieurs possibilités de classement des inhibiteurs, celles-ci se distinguant les unes des autres de diverses manières :

- Soit à partir de la nature des produits (inhibiteurs organiques ou minéraux) ;
- Soit à partir de leur mécanisme d'action électrochimique (inhibiteurs cathodiques, anodiques ou mixtes) ;
- Soit à partir de leurs mécanismes réactionnel mis en jeu (adsorption, passivation, précipitation et élimination de l'agent corrosif)
- Soit à partir du domaine d'application^[31,32].

II-4-1.Selon la nature de produit chimique

1. Les inhibiteurs organiques

Les inhibiteurs organiques sont généralement utilisés en milieu acide ; cependant, en raison de leur écotoxicité, ils sont de plus en plus utilisés en milieu neutre/alcalin.

Les inhibiteurs organiques sont généralement constitués de sous-produits de l'industrie pétrolière. Ils comportent une partie non polaire, hydrophobe, constituée d'une ou plusieurs chaînes hydrocarbonées et une partie polaire, hydrophile, constituée d'un ou plusieurs groupes fonctionnels : amine (-NH₂), hydroxyle (-OH), mercapto (-SH), phosphonate (-PO₃H₂), sulfonate (-SO₃H), carboxyle (-COOH) et leurs dérivés (les groupes fonctionnels usuels, permettant de se fixer sur la surface du métal). Nous distinguons deux catégories de ce type d'inhibiteurs, les composés synthétiques, dont la plus part sont coûteux et toxiques vis à vis des êtres humains et de l'environnement, et les composés issus de sources naturelles comme les extraits et huiles de plantes, biodégradables, moins chers et qui n'ont aucun effet nocif sur l'environnement ^[32,33].

2. Les inhibiteurs inorganiques

D'une manière générale, les inhibiteurs inorganiques sont utilisés dans des milieux alcalins ou neutres. Ils peuvent être passivant ou non passivant, selon la quantité d'oxygène dissous dans le milieu corrosif ^[34].

3. Les inhibiteurs minéraux

Les molécules minérales sont utilisées le plus souvent en milieu proche de la neutralité, voir en milieu alcalin, et plus rarement en milieu acide. Les produits se dissocient en solution et ce sont leurs produits de dissociation qui assurent les phénomènes d'inhibition (anions ou cations). Les principaux anions inhibiteurs sont les oxo-anions de type XO₄ⁿ⁻ tels les chromates, molybdates, phosphates, silicates,... Les cations sont essentiellement Ca²⁺ et

Zn^{2+} et ceux qui forment des sels insolubles avec certains anions tels que l'hydroxyle OH^- . Le nombre de molécules en usage à l'heure actuelle va en se restreignant, car la plupart des produits efficaces présentent un côté néfaste pour l'environnement. Cependant, de nouveaux complexes organiques de chrome (III) et d'autres cations (Zn^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Sr^{2+} , Al^{2+} , Zr^{2+} , Fe^{2+} ...) efficaces contre la corrosion et non toxiques ont été développés [10,14].

II-4-2.Selon leur mécanisme d'action chimique

On différencie trois types d'inhibiteurs, selon leur influence sur la vitesse des réactions électrochimiques partielles: cathodiques et anodiques et mixtes :

1. Les inhibiteurs anodiques

Ces inhibiteurs diminuent la densité du courant partiel anodique et déplacent le potentiel de corrosion dans le sens positif, ralentit la réaction d'oxydation (siège de l'oxydation du métal), ils sont très nombreux. Ce sont des substances inorganiques comme les orthophosphates, les silicates et les chromates [1,31,25].

2. Les inhibiteurs cathodiques

Ces inhibiteurs réduisent la réaction cathodique en empêchant l'oxygène d'atteindre la surface à protéger et déplacent le potentiel de corrosion dans le sens négatif, ralentit la réaction de réduction (siège de la réduction de l'oxygène dissous en milieu aéré ou siège de la réduction du proton H^+ en milieu acide). Ce sont généralement des cations qui peuvent migrer vers la surface cathodique, où ils précipitent sous formes de sels basiques ou d'hydroxydes, formant des films adhérents et compacts. Les inhibiteurs cathodiques incluent des combinaisons de zinc, de nickel, de magnésium, des phosphates alcalins, des combinaisons d'arsenic [1,31,25].

3. Les inhibiteurs mixtes

Ils agissent à la fois sur l'anode et la cathode, par la combinaison d'agent oxydant (les nitrates ou les chromates) et non oxydant qui précipitent tels que les orthophosphates ou les silicates. Quelle que soit la réaction électrochimique contrôlant la corrosion, un inhibiteur cathodique n'est jamais dangereux, même en grande quantité. En revanche, dans le cas de contrôle de corrosion par la réaction anodique (cas le plus général), une quantité très faible d'inhibiteurs anodiques favorise la corrosion par piqûres [34].

II-4-3.Selon leur mécanisme réactionnel

1. Inhibition par passivation

Les inhibiteurs agissant par passivation sont en général les inhibiteurs minéraux. Ils provoquent la passivation spontanée du métal en renforçant la couche d'oxyde formée naturellement sur la surface du métal. Ils se réduisent sur les pores de la couche 16 d'oxyde/hydroxyde plus ou moins protectrice qui se forme naturellement sur la surface du métal. L'ion chromate est un des inhibiteurs passivant par excellence mais son caractère cancérigène et sa forte toxicité réduisent notablement son utilisation.

Il existe deux catégories d'inhibiteurs passivant:

- a- Les ions oxydants comme CrO_4^{2-} qui peuvent passiver l'acier en absence d'oxygène,
- b- Les ions non oxydants (MoO_4^{2-} , WO_4^{2-} , PO_4^{3-} , $\text{B}_4\text{O}_7^{2-}$) qui nécessitent la présence d'oxygène et déplacent la réaction cathodique de réduction de ce dernier en favorisant son adsorption à la surface du métal [35,25].

2. Inhibition par adsorption

Entre l'espèce adsorbée et la surface métallique existent deux types de liaisons: liaison électrostatique et liaison chimique, donc deux types distincts d'adsorption: la physisorption et la chimisorption. Ces deux types d'adsorption sont influencés par la nature et la charge du métal, la structure chimique du produit organique et le type d'électrolyte^[29].

3. Inhibition par précipitation

Les inhibiteurs agissant par précipitation provoquent la formation d'un film superficiel constitué de sels minéraux ou de complexes organiques peu solubles formés lors de la précipitation des produits de réaction cathodique tout en bloquant la dissolution anodique. Il s'agit généralement de sels d'acide faible et de base forte comme les borates, les silicates, les phosphates, les polyphosphates et les sels de zinc [36].

4. Inhibition par élimination de l'agent corrosif

L'inhibition par l'élimination de l'agent corrosif n'est applicable que dans des systèmes fermés. Elle se pratique notamment dans les circuits d'eau chaude fermés des centrales thermiques. Une faible quantité de sulfite de sodium (Na_2SO_3) ou d'hydrazine (N_2H_4) ajoutée à l'eau préalablement dégazée et déionisée, supprime les dernières traces d'oxygène et élimine ainsi la corrosion [37].

II-4-4. Selon leur domaine d'application

- 1- inhibiteurs pour milieux aqueux : traitements des eaux (eaux sanitaires, eaux de

procédés industriels, eaux de chaudières) ;

- 2- inhibiteurs pour milieux acides : l'industrie du pétrole, forage, extraction, raffinage, stockage et transport ; la protection temporaire des métaux, que ce soit pendant le décapage acide, le nettoyage des installations ou le stockage à l'atmosphère ;
- 3- inhibiteurs pour milieux organiques : ils sont utilisés dans les lubrifiants pour moteur et dans l'essence, ces liquides contiennent des traces d'eau et des espèces ioniques qui peuvent provoquer une corrosion ;
- 4- inhibiteurs pour les peintures : l'industrie des peintures sur métaux où les inhibiteurs sont des additifs assurant la protection anticorrosion des métaux [24].

II-5. Différent entre l'adsorption physique et chimique

L'adsorption est un phénomène par lequel des molécules d'une phase fluide sont fixes par la surface d'un solide à son contact. Ce phénomène est particulièrement marqué pour les solides de grande aire spécifique. On distingue deux types d'adsorption :

- 1- **l'adsorption physique (physisorption)** : qui est due à des forces électrostatiques entre le soluté et la surface solide. Elle met en jeu des énergies faibles. Ce type d'adsorption est réversible et exothermique. L'adsorption physique est rapide et fait intervenir des forces intermoléculaires relativement faibles qui agissent entre deux particules voisines. Contrairement à la chimisorption, la physisorption est un phénomène non spécifique donnant lieu à la formation de multicouches : la première couche est due aux interactions adsorbat/adsorbant alors que les suivantes concernent les interactions adsorbat/adsorbat.
- 2- **l'adsorption chimique (chimisorption)** : qui met en jeu des liaisons chimiques covalentes ou de type hydrogène entre l'adsorbat et l'adsorbant. Contrairement à l'adsorption physique la chimisorption est irréversible puisque les énergies mises en jeu sont importantes. Ce type d'adsorption se développe à haute température et met en jeu une énergie de transformation élevée^[38,39,40].

Tableau I.2 : Différences principales entre les deux types d'adsorption^[41].

Propriétés	Adsorption physique	Adsorption chimique

Type de liaison	Liaison de Van Der Waals	Liaison chimique
Chaleur d'adsorption	≤ 84 KJ/mole	> 84 KJ/mole
Individualité des Molécules	L'individualité des molécules est conservée	Destruction de l'individualité des molécules
Désorption	Facile	Difficile
Cinétique	Rapide	Lente
Type de formation	Formation en multicouche et monocouche	Formation en monocouche

II-6. Inhibition de la corrosion en milieu acide

Dans ce type de milieu, la surface de nombreux métaux peut être considérée comme exempte de toute couche protectrice (oxyde, hydroxyde). Cependant, il ne faut pas oublier qu'elle peut être recouverte plus ou moins uniformément d'hydrogène atomique adsorbé, et, au cours du temps, de couches de produits de corrosion insolubles dans le milieu acide considéré. Parmi les inhibiteurs pour solutions acides, on trouve un grand nombre de substances organiques différentes, notamment des molécules aromatiques et des macromolécules à chaînes linéaires ou branchées. Ils s'adsorbent à la surface du métal et ralentissent ainsi la corrosion. Leur efficacité dépend, entre autres, de leur structure moléculaire et de leur concentration.

Les molécules organiques utilisées comme inhibiteurs contiennent une partie non polaire, hydrophobe et relativement volumineuse, constituée principalement d'atomes de carbone et d'hydrogène, et une partie polaire, hydrophile, constituée d'un ou plusieurs groupes fonctionnels, tels $-\text{NH}_2$ (amine), $-\text{SH}$ (mercapto), $-\text{OH}$ (hydroxyle), $-\text{COOH}$ (carboxyle), $-\text{PO}_3$ (phosphate) et leurs dérivés. La molécule se lie à la surface par son groupe fonctionnel, alors que sa partie non polaire, plus volumineuse, bloque partiellement la surface active. Ce phénomène ne se limite d'ailleurs pas aux solutions acides, il s'applique à tous les inhibiteurs organiques^[35,32].

II-7. Les inhibiteurs verts

Les recherches menées sur les inhibiteurs de corrosion des métaux à partir d'extraits

de plantes sont aujourd'hui plus nombreuses. Leur objectif est le remplacement des inhibiteurs actuels souvent toxiques condamnés par la directive REACH (Registration, Evaluation, Authorization and restriction of CHemicals) par des extraits des plantes. Les plantes représentent une source incroyablement riche en composés d'intérêt n'ayant pas d'impact négatif sur l'environnement. Elles apparaissent comme une ressource peu chère et renouvelable^[42].

Les produits naturels sont une bonne source d'inhibiteurs de corrosion écologiques et ne contiennent pas des métaux lourds ou autres molécules toxiques, et sont relativement moins chers, la plupart de leurs extraits contenant les éléments nécessaires tels que O, C, N et S, qui sont actifs dans les composés organiques, facilitant l'adsorption de ces composés sur des métaux ou des alliages pour former un film qui protège la surface et empêche la corrosion. Le développement de la chimie verte et des technologies de la chimie verte offre de nouvelles méthodes de synthèse différentes substances (polymère, extrait de plante, acide aminé, liquide ionique...), considérées comme de nouveaux inhibiteurs de corrosion.

Toutefois, la biodégradabilité des extraits naturels limite le stockage et l'utilisation en tant qu'inhibiteurs de corrosion à long terme. Cependant, il est proposé que la décomposition d'extrait de plantes par des microorganismes peut être évitée par l'ajout de biocides tels que le sodium dodecyl sulfate et le N-Cetyl-N,N,N-triméthylammonium bromide^[43,44].

III- Les méthodes d'évaluation de la corrosion

L'interface métal-solution est un système complexe, chaque méthode de la détermination de la vitesse de corrosion conduira donc à une approche différente de cette grandeur, suivant la nature des hypothèses sur lesquelles est fondée la technique utilisée. Les méthodes les plus courantes sont : la gravimétrie qui est une méthode très ancienne de mesure directe, les méthodes électrochimiques stationnaires (courbe de polarisation) et les méthodes électrochimiques transitoires parmi lesquelles les mesures d'impédances électrochimiques^[14].

III-1. La gravimétrie

Cette méthode présente l'avantage d'être d'une mise en œuvre très simple et très utilisée dans l'industrie chimique de ne pas nécessiter un appareillage important, mais ne permet pas l'approche des mécanismes mis en jeu lors de la corrosion. Elle consiste à plonger dans l'agent corrosif une plaque du métal étudié. Le poids et la surface en sont exactement

déterminés; après un temps donné, la plaque est retirée du contact avec l'agent corrosif, lavée, séchée et pesée.

$$V_{corr} = \Delta m / S \cdot t$$

V_{corr} : peut être exprimé en $\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$

Δm : Perte de masse exprimée en mg

S : Surface de l'échantillon exposé en cm^2

t : Temps d'immersion en heure

L'efficacité inhibitrice est mesurée par la relation suivante :

$$EI\% = V_{corr} - V_{corrinh} / V_{corr}$$

Avec V_{corr} et $V_{corrinh}$ sont les vitesses de corrosion de l'échantillon après immersion dans la solution respectivement sans et avec inhibiteur^[27, 45].

III-2. Méthode électrochimique

Les méthodes électrochimiques sont classées en deux catégories :

- Les méthodes stationnaires;
- Les méthodes non stationnaires (transitoires).

III-2-1. Méthode stationnaire: courbes de polarisation

La courbe de polarisation de l'interface métal-solution est une caractéristique fondamentale de la cinétique électrochimique, mais ne rend compte que de l'étape la plus lente du processus global à l'interface électrochimique. Pour déterminer une courbe de polarisation potentiostatique, on applique, à l'aide d'un potentiostat, différents potentiels entre l'électrode de travail et une électrode de référence. On mesure le courant stationnaire qui s'établit après un certain temps dans le circuit électrique entre cette électrode de travail et une contre-électrode.

Cette méthode permet de déterminer d'une façon précise les paramètres électrochimiques d'un métal au contact d'un électrolyte à savoir: la vitesse instantanée de corrosion (I_{corr}), le potentiel de corrosion (E_{corr}), les pentes de Tafel, la résistance de polarisation (R_p), les courants limites de diffusion.

Elle donne des mesures rapides et sa mise en œuvre est relativement simple. La détermination de la vitesse de corrosion à partir des courbes de polarisation est étroitement liée à la cinétique régissant le processus électrochimique, on distingue trois principaux types

de cinétique:

- Cinétique de transfert de charge (activation),
- Cinétique mixte de transfert de charge - diffusion,
- Cinétique de diffusion.

Pour déterminer expérimentalement ces paramètres électrochimiques, une présentation logarithmique de la densité de courant est en général préférable, car elle met en évidence la relation linéaire entre le logarithme de la densité de courant et le potentiel (figure I-11)

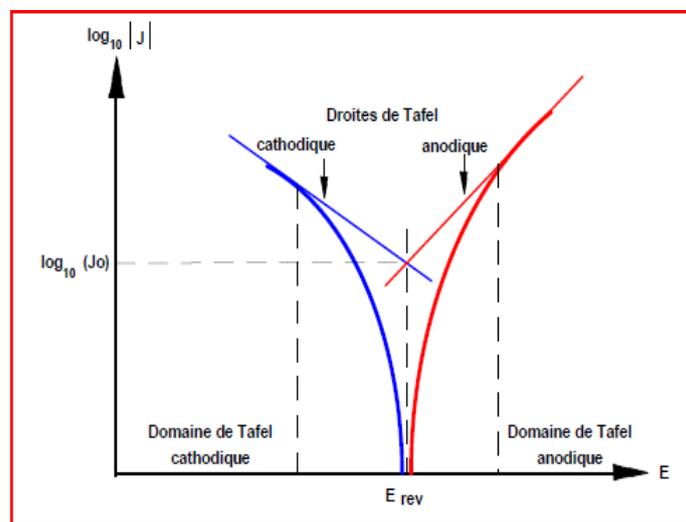


Figure I-11: Détermination des paramètres électrochimiques à partir des droites de Tafel [46].

Le tracé permet de confirmer les indications données par l'évolution du potentiel de corrosion et les préciser en distinguant l'influence de l'inhibiteur sur chacune des réactions élémentaires, anodique et cathodique, à l'électrode.

Ces méthodes stationnaires restent toutefois insuffisantes pour caractériser des mécanismes complexes, mettant en jeu plusieurs étapes réactionnelles et ayant des cinétiques caractéristiques différentes (ce qui est le cas lors des processus d'inhibition). L'utilisation des techniques transitoires devient alors indispensable [46].

III-2-2.Méthode transitoire: la spectroscopie d'impédance électrochimique(SIE)

Les méthodes non stationnaires peuvent être classées en deux catégories à savoir: les méthodes de perturbation de grande amplitude (voltamétrie cyclique) et la méthode de faible amplitude (impédancemétrie électrochimique). Des travaux antérieurs ont montré que la spectroscopie d'impédance électrochimique (S.I.E.) est susceptible d'identifier les étapes

élémentaires intervenant dans le processus global se déroulant à l'interface métal / solution, sous forme de diverses constantes de temps. La S.I.E. est employée aujourd'hui dans les domaines suivants:

- la photoélectrochimie,
- l'interface semi-conducteur / électrolyte,
- l'électrochimie organique et l'étude des phénomènes d'adsorption,
- la bio électrochimie,
- la corrosion et son inhibition

La méthode d'impédancemétrie consiste à mesurer la réponse de l'électrode face à une modulation sinusoïdale de faible amplitude du potentiel en fonction de la fréquence. On peut superposer une telle modulation à un potentiel anodique ou cathodique imposé au potentiel de corrosion. Une alternative consiste à moduler le courant et mesurer le potentiel. On appelle parfois spectroscopie d'impédance les mesures d'impédance présentées en fonction de la fréquence de modulation. L'analyse de la réponse du système conduit à disséquer les étapes élémentaires intervenant dans le processus électrochimique global.

Dans le domaine de la corrosion, la S.I.E. présente plusieurs avantages. Elle permet la détermination précise de la vitesse de corrosion même dans le cas où le métal est recouvert d'une couche protectrice. La S.I.E. permet aussi l'évaluation du taux d'inhibition, la caractérisation des différents phénomènes de corrosion (dissolution, passivation, piqûration,...) et l'étude des mécanismes réactionnels à l'interface électrochimique [18].

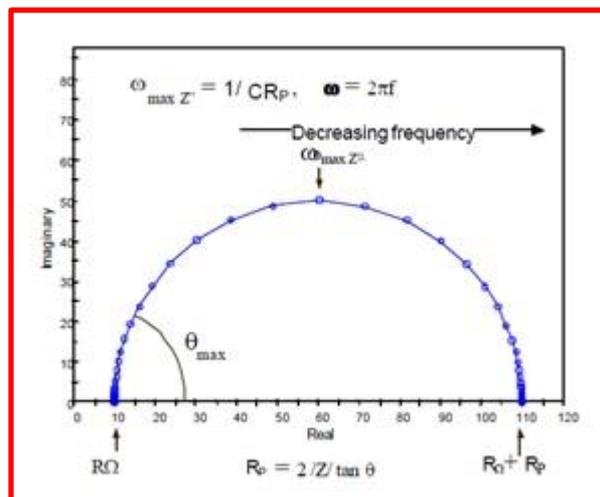


Figure I-12: Spectroscopie d'impédance électrochimique

CHAPITRE II

CHAPITRE II

Matière Végétale



I- Présentation des plantes étudiées

I-1. Famille des Astéracées

Les Asteraceae (anciennement appelées Compositae) sont une famille cosmopolite comprenant plus de 1 500 genres et plus de 25 000 espèces décrites dont 750 endémiques (suivant les sources), distribuées principalement dans les zones tempérées du globe. C'est l'une des familles les plus importantes des angiospermes, la seconde en importance derrière celle des Orchidaceae^[47].

La famille Asteraceae est parmi les familles les plus représentatives en nombre d'espèces, elle renferme plus de 30 espèces. Les feuilles sont le plus souvent alternées, mais aussi opposées ou radiales, simples exstipulées. Les fleurs sont généralement dissemblables dans un même capitule, celles du centre ayant à la fois étamines et pistil tandis que celles de la périphérie sont ordinairement et uniquement femelle. Les fruits sont des achènes, c'est-à-dire des fruits secs, indéhiscent et contenant chacun une seule graine^[48].

I-2. Classification botanique des plantes étudiées

Tableau II-1 : Classification botanique des plantes étudiées^[49,50].

	Anvillea radiata	Artemisia campestris
Règne	Plantae	Plantae
Embranchement	Spermaphytes	Spermaphytes
Classe	Eudicots	Magnoliopsida
Ordre	Astérales	Astérales
Famille	Asteraceae	Asteraceae
Genre	Anvillea	Artemisia
Espèce	Radiata	Campestris
Nom scientifique	Anvillea radiata	Artemisia campestris L
Nomenclature vernaculaire	Negd (N)	Dgouft (D)

I-3. Anvillea radiata

I-3-1. Description botanique

La plante utilisée dans ce travail est *Anvillea radiata*. C'est un arbuste très rameaux de 20-50 cm. Les tiges et les rameaux sont ligneux à la base, les feuilles sont en triangle allongé, atténuées à la base en pétiole alors que le limbe est fortement denté. Le capitule est grand, de 4 à 5 cm de diamètre, y compris les longues ligules, entouré de feuilles supérieures rayonnantes qui passent progressivement aux bractées coriaces. Les fleurs sont toutes jaune-orangé. Les paillettes du réceptacle ont tronquées au sommet et prolongées en une soie. Les achaines sont prismatiques, ceux de la périphérie à trois angles, ceux du centre à quatre angles^[51] (figure II-1).



Figure II-1 : La plante de *Anvillea radiata*

I-3-2. Répartition géographique

Est une plante arbuste très rameux, endémique du Sud-ouest Algérien et Sud-est Marocain. Cette espèce accepte une large variété d'états de sol et se développe sur les sols caillouteux des oueds, sur les regs environnants (plateaux rocheux répandu avec de petits cailloux) et dans les dayas. Elle prospère en conditions climatiques graves à moins de 100 millimètres de précipitations par année^[48].

I-3-3. Composition chimique

Sur le plan composition chimique, peu d'étude ont été réalisées sur cette plante. Dans ce sens ont montré que cette plante est un réservoir riche en phytoconstituants tels que les Alcaloïdes, saponins, Terpènes, Tanins, Flavonoïdes, Steroïdes et les Cardenolides. De même 13 flavonoïdes dont 4 aglycones et 9 flavonoïde glycosides ont été isolés^[48].

I-3-4. Utilisation traditionnelle

Anvillea radiata est une parmi les espèces les plus utilisées traditionnellement dans le traitement des différentes maladies. En Algérie, cette espèce est utilisée pour guérir les maladies de l'estomac, du foie et le diabète et les troubles dermatologiques, l'hypertension artérielle, les maladies gastro-intestinales, l'insomnie et certains types d'infections.

Cette plante est citée biologiquement très active, en fait, plusieurs activités sont attribuées à savoir antibactérienne, cytotoxique, anti tumoral, antifongique et anticancéreuse^[52,51].

I-4. *Artemisiacampestris*

I-4-1. Description botanique

*Artemisia campestris*L est un sous-arbrisseau vivace, que mon atteindre 30-150cm de hauteur, avec des tiges ramifiées et ascendantes qui d'une forme panicale, il est généralement brunâtre rouge et glabre, et acquiert une forme lignifiée dans la partie inférieure et un en haut.

Les feuilles sont vertes, sereines lorsqu'elles sont jeunes, souvent glabres à maturité les feuilles basales sont 2-3 pétiolées ou même auriculées, les parties supérieures sont les plus simples. La plante a une inflorescence composée : le capitulum, ovoïde et hétérogame, contenant 8 à 12 fleurs, organisées sur un réceptacle convexe et glabre, et entouré de bractées glabres involucrales organisées en plusieurs rangs. Les fleurs du rayon sont femelles « pistillées et fertiles, tandis que les fleurs en disque sont stériles et fonctionnellement mâles avec des ovaires avortés réduits. Les fleurs mâles sont tubulaires, jaunâtres, dépourvues de calice, de pétales fuselés et d'étamines 5 fusées « avec la présence de sacs sécrétoires sur les lobes de la corolle des fleurs du disque Le fruit est un akène ovoïde dépourvu de Pappus^[50] (figure II-2).



Figure II-2 : La plante de Artemisia campestris**I-4-2. Répartition géographique**

Espèce distribuée dans l'hémisphère nord, en particulier sur la cote méditerranéenne de l'Europe, sud-ouest de l'Asie et de l'Afrique, certaines en Afrique du Sud et dans l'Ouest de l'Amérique du Sud et les hauts plateaux, plus rares dans la région présaharienne, manque au Sahara septentrional, apparaît dans les montagnes du Sahara central [53].

I-4-3. Composition chimique

L'utilisation des solvants à polarité différente, suivie par des étapes de fractionnements et l'emploi de différentes techniques de chromatographie permettent d'extraire, séparer et identifier les différents composés présents dans les extraits de plantes.

Il a été rapporté que le genre *Artemisia* est riche en métabolites secondaires tels que les flavonoïdes, les acides cafféoylquinic, les coumarines, les huiles essentielles, les stérols et les acétylènes [54,50].

I-4-4. Utilisation traditionnelle

Artemisia campestris est largement utilisée en médecine traditionnelle grâce à ses propriétés bactéricides, antifongiques, antiinflammatoires, antihelminthiques, antivenins et analgésiques.

La partie aérienne d'*Artemisia campestris* possède des activités antioxydantes significatives. En effet cette plante est riche en composés doués d'activité antioxydante tels que: les flavonoïdes, les polyphénols et les tanins, ces différents constituants exercent ses actions antioxydantes en inhibant la production de l'anion superoxyde, l'hydroxyle, comme ils inhibent la peroxydation lipidique au niveau des microsomes [55,56].

II- Etude phytochimique

Dans le métabolisme de la plante, on différencie les métabolites primaires des métabolites secondaires. Les métabolites primaires regroupent les molécules synthétisées par l'organisme qui jouent un rôle direct dans les fonctions vitales comme la nutrition, la croissance et la reproduction. Constitués d'atomes tels que le carbone, l'oxygène et l'azote, les métabolites primaires sont classés en quatre grandes catégories selon leurs propriétés biochimiques: les glucides, les lipides, les acides aminés et les acides nucléiques. Les métabolites secondaires, quant à eux, jouent plusieurs rôles comme servir de défense pour la

plante ou attirer certaines espèces polinisatrices. Ils permettent également la communication de plantes à plantes [57,58].

II-1. Définition des métabolites secondaires

Le terme de métabolite secondaire a été forgé originellement par défaut, comme étant la classe des composés qui sont présents dans certaines espèces végétales et pas dans d'autres. Par conséquent ils ne peuvent pas être impliqués dans le métabolisme basal en œuvre dans chaque plante. Il est apparu ensuite clairement que ces métabolites secondaires représentent des marqueurs de l'adaptation des végétaux aux différentes conditions écologiques. Les plantes qui évoluent dans un environnement similaire ont subi la même pression de sélection^[58].

Les métabolites secondaires sont des molécules organiques complexes synthétisées et accumulées en petites quantités par les plantes autotrophes. Ce sont des produits à structure chimique souvent complexe, ils sont très dispersés et très différents selon le type d'espèce. Ils pourraient jouer un rôle dans la défense contre les herbivores et dans les relations entre la plante et son environnement^[59].

II-2. Classement des métabolites secondaires

Les métabolites secondaires ne sont pas directement impliqués dans le processus de croissance et de développement, mais remplissent d'autres fonction toutes aussi importantes pour la plante. On distingue classiquement trois grandes catégories de métabolites secondaires chez les végétaux:

- 1- Les composés phénoliques : polyphénols, flavonoïdes, stilbènes.
- 2- Les composés azotés : alcaloïdes, bétalaines, acides aminés non protéinogènes.
- 3- Les terpénoïdes contenues dans les huiles essentielles^[57].

II-2-1. Les composés phénoliques

Le terme « polyphénols » est fréquemment utilisé dans le langage courant et même dans des articles scientifiques ou de vulgarisation pour désigner l'ensemble des composés phénoliques des végétaux. En fait, il devrait être réservé aux seules molécules présentant plusieurs fonctions phénols. Ce qui exclurait alors les monophénols, pourtant abondants et importants chez les végétaux. Donc la désignation générale « composés phénoliques » concerne à la fois les mono, les di et les polyphénols dont les molécules contiennent respectivement une, deux ou plusieurs fonctions phénoliques. Deux principales classes sont

largement répandues. La première comportant les phénols simples tels les acides phénoliques dont les plus connus sont l'acide gallique et l'acide salicylique et les flavonoïdes avec pour chef de file la quercétine. La seconde classe est constituée de phénols sous forme de polymères tels que les tanins condensés et les lignines. Elles sont présentes dans toutes les parties des végétaux (racines, tiges, feuilles, fleurs, pollens, fruits, graines et bois). Ils sont présents aussi dans diverses substances naturelles comme les fruits rouges, le raisin^[60,61,59].

2-2-1-1. Acides phénoliques

Un acide-phénol (ou acide phénolique) est un composé organique possédant au moins une fonction carboxylique et un hydroxyle phénolique. Ils sont représentés par deux sous-classes, les acides hydrox benzoïques et les acides hydrox cinnamiques^[62] (figure II-3).

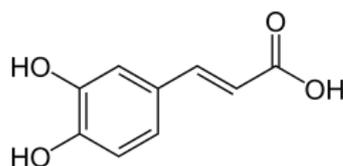


Figure II-3 : Structure chimique d'acide phénolique(acide caféique)

2-2-1-2. Flavonoïdes

C'est le groupe le plus représentatif des composés phénoliques. avec plus de 8000 composés différents et distribués de manière générale, dans les différents tissus des plantes vasculaires comme les fleurs, les fruits, les racines, les tiges et les feuilles où ils jouent un rôle très important comme pigments responsables des colorations jaune, orange, et rouge de différents organes végétaux. À l'état naturel les flavonoïdes se trouvent le plus souvent sous forme d'hétérosides. Ces composés ont une structure de base possède 15 atomes de carbones, constitué de deux noyaux benzéniques A et B reliés par une chaîne en C3 qui est habituellement un hétérocycle oxygéné (cycle C). Elles diffèrent les uns des autres par la position des substitutions sur les noyaux A et B, et la nature de C^[63](figure II-4).

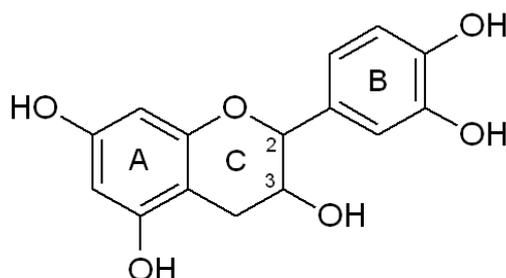


Figure II-4 : Structure de base des flavonoïdes

2-2-1-3. Anthocyanes

Les anthocyanes (en grec Anthos signifie fleur, et kyanos signifie bleu) sont des pigments, principalement sous formes de glycosides stables et hydrosolubles, rouges en milieu acide, virant au bleu-violet en milieu neutre ou faiblement alcalin. Ils sont accumulés dans les vacuoles cellulaires et ils sont responsable des couleurs rouges, violettes et bleues dans les fruits, les légumes, les fleurs et les graines, mais aussi jouent un rôle important dans la physiologie végétale comme attracteurs des insectes et dans la dispersion des graines^[64,65](figure II-5).

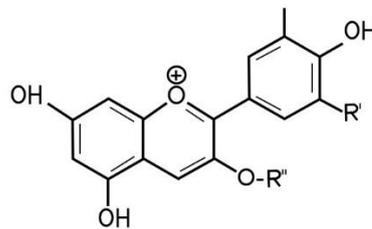


Figure II-5 : Structure générale des anthocyanes

2-2-1-4. Tanins

Ce sont des substances d'origine végétale non azotée, de structure polyphénolique, solubles dans l'eau, l'alcool, l'acétone, peu soluble dans l'éther, Leur masse moléculaire est comprise entre 500 et 3000 PM. Sont répandus, particulièrement, dans les tissus âgés ou d'origine pathologique. Ces composés ayant en commun la propriété de tanner la peau (combinaisons à des macromolécules (Protéines, Polysaccharides...) par des liaisons résistantes aux attaques fongiques et bactériennes). Ils sont utilisés dans le traitement des aliments et la clarification des vins, des bières et des jus de fruits (Propriétés biologiques). Il y a deux types de tanins différents par leur structure aussi bien que par leur origine biogénique; les tanins hydrolysables sont les tanins galliques et tanins ellagiques (les acides sont acide gallique et acide ellagique). Les tanins condensés sont non hydrolysables ou tanins catéchiques^[66,67] (figureII-6).

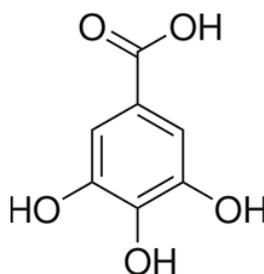


Figure II-6 : Structure des tanins

2-2-1-5. Coumarines

La coumarine est une substance naturelle organique aromatique hétérosidique oxygénée de formule brute $C_9H_6O_2$, connue dans la nomenclature internationale comme

1- benzopyrane-2-one ou 1,2-benzopyron. Les coumarines, de différents types, se trouvent dans de nombreuses espèces végétales et possèdent des propriétés très diverses. Elles se trouvent dans la nature soit à l'état libre ou bien combiné avec des sucres.

Ils sont capables de prévenir la peroxydation des lipides membranaires et de capter les radicaux hydroxyles, superoxydes et peroxydes. Les conditions structurales requises pour l'activité antiperoxydante des coumarines sont similaires à celles signalées pour les flavonoïdes ^[68,69,67](figure II-7).

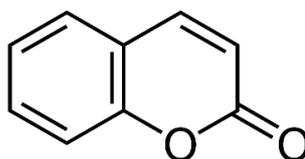


Figure II-7 : Structure de coumarine

2-2-1-6 Saponines

Les saponines sont des métabolites secondaires hétérosidiques caractérisés par leurs propriétés tensio-actives : ils se dissolvent dans l'eau en formant des solutions moussantes, présents dans de nombreuses plantes et quelques organismes marins où ils auraient un rôle de défense contre des agents pathogènes extérieurs comme les champignons, bactéries et autres insectes. Ces hétérosides sont utilisés pendant de nombreuses années comme savon d'où le nom étymologique donné à cette classe de métabolites secondaires (sapo veut dire «savon» en latin).

La plupart des saponosides présentent également des propriétés hémolytiques ichtyotoxiques (toxicité à l'égard des animaux à sang froid, principalement les poissons). Certains saponosides sont des matières premières destinées à l'hémisynthèse de molécules médicamenteuses stéroïdiques. Plusieurs drogues à saponosides sont utilisées par l'industrie pharmaceutique pour l'obtention de formes galéniques, d'autres ont des applications en phytothérapie. L'industrie des cosmétiques exploite notamment leurs propriétés détergentes^[70,71] (figure II-8).

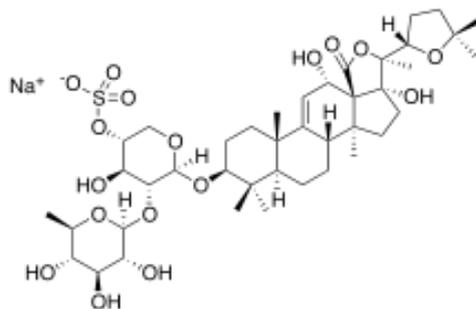


Figure II-8 : Structure de saponines

2-2-2. Alcaloïdes

Les alcaloïdes sont un groupe diversifié de composés à faibles poids moléculaires, sont des molécules organiques hétérocycliques azotées complexes, d'origine naturelle, à caractère basique, présentant généralement une intense activité pharmacologique et trouvés dans environ 20% des espèces végétales.

On trouve des alcaloïdes, en tant que métabolites secondaires, principalement chez les végétaux, les champignons et quelques groupes animaux peu nombreux. Habituellement les alcaloïdes sont des dérivés des acides aminés^[72,73](figure II-9).

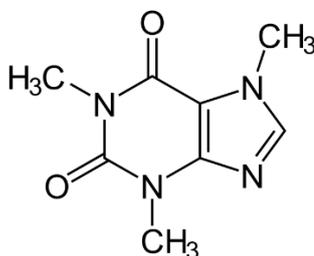


Figure II-9 : Structure alcaloïdes

2-2-3. Les terpènes et les stéroïdes

2-2-3-1. Les terpènes

Les terpènes sont des hydrocarbures naturels, de structure soit cyclique soit à chaîne ouverte: leur formule brute est $(C_5H_8)_n$ dont le x est variable en fonction du degré d'insaturation de la molécule et n peut prendre des valeurs (1-8) sauf dans les polyterpènes qui peut atteindre plus de 100(le caoutchouc). La molécule de base est l'isoprène de formule C_5H_8 .

Le terme terpénoïde désigne un ensemble de substances présentant le squelette des terpènes avec une ou plusieurs fonctions chimiques (alcool, aldéhyde, cétone, acide, lactone,..etc.)^[74] (figure II-10).

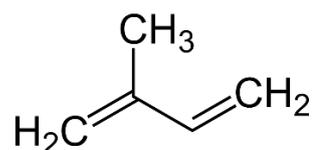


Figure II-10 : Structure de la molécule d'isoprène

2-2-3-2. Les stérols

Les stérols sont dérivés des phytostérols qui sont des composés naturellement présents dans la fraction lipidique des plantes. Ils ne sont pas synthétisés par l'homme et l'animal et ne peuvent être apportés que par l'alimentation. Plusieurs études ont démontré que les phytostérols et les phytostanols réduisent l'absorption du cholestérol dans l'intestin grêle^[72] (figure II-11).

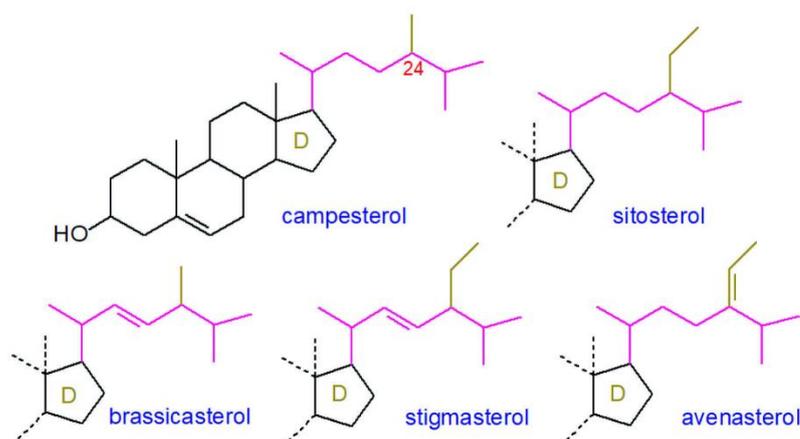


Figure II-11 : Quelques exemples de stéroïdes

III- Les méthodes d'extraction

III-1. Définition

L'homme utilise des colorants, des parfums, des arômes, et des extraits de produits naturels depuis la haute Antiquité. L'extraction est une opération unitaire utilisée pour extraire sélectivement un ou plusieurs composés d'un mélange initial, sur la base de propriétés chimiques ou physiques. L'extraction consiste à transférer un composé d'une phase à une autre:

- D'une phase liquide à une autre phase liquide.
- D'une phase solide à une phase liquide.

L'extraction est une étape très importante dans l'isolement et la récupération des composés d'intérêt. Elle est influencée par plusieurs facteurs notamment la méthode utilisée et la présence de substances interférentes. Deux procédures d'extraction sont généralement utilisées : extraction solide-liquide et extraction liquide-liquide^[70,75].

III-2. Méthode d'extraction

Le choix de la méthode d'extraction est basé sur des données préalables sur les caractéristiques physicochimiques des métabolites à extraire. On distingue de nombreuses méthodes d'extraction (solide-liquide) des composés phytochimiques :

III-2-1. Macération

La macération, connue comme une méthode traditionnelle, a été couramment employée. Cette procédure, malgré les temps longs d'extraction et l'utilisation d'une quantité considérable de solvants, est relativement peu coûteuse. En plus, elle se déroule à température ambiante ce qui est très positif pour conserver l'intégrité des molécules polyphénoliques qui sont sensibles aux changements de température.

La macération se fait en plongeant directement les substances solides dans un liquide. Ces dernières sont en général laissées en suspension pendant un certain temps qui peut aller de quelques heures à quelques jours. La macération est en effet une extraction —à froid, ce qui ne signifie pas qu'elle s'accompagne d'un refroidissement mais tout simplement qu'elle se fait à température ambiante sans bénéficier d'une hausse de température qui accélère la plupart des phénomènes chimiques. A la fin du processus il est nécessaire de retirer du solvant les résidus solides, ils sont en général éliminés par filtration^[76,70] (figure II-12).

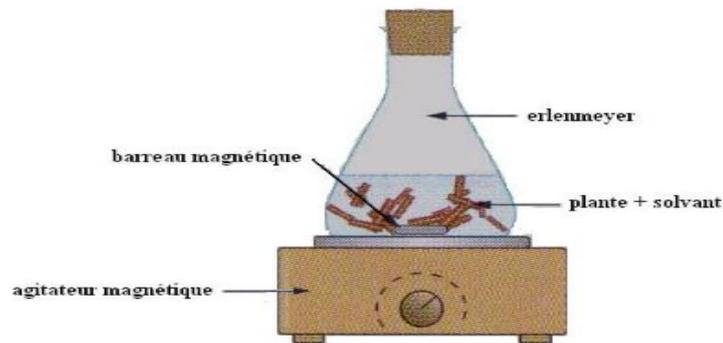


Figure II-12 : Schéma du principe de la technique de Macération

III-2-2.Soxhlet

Le Soxhlet est une méthode classique pour l'extraction solide-liquide car elle favorise l'extraction relativement complète des métabolites présents dans la matrice végétale. Les extractions au Soxhlet ont été effectuées de façon séquentielle, en utilisant des solvants de polarité croissante. Les solvants utilisés étaient le chloroforme (CHCl_3), l'acétate d'éthyle (AcOEt) et le méthanol (MeOH). Cette approche d'extraction permet de fractionner grossièrement les divers produits naturels de la matrice végétale.

Les avantages du Soxhlet sont les suivants : l'échantillon entre rapidement en contact avec une portion fraîche de solvant, ce qui aide à déplacer l'équilibre de transfert vers le solvant. Cette méthode ne nécessite pas de filtration après extraction^[77,78] (figure II-13).

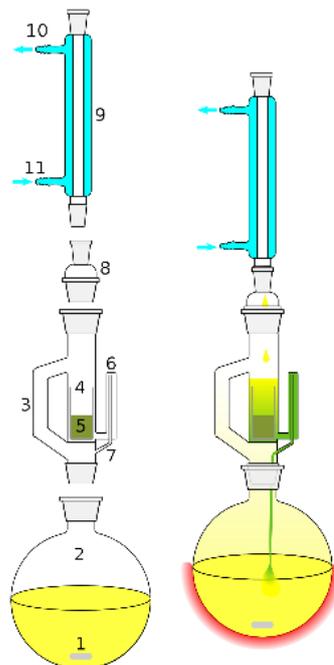


Figure II-13 : Schéma du principe de la technique de Soxhlet

III-2-3. Hydrodistillation

L'hydrodistillation est la méthode standard pour l'extraction de l'huile essentielle à partir de matière végétale. Il s'agit de la méthode la plus simple et de ce fait la plus anciennement utilisée. Le principe de l'hydrodistillation correspond à une distillation hétérogène. Le procédé consiste à immerger la matière première végétale dans un ballon lors d'une extraction au laboratoire ou dans un alambic industriel rempli d'eau placé sur une source de chaleur. Elle est généralement conduite à pression atmosphérique le tout est ensuite porté à l'ébullition. La chaleur permet l'éclatement des cellules végétales et la libération des molécules odorantes qui y sont contenues. Ces molécules aromatiques forment avec la vapeur d'eau, un mélange azéotropique. Les vapeurs sont condensées dans un réfrigérant et les huiles essentielles se séparent de l'eau par différence de densité. Ce procédé présente des inconvénients dus principalement à l'action de la vapeur d'eau ou de l'eau à l'ébullition ; Certains organes végétaux, en particulier les fleurs, sont trop fragiles et ne supportent pas les traitements par entraînement à la vapeur d'eau et par hydrodistillation (HD)^[79,80,81] (figure II-14).

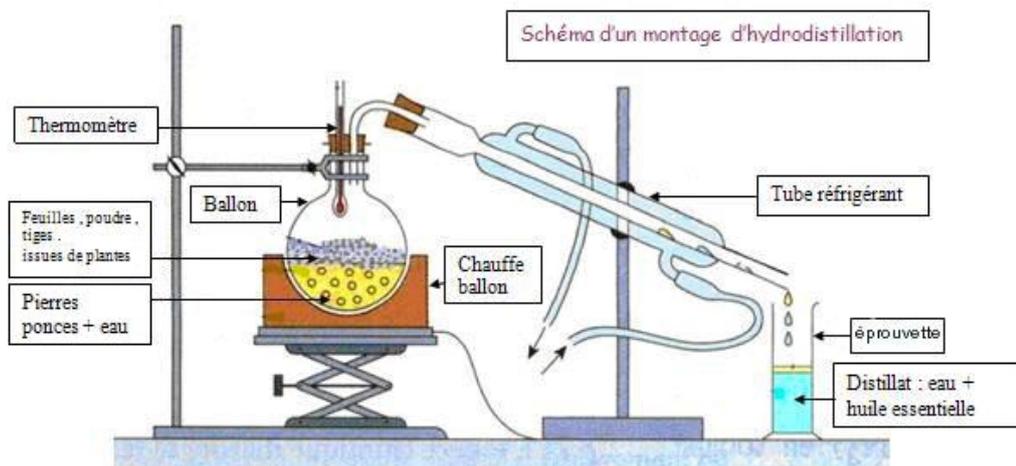
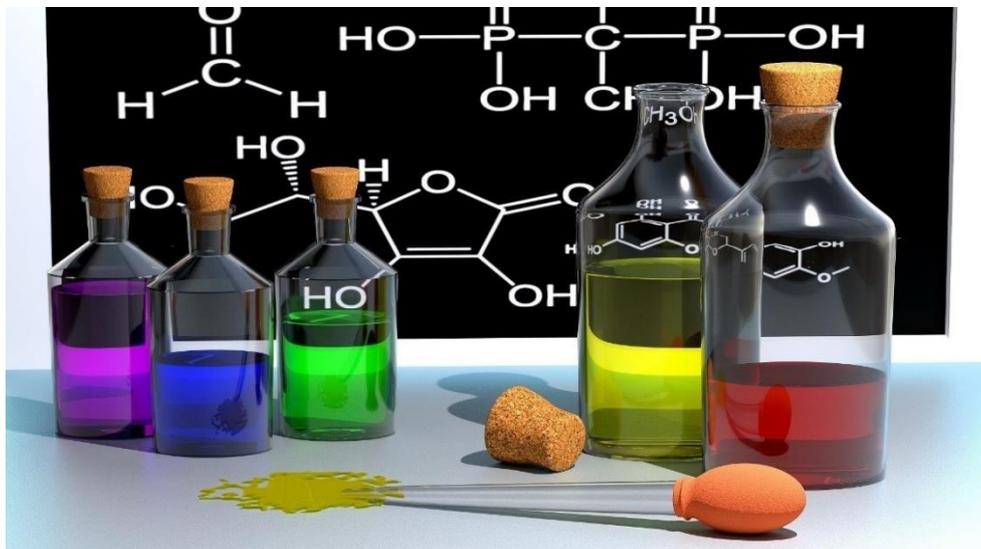


Figure II-14 : Schéma du principe de la technique de Hydrodistillation

Partie Expérimentale

CHAPITRE III

Matériels et Méthodes



I- Criblage phytochimique pour les deux plantes

Le criblage phytochimique est un ensemble des tests effectués sur la poudre. Ces tests nous permettent d'avoir une idée sur la présence ou l'absence de certains métabolites primaires et secondaires chez les deux plantes.

Les groupes phytochimiques sont nombreux, mais on peut citer les principaux : les alcaloïdes, les polyphénols (flavonoïdes, anthocyanes, tannins), les saponosides, les coumarines, les stérols, les terpènes, les huiles essentielles).

Les plantes de notre étude est réparties dans la ville de Oulad Djelal.

I-1. Composition chimique des deux plantes

I-1-1. Test des alcaloïdes

5 g de la plante séchée et broyée sont mélangés avec 50 ml d'HCl à 1% dans un récipient. Après une demi-heure de macération, on filtre le mélange, on additionne au filtrat quelques gouttes de réactifs de Mayer (5 g de KI dissous dans 20 ml d'eau distillée additionnée à 13.5 g de Hg Cl₂ dissous dans 20 ml d'eau distillée puis on complète avec de l'eau distillée jusqu'à 1l).

- L'apparition d'un précipité blanc jaunâtre indique la présence des alcaloïdes



Photo III-1: Détection des alcaloïdes

I-1-2. Test des flavonoïdes

10 g de plante sont macérés dans 150 ml d'HCl à 1% pendant 24 heures. Après avoir filtré le mélange, on prend un aliquote de 10 ml du filtrat, auquel on rajoute quelques gouttes de NH₄OH (rendre basique).

- L'apparition d'une couleur jaune claire dans la partie supérieure du tube à essai indique la présence des flavonoïdes.

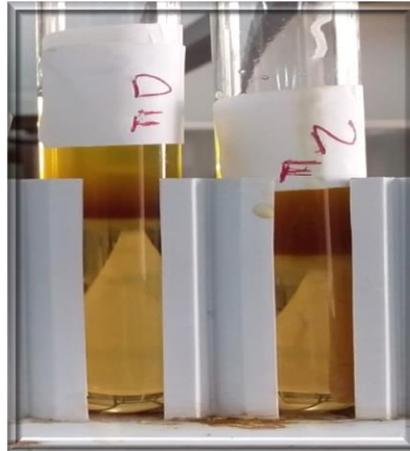


Photo III-2:Détection des flavonoïdes

I-1-3. Test des tanins

Prendre 5g de la poudre, l'extraction avec 20 ml de l'alcool éthylique C_2H_5OH , sous agitation pendant 15 min on suite on filtre. Puis tester le filtrat avec quelques gouttes de $FeCl_3$. L'apparition de la couleur verte indique la présence de tanins.

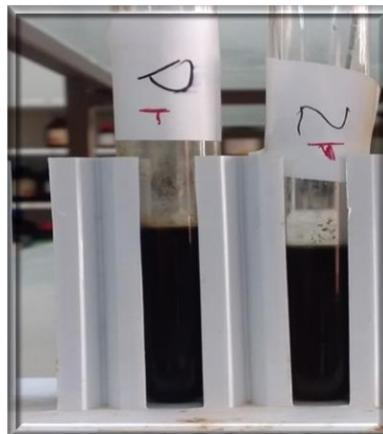


Photo III-3:Détection des tanins

I-1-4. Test des saponosides

Une masse de 2g de la poudre végétale a été chauffée dans 80ml d'eau distillée jusqu'à l'ébullition, après refroidissement, on filtre le mélange et on dans un tube à essai, on agite le tube dans le sens de la longueur.

- L'apparition de mousses stables après 15 min indique la présence des saponines.



Photo III-4:Détection des saponosides

I-1-5. Test des stérols non saturés et terpènes

Une masse de 5g de la poudre, a été macérée dans un 20ml de chloroforme. Après filtration et on ajoute au filtrat 1 ml d'acide sulfurique concentré (H_2SO_4), avec précaution sur les parois du tube à essai. Le point de rencontre entre les deux phases.

- L'apparition d'un couleur violé ou marron qui vire vers le gris, indique la présence des stérols non saturés et des terpènes.



Photo III-5:Détection des stérols non saturés et terpènes

I-1-6. Test des anthocyanes

1g de poudre sèche est macéré dans 10ml d'eau distillé, on porte au bouillant pendant 15min, on suite on filtre, ajouter quelque gouttes de HCl et de NH_4OH ,

- Le changement de couleur indique la présence des anthocyanes.

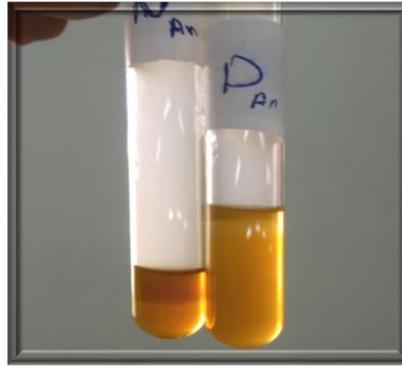


Photo III-6:Détection des anthocyanes

I-1-7. Test des leuco anthocyanes

D'abord on met 1g de poudre dans 5 ml de propanol, en suite on ajoute des gouttes de HCl concentré puis on chauffe le mélange de 3 à 5 min au bain marie, après chauffage, l'apparition d'une couleur rouge indique la présence des leuco anthocyanes.



Photo III-7:Détection des leuco anthocyanes

I-1-8. Test de l'amidon

Prend 1g de poudre dans un cristalliseur, on ajoute quelque goutte d'iode (I_2) jusqu'à changement de couleur au bleu violé, indique la présence de l'amidon.



Photo III-8:Détection de l'amidon

I-1-9. Test des glucosides

Mettre deux gouttes d'acide sulfurique concentré sur un gramme de poudre de plantes.

- L'apparition d'une couleur rouge brique, puis en violet, indique la présence des glucosides.

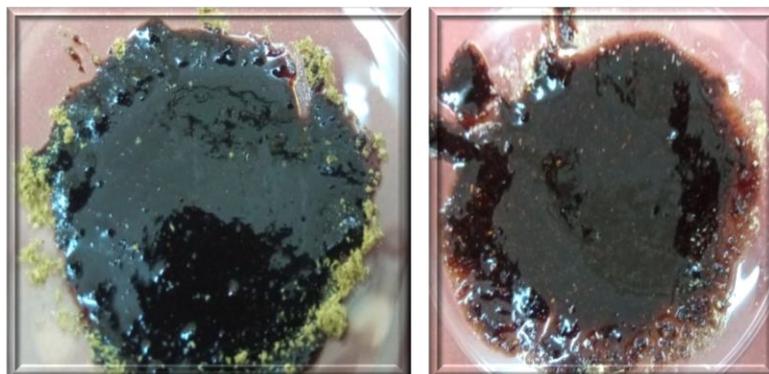


Photo III-9: Détection des glucosides

I-2. Inhibiteurs verts utilisés

Dans notre étude, nous avons utilisé deux inhibiteurs verts à savoir l'extrait de *Artemisia campestris* (**Dgouft**) et *Anvillea radiata* (**Negd**).

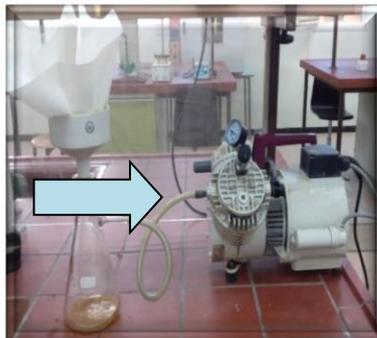
I-2-1. Préparation de l'inhibiteur

Une quantité de 50 g de la poudre de plante est macérée deux fois dans 300ml et de 200ml Méthanol 70% pendant 24 heures sous agitation. Le filtrat hydrométhanolique obtenu est filtré on utilise fiole à vide et papier filtre. La séparation du solvant de l'extrait est faite à l'aide de l'appareil appelé Rotavapeur.

Dans le Rotavapeur, nous réalisons une évaporation sous vide en utilisant une pompe à vide avec une vanne de contrôle. Pendant l'évaporation le ballon est mis en rotation et plongé dans un bain liquide chauffé. L'appareil est muni d'un réfrigérant avec un ballon-collecteur de condensat. La rotation du ballon crée une surface d'échange plus grande et renouvelée permettant donc d'effectuer une évaporation rapide. L'abaissement de la pression permet d'évaporer le solvant à température réduite, évitant ainsi la dégradation thermique éventuelle des composés. C'est une méthode d'évaporation simple, utile, douce et rapide.



Macération



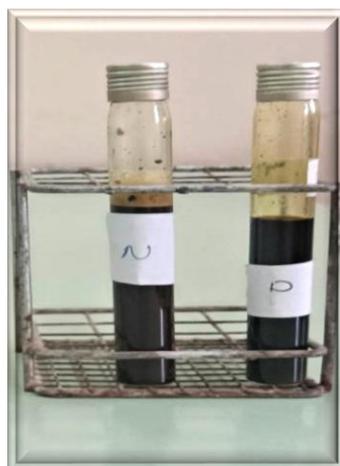
Filtration



Le filtrat



Évaporation



L'extrait obtenu

Photo III-10: Les étapes de préparation l'inhibiteur

II- Etude de l'inhibition de la corrosion

1. Définition de l'acier

Les aciers sont des alliages métalliques ferreux (le fer est l'élément principal) contenant du carbone dont la teneur ne dépasse pas 2% en masse. Ils contiennent plusieurs éléments d'additions tels que : le Chrome (Cr), le Nickel (Ni), le Molybdène (Mo), le Vanadium (V), le Tungstène (W), l'Aluminium (Al) ...etc., et d'autres éléments présents suite à l'élaboration tels que : le Soufre (S), le Manganèse (Mn), le Silicium (Si), le Phosphore (P), le Cuivre (Cu) ...etc^[82].

2. Les types d'acier

En fonction du nombre d'éléments d'alliage ajoutés au fer et de leur teneur, les aciers présentent un très grand nombre de nuances différentes. On peut classer les divers types d'alliages à base de fer selon leur composition chimique ou selon leur domaine d'utilisation. L'adoption de cette dernière nous permet de recenser quatre familles d'aciers :

Il existe trois grandes familles d'aciers :

Les aciers non-alliés pour un usage général

Les aciers faiblement alliés, de haute résistance

Les aciers fortement alliés à très haute résistance mécanique ^[21,6].

II-1. Etude gravimétrique

II-1-1. Matière étudiée

Le matériau de notre étude est un acier au carbone-manganèse utilisé pour le transport des hydrocarbures sous une pression de service de 70 bars. de dénomination APIX70, il répond à la spécification imposée par la norme API 5L.

- API : institut américain du pétrole.
- 5L : spécification pour les pipelines.
- X : désignation de catégorie pour le pipeline de haute résistance.

Les deux nombres après le X sont la valeur de la limite élastique minimale. Par exemple X70 a une limite élastique minimale de 70 psi (483 MPA).

Tableau III-1:Composition chimique de l'acier utilisé

Elément	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
X70 %	0,125	1,68	0,27	0,051	0,04	0,021
Elément	S	Cu	Ti	Nb	Al	P
X70%	0,005	0,045	0,003	0,033	0,038	0,012

II-1-2. Préparation des échantillons

1. Découpage

Nous préparons deux types d'échantillons : le premier type est d'une forme carrée avec 3cm de longueur et 1cm de hauteur pour les études gravimétrique. Les échantillons de deuxième type ont été découpés d'une forme cylindrique de diamètre 1,40 cm et hauteur 1 cm pour faire les études électro chimique (Figure III-1).

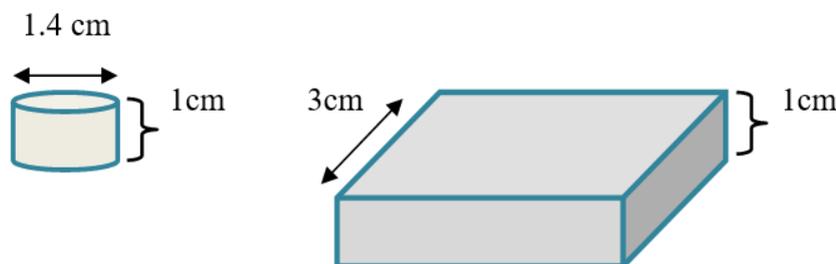


Figure III-1: Forme et dimensions des échantillons en cm

2. Polissage

Le polissage est un usinage de surface, au moyen d'abrasifs de plus en plus fins. Il consiste à polir les surfaces par la suppression des anfractuosités et des aspérités superficielles à l'aide des machines rotatives.

Les abrasifs sont collés sur des disques de bois ou de feutre animés d'un mouvement de rotation rapide, comme les meules. L'état de la surface à polir dépend de la dureté du métal et la qualité finale désirée ^[83].

L'opération de polissage a été effectuée avec du papier abrasif de différentes granulométries :400, 800, 1000 et 1200 afin d'obtenir un état de surface adéquat.

Après chaque polissage on lave l'acier avec l'eau distillée et séché.



Photo III-11 : L'échantillon après polissage

3. Préparation des milieux corrosif

A partir d'une solution mère concentrée de HCl 37% acide chlorhydrique on va préparer une série d'un solution fille de différentes concentrations (1%, 4%, 7% et 10%).

Tableau III-2 :Les propriété physico-chimiques d'acide chlohydrique

Forme brut	HCl
Densité	1,190g/cm ³
Masse molaire	36,46g/mol
P.P	36,5%

4. Protocole de la méthode gravimétrique

Avant toute mesures, les échantillons subissent un polissage au papier abrasif de granulométrie décroissant allant jusqu'à 1200 suivi d'un lavage à l'eau distillée, et d'un séchage à l'aide d'un papier absorbent pour éviter la corrosion des échantillons.

Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental pour les tests d'immersion des échantillons est représenté schématiquement sur la figure suivante.

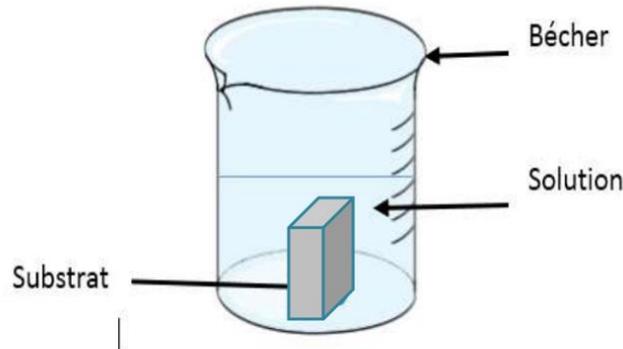


Figure III-2 :Dispositif pour l'étude gravimétrique

Dans cette étude, on a effectué deux tests :

- 1- **Sans inhibiteur** : Pour étudier l'effet de concentration de l'HCl (1%, 4%, 7% et 10%) et l'effet de temp d'immersion dans le milieu corrosif.

Une fois la préparation des surfaces des échantillons est achevé, chaque échantillon est pesé et introduit immédiatement dans le même temps dans des béchers contient une solution d'acide HCl de différente concentration (1%, 4%, 7% et 10%). Ces échantillons sont immergés dans les béchers qui contient 35 ml de HCl. Après une durée d'immersion bien déterminée (42, 84, 126, 168heures) la pièce est lavée, séchée et enfin pesée à nouveau.



Photo III-12 :L'acier x70 dans un milieu acide HCl sans inhibiteur

- 2- Avec **inhibiteur** : Pour étudier l'effet inhibitrice de l'extrait des plante Artemisia campestris(D) et Anvillea radiata (N). Dans un milieu acide (HCl 7%) pendant 42heure d'immersion.

Nous faisons les mêmes étapes précédentes mais cette fois on fixe le temps (42 heure) et en ajoute l'extrait des plante D et N en déférentes volume (0,1. 0,2. 0,5 1. 1,5 et 2) dans les bécher qui contient l'HCl 7%. Après 42 heure d'immersion nous sortons l'échantillon est lavée, séchée et enfin pesée à nouveau.



Photo III-13 : L'acier x70 dans un milieu acide HCl avec inhibiteur

II-2. Etude électrochimique

II-2-1. Montage électrochimique

L'étude électrochimique du comportement d'acier au milieu corrosif est basée sur les tracés des courbes de polarisation $i=f(E)$ et la droite de Tafel. Le dispositif expérimental utilisé constitué est d'un potentiostat-galvanostat de type PGZ 301 (marque Radiomètre) et un microordinateur doté d'un logiciel VOLTAMASTER 4, et d'une cellule d'électrolyse à trois électrodes.



Photo III-14 : Montage électrochimique

II-2-2. Cellule électrochimique

Photo III-15 montre la cellule électrochimique à trois électrodes (Electrode de travail; Electrode de référence ; Electrode auxiliaire).

- 1- Electrode de travail : C'est une électrode fabriquée en échantillon de l'acier X70 sous forme cylindrique de 1 cm d'hauteur et d'un diamètre de 1cm (surface active).
- 2- Electrode de référence : C'est une électrode au calomel saturée en chlorure de potassium. Cette électrode de référence notée ECS, est impolarisable, son potentiel rigoureusement constant.
- 3- Electrode auxiliaire ou contre électrode : L'électrode auxiliaire est constituée du platine (surface active 1 cm), dans le but d'assurer le passage de courant électrique dans la cellule d'électrolyse.

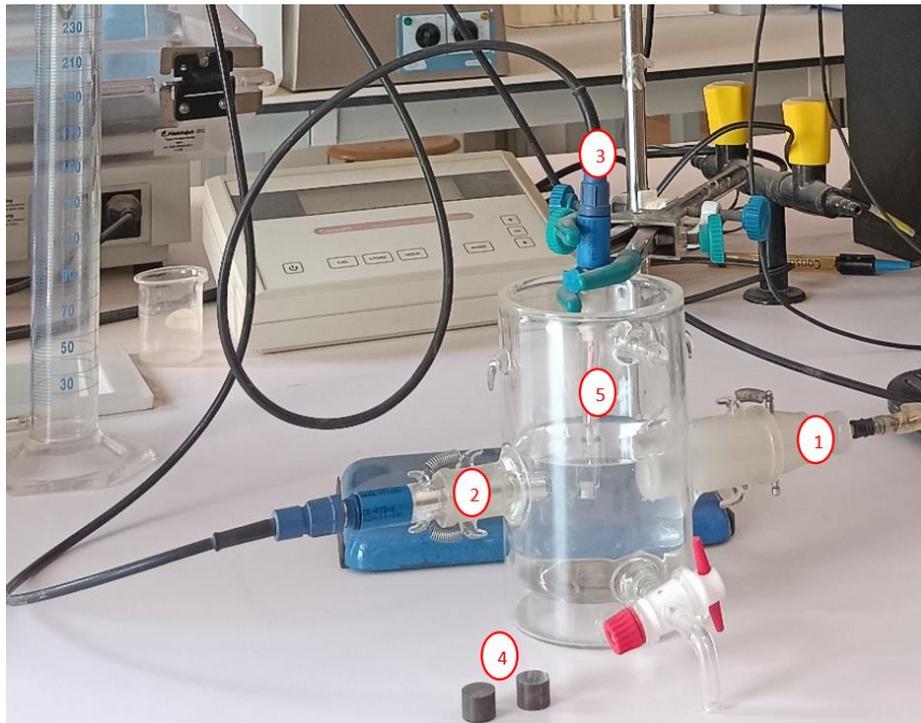


Photo III-15 : Cellule électrochimique

- 1- Electrode de travail ;
- 2- Electrode auxiliaire ou contre électrode ;
- 3- Electrode de référence ;
- 4- Les échantillons ;
- 5- La cellule qui contient 300 ml d'acide chloridrique.

CHAPITRE IV

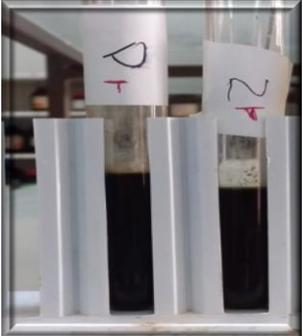
Résultats et discussions

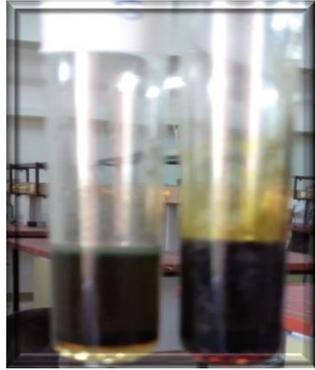
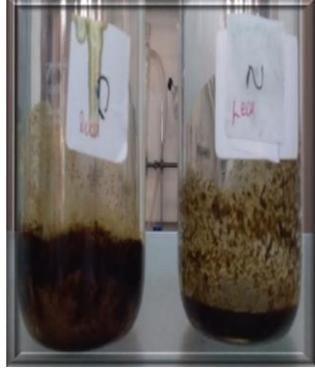


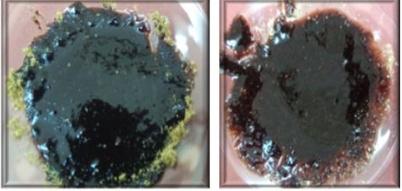
I. Criblage phytochimique

Les résultats des tests phytochimiques, qui ont été effectués sur la poudre végétale sont indiqué dans le Tableau suivant.

Tableau IV-1 : Résultats des tests phytochimiques.

Composé chimique	Les résultats		Photos des résultats
	Artemisia campestris D	Anvillea radiata N	
Les alcaloïdes	+	+	 <p>Précipité blanc Jaunâtre</p>
Les flavonoïdes	+++	+++	 <p>Couleur Jaune claire</p>
Les Tanins	+++	+++	 <p>Couleur verte</p>

<p>Les saponisides</p>	<p>++</p>	<p>++</p>	 <p>formation d'une mousse</p>
<p>Les stérols non saturés et terpènes</p>	<p>+</p>	<p>++</p>	 <p>l'apparition d'une couleur violé ou marron</p>
<p>Les anthocyanes</p>	<p>++</p>	<p>++</p>	 <p>changement de couleur</p>
<p>Les leucoanthocyanes</p>	<p>+</p>	<p>+</p>	 <p>couleur rouge</p>

Les amidons	-	-	 <p style="text-align: center;">couleur au bleu violé</p>
Les glucosides	++	+++	 <p style="text-align: center;">couleur rouge brique</p>

- Le signe (+) : présence faible.
- Le signe (++) : présence moyenne.
- Le signe (+++) : présence forte.
- Le signe (-) : absence.

D'après ce tableau nous remarquons que l'extrait d'*Artemisia campestris* (D) et l'extrait d'*Anvillea radiata* (N) riches en quantités importantes de substances organiques azotés et parfois oxygénés. Ces substances généralement sont hétérocycliques aromatiques tel que: Tanins, Saponosides, Flavonoïdes et l'Alcaloïde pour cette raison sur laquelle, on a utilisé les extraits comme un inhibiteur de corrosion dans des milieux agressifs HCl.

II. Etude gravimétrique

II-1. Caractérisation de la surface par microscope électronique à balayage

L'observation par microscope électronique à balayage MEB des surfaces de l'acier X70 avant et après l'immersion dans les milieux acide 7% HCl, sans et avec l'inhibiteur N et D est présentée dans les photos suivantes (figure IV-1) :

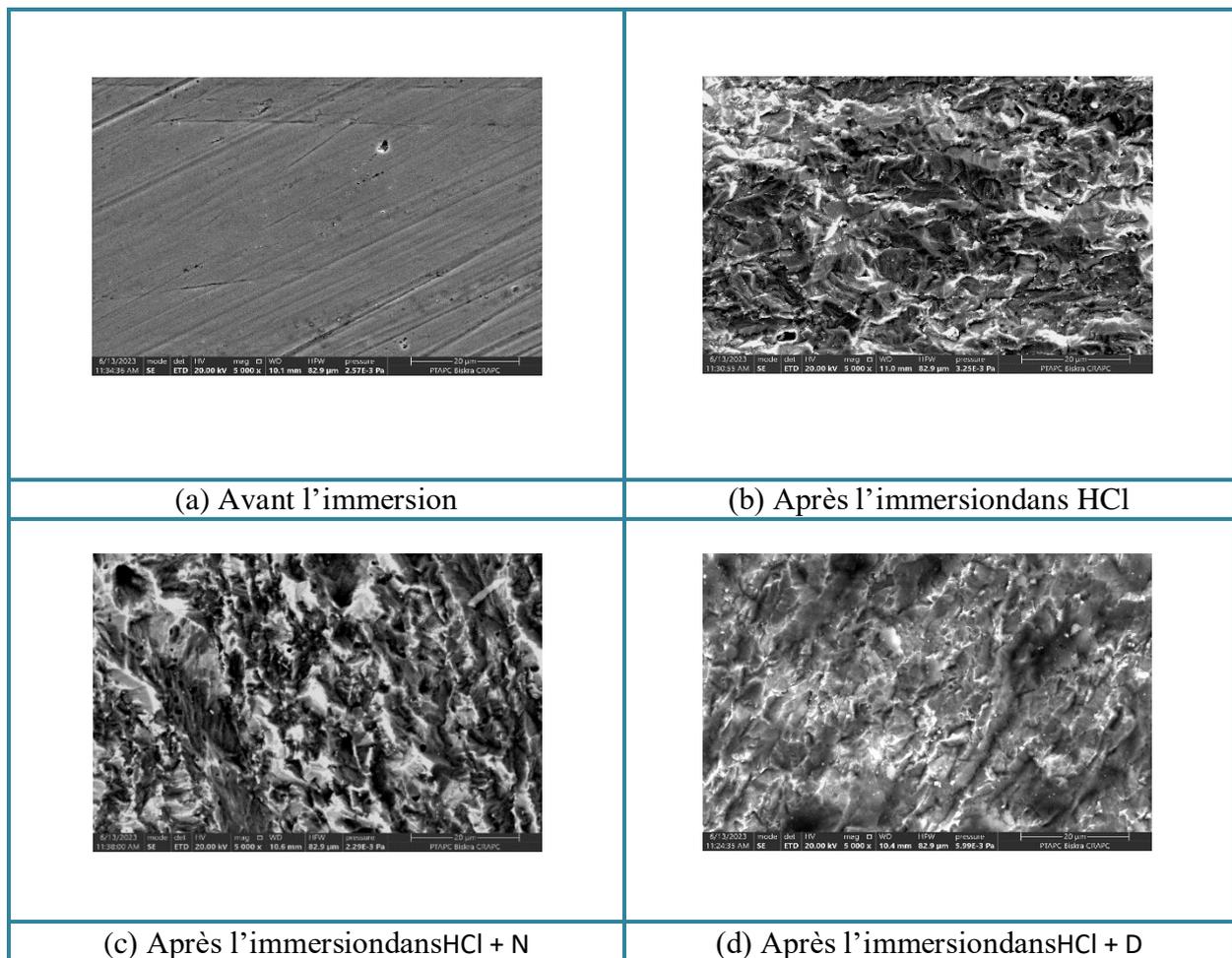


Figure IV-1 : Micrographies MEB de l'acier avant (a) et après l'immersion dans 7% HCl sans (b) et avec l'inhibiteur (c) et (d).

II-2. Energie dispersion rayon X (EDX)

Les analyses EDX des échantillons de l'acier X70 avant et après l'immersion dans le milieu acide (figure IV-2).

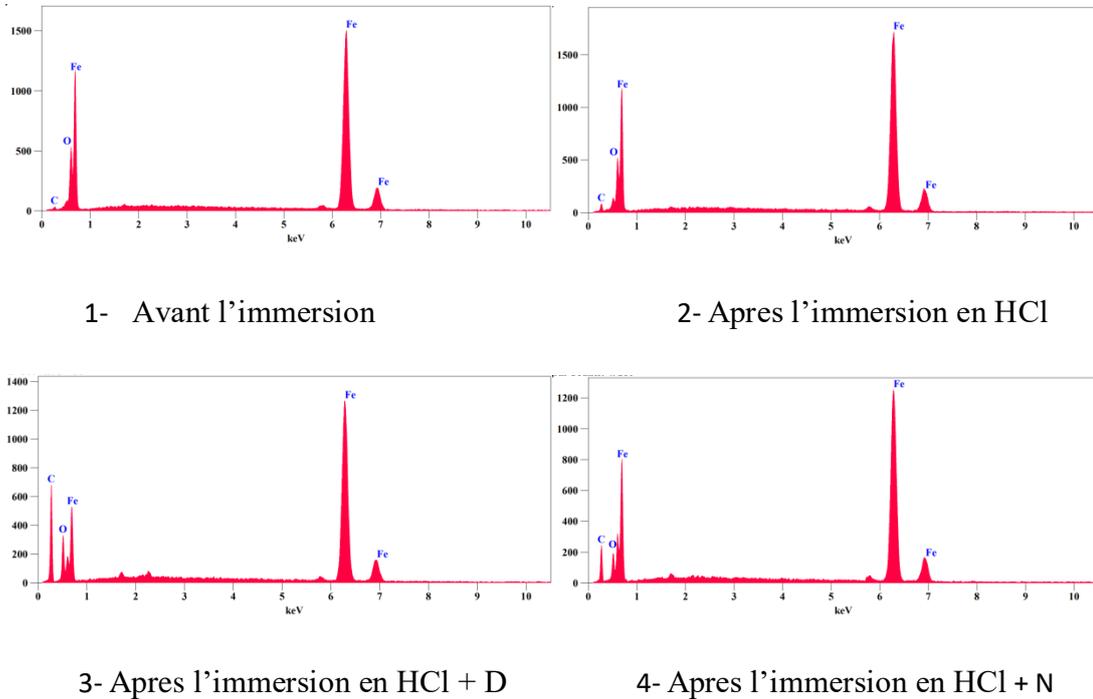


Figure IV-2 : Spectres de l'énergie dispersion EDX de l'acier avant (1) et après l'immersion dans 7% HCl sans (2) et avec l'inhibiteur (3) et (4).

D'après la micrographie MEB et les analyses EDX des échantillons observée (Figure 1 et 2) correspondant à l'acier X70 immergé dans HCl 7%, nous sommes en présence d'une dissolution du métal avec une surface très rugueuse et une corrosion localisée (corrosion par piqûres), nous avons une surface plus lisse due à la présence d'un film inhibiteur d'une structure organique.

II-3. Effet de concentration et de temps d'immersion

Afin de déterminer la concentration et le temps d'immersion optimale, nous avons effectué des mesures gravimétriques de l'acier X70 en milieu HCl à concentration (1%, 4%, 7% et 10%) à différents temps d'immersion (42 heure * X = 1,2,3 et 4). Le tableau donne les valeurs de la perte de masse (Δm), la vitesse de corrosion (V) de l'acier X70.

Tableau IV-2 : Variations de la perte de masse, la vitesse de la corrosion

C_{HCl} %	T (heure)	Δm (g)	$V_{corrosion}$ (g/cm ² an)
1 %	42	0,027	0,18514286
	84	0,059	0,202285714
	126	0,112	0,256
	168	0,147	0,252
4 %	42	0,046	0,31542857
	84	0,092	0,315428571
	126	0,150	0,342857143
	168	0,226	0,387428571
7 %	42	0,068	0,46628571
	84	0,129	0,442285714
	126	0,187	0,427428571
	168	0,272	0,466285714
10 %	42	0,072	0,49371429
	84	0,141	0,483428571
	126	0,212	0,484571429
	168	0,291	0,498857143

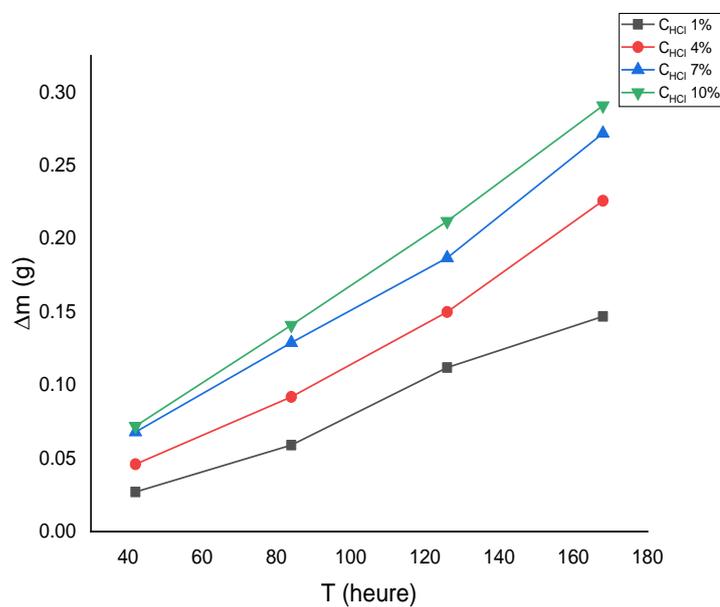


Figure IV-3 : Variations de la perte de masse Δm de l'acier X70 à différentes concentrations de HCl en fonction du temps d'immersion.

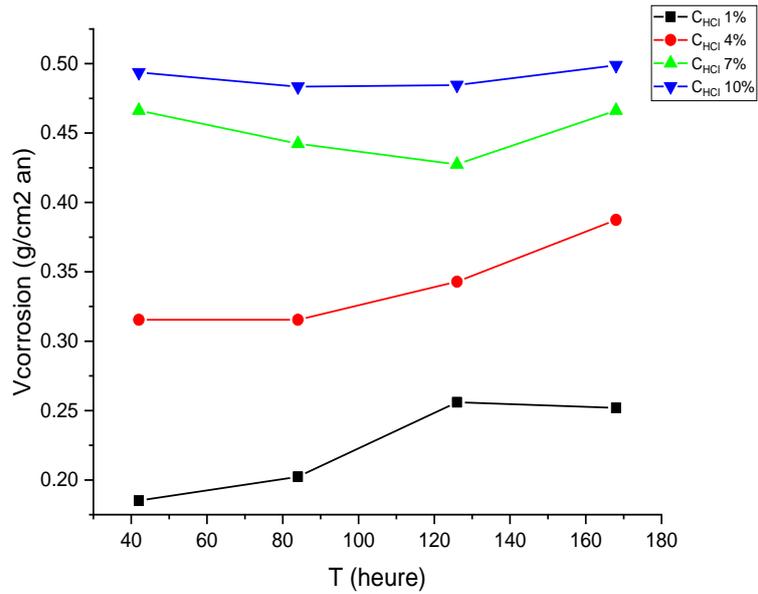


Figure IV-4 : Variations de la $V_{corrosion}$ à différentes concentrations de HCl en fonction du temps d'immersion.

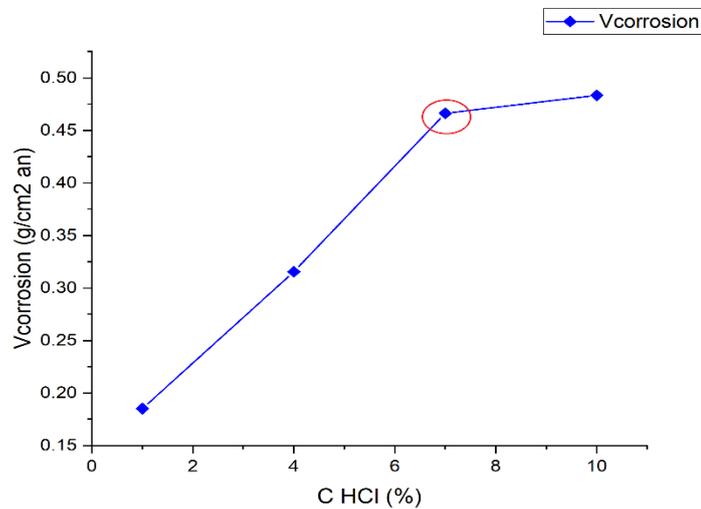


Figure IV-5 : Variations de $V_{corrosion}$ après 42hd'immersion en fonction du Concentration HCl.

L'analyse des figures (3 et 4) nous permet de constater que la perte de masse de l'acier X70 et la vitesse de corrosion en milieu de concentration d'acide chlorhydrique (1%, 4%, 7%

et 10%) augmente rapidement avec le temps d'immersion, ce qui signifie qu'il y a une dissolution continue du métal dans un milieu acide.

En remarque aussi (figure IV-5) qu'après 42 heure d'immersion la vitesse de corrosion augmente rapidement avec l'augmentation de la concentration de l'acide HCl. Et que les valeurs la vitesse de corrosion sont convergentes dans les concentrations 7% et 10%. Nous avons donc choisila concentration 7% pour notre étude.

II-4. Effet de concentration de l'inhibiteur D et N

Afin d'étudier l'effet inhibitrice de l'extrait des deux plantes D et N, et de déterminer la plante la plus efficace en a choisi d'effectué des mesures gravimétriques de l'acier X70 en milieu HCl à concentration de 7% et le temp d'immersion T = 42 heure en fonction de la concentration des inhibiteurs D et N. Le tableau donne les valeurs de la perte de masse (Δm), la vitesse de corrosion (V) de l'acier X70 et l'effet inhibitrice de l'extrait des deux plantes D et N.

Tableau IV-3 : Variations de l'effet inhibitrice en fonction de C_{inh}

C	Δm (g)		$V_{corrosion}(g/cm^2 \text{ an})$		E inh (%)	
	D	N	D	N	D	N
0	0,068	0,068	0,466286	0,466286	/	/
0.1	0,027	0,031	0,185143	0,212571	60,29	54,41
0.2	0,025	0,028	0,171429	0,192000	63,23	58,82
0.5	0,023	0,026	0,157714	0,178286	66,18	61,76
1	0,020	0,024	0,137143	0,164571	70,59	64,70
1.5	0,019	0,020	0,130286	0,137143	72,06	70,59
2	0,017	0,019	0,116571	0,130286	75,00	72,06

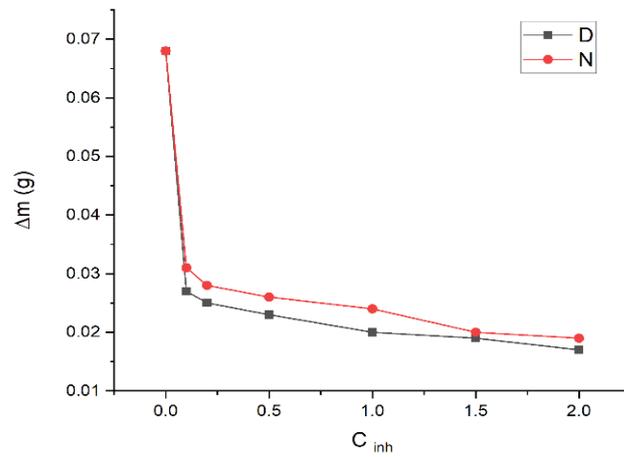


Figure IV-6 : Variations de la perte de masse Δm après 42h d'immersion en fonction de la Concentration de l'inhibiteur D et NdansHCl

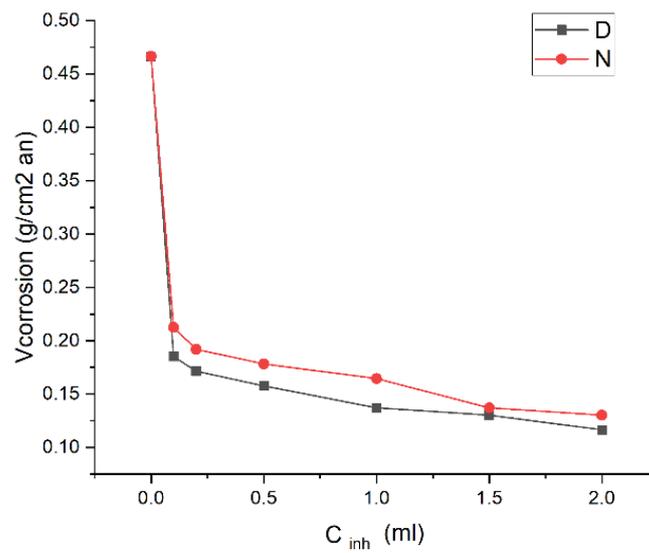


Figure IV-7 : Variations de $V_{corrosion}$ après 42h d'immersion en fonction de la Concentration de l'inhibiteur D et NdansHCl

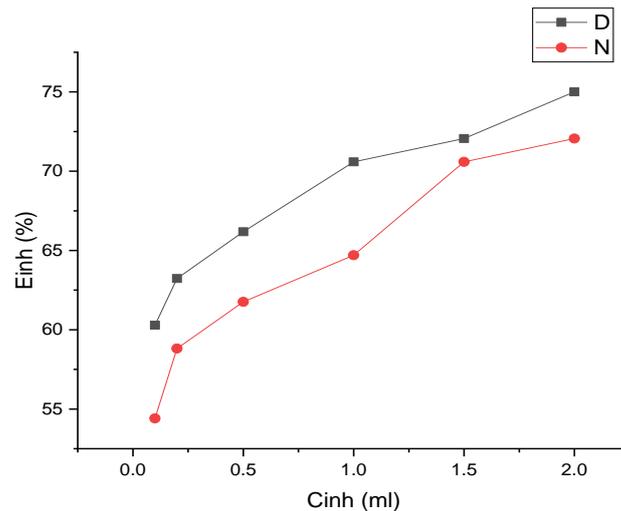


Figure IV-8: L'efficacité inhibitrice en fonction de la Concentration de D et N

D'après cette figure nous remarquons que l'efficacité inhibitrice de corrosion est variée selon la concentration des deux inhibiteurs utilisés, D et N. Là où l'inhibiteur D a une valeur 75,0 % est le plus efficace que l'inhibiteur N qui a une valeur 72,06%.

III- Méthode électrochimique

III-1. Mesure de potentiel libre

Les courbes de polarisation $i = f(E)$ nécessitent la connaissance du potentiel libre. Après différents essais, nous avons opté pour une immersion de l'échantillon pendant une durée de 45 minutes. Ce temps est suffisant pour obtenir une stabilisation satisfaisante du potentiel libre. Dans la solution d'acide chlorhydrique (HCl 7%). Avant chaque manipulation l'électrode de travail est polie avec un papier abrasif de différentes granulométries.

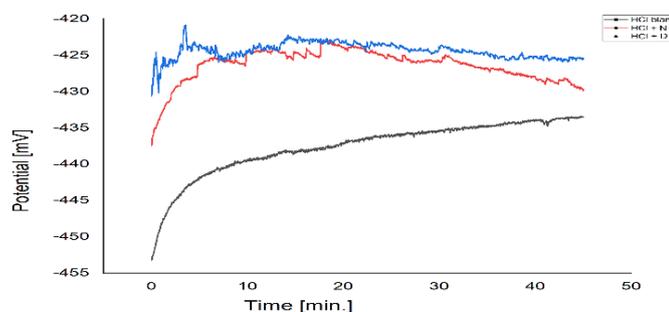


Figure IV-9: Courbe de polarisation $i = f(E)$ de l'acier dans un milieu acide

III-2. Courbe de polarisation

Le tracé de la courbe de polarisation a été effectué dans un domaine de potentiel correspondant à [-700 mV à -200 mV], et nous avons opté à une vitesse de balayage égale à 30mV/ min. Cette vitesse, nous permet d'obtenir une bonne reproductibilité des résultats sans masquer les phénomènes à étudier.

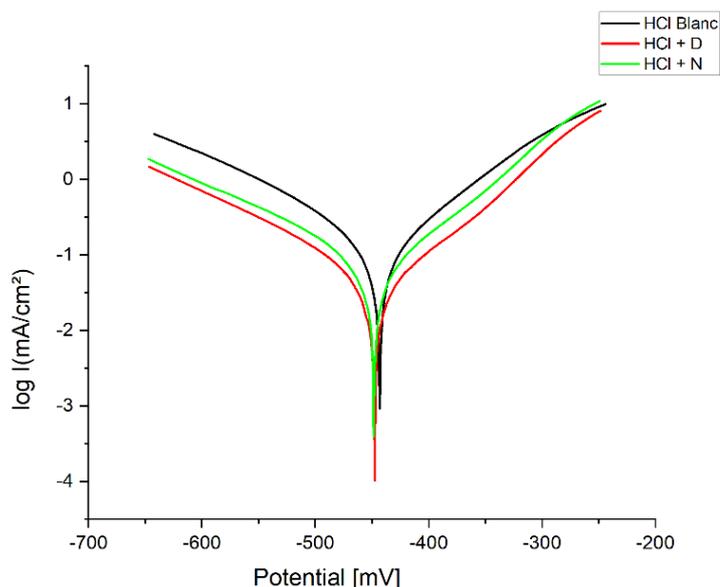


Figure IV-10 : Courbe de Tafel de l'acier X70 en milieu acide sans et avec inhibiteur N / D

La figure représente les courbes de polarisation obtenues pour l'acier X70, La densité de courant de passivation, le potentiel et le courant de corrosion, ...etc sont déterminés à partir de ces courbes. Seulement le domaine de linéarité des branches cathodique et anodique sera pris en considération dans le tracé de la courbe de polarisation de Tafel. La vitesse de corrosion est calculée par le logiciel VOLTA MASTER 4, en utilisant les droites de Tafel.

Le tableau suivant regroupe les valeurs des paramètres électrochimiques déterminées à partir des courbes de polarisation précédemment obtenues, à savoir la densité du courant de corrosion (i_{corr}) et le potentiel de corrosion (E_{corr}).

Tableau IV-4: Les valeurs des paramètres électrochimiques

	$E (i=0)$ [mV]	R_p [ohm.cm ²]	i_{corr} [mA/cm ²]	B_a [mV]	B_c [mV]	$V_{corrosion}$ [g / Cm ² an]
HCl blanc	-443,1	174,96	0,2053	112,4	-151,7	2401,0
HCl + N	-448,2	292,41	0,0807	91,0	-146,2	944,0
HCl + D	-447,6	454,65	0,0629	93,5	-145,5	735,6

On remarque que le potentiel de corrosion est convergé vers des valeurs plus négatives montre que l'inhibiteur a un caractère cathodique, tandis que les valeurs de (i_{corr}) diminuent avec l'utilisation de N et D. Donc, on peut constater que le métal dans le milieu acide pure donne un courant de corrosion (i_{corr}) plus élevée. Les résultats obtenus montrent que la résistivité à la corrosion de l'acier X70 augmentée lorsqu'en utilise un inhibiteur (N ou D).

III-3. Courbes de l'impédance électrochimique

Tous les diagrammes de Nyquist montrent la présence d'un demi-cercle capacitif, la première intersection de ce demi-cercle avec l'axe de Z réel nous donne la résistance de la solution R_s , et la deuxième intersection avec le même axe nous donne la résistance de transfert de charge R_{tc} . En remarque que $d_{HCl\text{blan}} < d_{HCl + N} < d_{HCl + D}$ Ce qui confirme l'efficacité inhibitrice de l'extrait des plantes étudié.

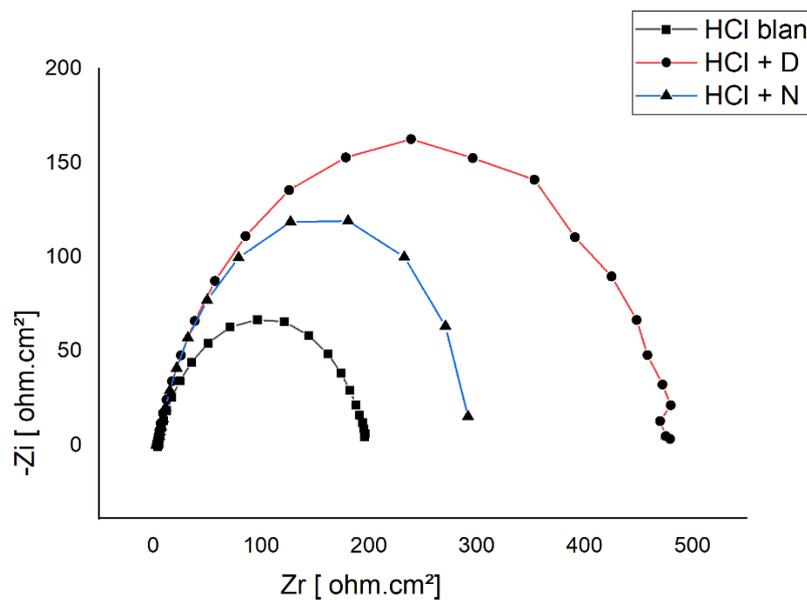


Figure IV-11: Diagrammes de la spectroscopie d'impédance électrochimique en milieu acide sans et avec inhibiteur.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est axé sur l'étude de l'inhibition de la corrosion de l'acier X70 dans un milieu agressif d'acide chlorhydrique HCl 7%, par l'extrait des plantes (*Artemisia campestris* (D) et *Anvillea radiata* (N) comme un inhibiteur vert. Suivie par une étude comparative de l'efficacité inhibitrice des deux extraits.

Le déroulement de ce travail a été mené de la manière suivante : au premier lieu, nous avons confirmé la présence des composés chimique (Tanins, Saponisides, Flavonoïdes et l'Alcaloïde...) dans l'extrait des deux plantes. Après cela, en a fait l'extraction par macération des deux plantes et la préparation des échantillons d'acier X70 en deux formes carrée et cylindrique. Enfin en à étudier l'efficacité inhibitrice à l'aide de diverses techniques de mesure (la méthode gravimétrique et la méthode électrochimique) et par les méthodes de caractérisation (MEB et EDX).

L'ensemble des résultats qui découlent de ce travail sont les suivants :

- Le criblage phytochimique pour les deux plantes confirme la richesse de les 'extrait en grandes quantités de matière organique azotée et parfois en oxygène. Il s'agit généralement de substances aromatiques hétérogènes telles que: tanins, saponisides, flavonoïdes et alcaloïdes, c'est pourquoi elles ont été utilisés comme inhibiteur de corrosion dans des milieux agressifs.
- La perte de masse de l'acier X70 en milieu d'acide chlorhydrique augmente rapidement avec le temps d'immersion, et avec l'augmentation de la concentration de l'acide ce qui signifie qu'il y a une dissolution continue du métal.
- La vitesse de corrosion de l'acier dans l'acide chlorhydrique HCl augmente avec le temps.
- La microscopie électronique à balayage MEB et EDX confirme la formation d'un film protecteur sur la surface de l'acier.
- La méthode gravimétrique montre que l'efficacité inhibitrice de corrosion varié selon la concentration de deux inhibiteurs utilisé, D et N. Là où l'inhibiteur D a une valeur 75.0 % est le plus efficace que l'inhibiteur N qui a une valeur de 72.06%.
- Les courbes de polarisation Tafel montre que le potentiel de corrosion est convergé vers des valeurs plus négatives montre que l'inhibiteur a un caractère cathodique.
- Les résultats obtenus par la méthode électrochimique montrent que la résistivité à la corrosion de l'acier X70 augmentée lorsqu'en utilise un inhibiteur (N ou D).

- Les résultats obtenus par les deux méthodes gravimétrique et électrochimique confirment que l'inhibiteur D est le plus efficace que l'inhibiteur N.

Finalement, ce travail a permis de mettre en évidence et de valoriser des inhibiteurs verts (des matériaux respectueux de l'environnement) pour l'utilisation dans le domaine industriel.

Nous pouvons envisager quelques perspectives pour la poursuite de ce travail :

- Utilisation d'autres méthodes d'extraction pour améliorer le rendement.
- L'extraction des principes actifs qui ont un effet anti-oxydant tel que : coumarines, flavonoïde, anthocyane et les tanins...
- Des études par modélisation pour confirmer les résultats expérimentaux et pour bien comprendre les mécanismes de corrosion

Bibliographie

- [1] Aliouali, A. (2017). Etude du comportement à la corrosion de l'aluminium dans différents milieux (Thèse de Magistère). Université de Batna2.
- [2] Daufin, G ; Talbüt, J. (1971). Etude de quelques problèmes de corrosion dans l'industrie laitière. Généralités sur la corrosion des métaux et alliages. *Le Lait*, 51(507), 375-398.
- [3] Hallaci, A ; Rezaiguia, Y. (2022). Etude phytochimique et évaluation de l'activité anticorrosive de l'extrait de feuilles d'Olea europaea L: Application à l'inhibition de l'acier en milieu NaCl 3% (Mémoire de master). Université 8 Mai 1945 Guelma.
- [4] Moussaoui, S. (2014). Contrôle des paramètres cinétiques de la corrosion d'anodes sacrificielles (thèse de doctorat). Université M'HAMED BOUGARA-BOUMARDES.
- [5] Marmi, S. (2017). Comportement à la corrosion des revêtements à base de nickel et de chrome sur des substrats de cuivre (thèse de doctorat). Université Mohamed Khider-Biskra.
- [6] Bouali, I. (2018). Étude d'inhibiteurs de corrosion métallique à base d'orthophosphates de zirconium lamellaires fonctionnalisés: synthèse, caractérisations et applications (Thèse de doctorat). Université de Lorraine; Université Caddi Ayyad, Marrakech (Maroc).
- [7] Ghelani, L. (2018). Tenue à la corrosion des revêtements composites Ni/SiC électrodéposés sur le substrat en acier (thèse de doctorat). Université de Batna 2.
- [8] Bensaada, S ; Bendrihem, N ; Bensaada, B. (2010). Science des matériaux fondements de la science des matériaux. Editions Universitaires Européennes
- [9] Boumeguet, F ; Iabbassen, D. (2017). Etude de l'inhibition de zinc dans l'acide chlorhydrique par l'extrait de la plante d'Ortie (mémoire de Master). université de A. Mira-Bejaia.
- [10] Boukhedena, W. (2018). Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier en milieu acide par des composés de type dithioacétal de cétène (thèse de doctorat). université mentouri - 1-constantine.
- [11] Boudieb, N. (2008). Évaluation des performances des peintures par des techniques électrochimiques (thèse de doctorat). université M'hamed Bougara- BoumarDES.

- [12] Boukrioua, i ; benslim, N. (2014). Effet inhibiteur des extraits de coloquinte sur la corrosion d'aciers C38 en milieu acide chlorhydrique (HCl) 0.5M (mémoire de master professionnelle). Université Ziane Achour De Djelfa.
- [13] Philippe, M. (2018). Etude des interactions bactéries-surfaces et des effets sur la passivation des aciers inoxydables (thèse de doctorat). Université de recherche paris sciences et lettres.
- [14] Khenadeki, A. (2013). Etude théorique et expérimentale de l'effet d'inhibition de la corrosion d'un acier au carbone par les dérivées de base de schiff en milieu acide chlorhydrique (thèse de magister). Université Bou- Bekrbelkaid Tlemcen.
- [15] Tridon, Ch ; Randu, S. (2020). Protection des ouvrages métalliques. Ce document a été réalisé avec le concours de la fédération nationale des travaux publics (fntp).
- [16] Grégory, B. (2008). Nouvelles voies d'inhibition de la corrosion de l'alliage d'aluminium 2024 plus respectueuses de l'environnement : applications aux couches d'anodisations colmatees (thèse de doctorat). Université de Toulouse.
- [17] Naili douaouda, M. (2020). Etude des performances de l'extrait de la sabline rouge « *spergularia rubra* » comme inhibiteur vert de corrosion de l'acier ordinaire en environnements sévères (mémoire de master). Université de Blida 1.
- [18] Boucherit, L. (2012). Effet anti corrosif d'une diamine aromatique et de sa base de schiff sur l'acier x52 en milieu HCl 1m (thèse de magister). Université Ferhat Abbas-Setif.
- [19] Nebbar, M. (2010). Etude de la tenue à la corrosion de l'acier N80 et évaluation de l'efficacité d'un inhibiteur de corrosion (thèse de magister). Université Mohamed Khider – Biskra.
- [20] Hélie, M. (2005). Matériaux métalliques–phénomènes de corrosion. cours cea/iup génie des matériaux, université d'evry.
- [21] Marmi, H. (2017). Amélioration de la résistance à la corrosion électrochimique des aciers par utilisation des inhibiteurs (thèse de doctorat). Université Mohamed Khider-Biskra.
- [22] Ladouani, H. (2011). Inhibition de la corrosion du cuivre en milieu acide par les dérivés de dithioacétal de cétène (thèse de magister). Université Mentouri de Constantine.
- [23] Naoun, M.(2014). Influence du peroxyde d'hydrogene sur la susceptibilité a la corrosion des aciers inoxydables en milieu salin (thèse de doctorat). Université El Hadj Lakhdar Batna.

- [24] Ghilani, L. (2008). Tenue a la corrosion d'un dépôt de chrome electrolytique sur un substrat en acier xc45 (thèse de magister). Université de Batna.
- [25] Oulabbas, a.(2019). Effets des inhibiteurs verts sur la corrosion des aciers ordinaires dans deux milieux acides (thèse de doctorat). Université Badji Mokhtar-Annaba.
- [26] Bommersbach, P. (2005). Evolution des propriétés d'un film inhibiteur de corrosion sous l'influence de la température et des conditions hydrodynamiques : caractérisation par techniques électrochimiques (thèse de doctorat). Institut national des sciences appliquées de Lyon.
- [27] Mehibel, R. (2008). Etude de l'efficacité inhibitrice de quelques nouveaux inhibiteurs, dits non polluants, sur la corrosion de deux types d'alliages d'aluminium (thèse de magister). Université de Skikda.
- [28] Olena danyliak, M ; Zin , I ; Rizun ,Y ; Korniy, S. (2022). Sodium citrate as an environmentally friendly corrosion inhibitor of steel in a neutral environment. International journal of corrosion,2022, 9 pages.
- [29] Constantin, F. (2012). Etude de l'efficacité d'inhibiteurs de corrosion utilisés dans les liquides de refroidissement (thèse de doctorat). Université de Pitești-Roumanie.
- [30] Hadri, F. (2012). Etude du mécanisme de corrosion atmosphérique à long terme des aciers: nouvelles stratégies de protection des aciers du patrimoine culturel (thèse de doctorat). Université Lorraine, Nancy 1.
- [31] Faustin, M. (2013). Etude de l'effet des alcaloïdes sur la corrosion de l'acier C38 en milieu acide chlorhydrique 1M : application à *aspidosperma album* et *geissospermum laeve* (apocynacées) (thèse de doctorat). Université des Antilles et de la Guyane.
- [32] Boulkroune, M. (2014). Inhibition de la corrosion du zinc en milieu acide (thèse de doctorat). Université de Constantine 1.
- [33] Benarioua, M. (2019). Etude de l'inhibition de la corrosion d'un acier doux en milieu acide par l'emploi d'inhibiteurs à base de plantes (thèse de doctorat). Université de Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd.
- [34] Abderrahim, k. (2017). Etude du pouvoir filmant et de l'efficacité inhibitrice de l'ascotec-fu et de la tetrathiafulvalene sur la corrosion du cuivre en milieu salin aqueux (thèse de doctorat). Université Badji Mokhtar Annaba.

- [35] Mezhoud, B. (2011). Synthèse des inhibiteurs contre la corrosion des aciers (thèse de magister). Université Mentouri-Constantine.
- [36] Saadoune, S. (2010). Synthèse et caractérisation d'inhibiteurs bi-fonctionnels : application à la corrosion des aciers de construction (thèse de magister). Université Ferhat Abbas-Setif.
- [37] Benarioua, M. (2013). Inhibition de la corrosion d'un acier ordinaire par les chromates et les molybdates (thèse de magister). Université Hadj Lakhdar Batna.
- [38] Savary, A ; Robin, S. (1964). Étude de l'adsorption physique par spectroscopie infrarouge. Journal de physique, 25 (6), pp.719-724.
- [39] Bentahar, Y. (2016). Caractérisation physico-chimique des argiles marocaines : application à l'adsorption de l'arsenic et des colorants cationiques en solution aqueuse (thèse de doctorat). Université de Nice-Sophia Antipolis.
- [40] Zeghache, H. (2019). Etude de l'adsorption des colorants sur un matériau poreux «charbon actif» (thèse de doctorat). Université Larbi Ben M'hidi Oum-el-Bouaghi.
- [41] Aksas, H. (2013). Etude cinétique et thermodynamique de l'adsorption des métaux lourds par l'utilisation des adsorbants naturels (thèse de doctorat). Université de Boumerdès-M'hamed Bougar.
- [42] 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 de doctorat). Université des Antilles et de la Guyane.
- [43] Hamadi, L. (2020). Application des inhibiteurs verts sur la corrosion des aciers en milieux agressifs (thèse de doctorat). Université de Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd.
- [44] khadraoui, A. (2014). Extraction et pouvoir bio-inhibiteur de substances naturelles d'origine végétale vis-a-vis de la corrosion acide de l'acier (thèse de doctorat). Université de Blida.
- [45] Lebrini, M. (2005). Synthèses et études physicochimiques de nouveaux thiadiazoles inhibiteurs de corrosion de l'acier en milieu acide (thèse de doctorat). Université de sciences et technologies de Lille.
- [46] Hamani, H. (2015). Synthèse, caractérisation et étude du pouvoir inhibiteur de nouvelles molécules bases de schiff (thèse de doctorat). Université Ferhat Abbas – Setif-1.

- [47] Beddou, F. (2015). Etude phytochimique et activités biologiques de plantes médicinales du sahara algérien (thèse de doctorat). Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid.
- [48] Mebarki, L. (2016). Recherche d'activité biologique de molécules végétales pour la lutte contre *fusarium oxysporum* f. sp. *albedinis* (thèse de doctorat). Université d'Oran Mohamed Boudiaf.
- [49] Benzaoui, N ; Fadai, R. (2021). Inventaires des plantes médicinales spontanées de la région de d'oued souf (mémoire de master). Université Mohamed khider de Biskra.
- [50] Aissaoui, I ; Belaid, k. (2020). Contribution a l'étude phytochimique de quatre plantes médicinales (*a. herba alba asso*, *a. compestris l*, *juniperus phoenicea* et *rosmarinus officinalis*) de la région d'oued souf (mémoire de master). Université Echahid Hamma Lakdhar- El Oued.
- [51] Benyahia, I. (2021). Contribution a l'étude analytique de métabolites secondaires de quelques plantes sahariennes a caractère insecticide (thèse de doctorat). Université kasdi Merbah-Ouargla.
- [52] Telli, A. (2017). Activités anti-oxydante, antimicrobienne et antidiabétique de deux espèces spontanées utilisées dans le traitement du diabète dans la région de Ouargla : *amodaucus leucotrichus* et *anvillea radiata* (thèse de doctorat). Université kasdi Merbah-Ouargla.
- [53] Meredfi, H ; Slamani, W. (2019). Etudes ethnobotanique, phytochimique et activités biologiques des espèces du genre d'*artemisia* rencontrées en algérie (mémoire de master). Université Mohamed Boudiaf - M'sila.
- [54] Ammari, H ; Daoudi, Z. (2021). Etude phytochimique de la plante « *artemisia campestris l* » (mémoire de master). Université Mohamed Khider de Biskra.
- [55] Louze, K ; Labidi, A. (2020). Etudes activités biologiques de la partie aérienne d'une plante de la famille des *acteraceae* (mémoire de master). Université L'arbi Ben Mhidi Oum el Bouaghi.
- [56] Boudjouref, M. (2011). Etude de l'activité antioxydante et antimicrobienne d'extraits d'*artemisia campestris l* (thèse de magister). Université Ferhat Abbes, Sétif.
- [57] Zaiter, A. (2017). Etude de la phytochimie de 12 plantes de la région lorraine en fonction de la granulométrie de poudres super fines (thèse de doctorat). Université de Lorraine.

- [58] Bouaziz, A. (2014). Identification de métabolites secondaires des plantes, protecteurs des photorécepteurs à cônes pour le traitement de la rétinopathie pigmentaire (thèse de doctorat). Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
- [59] Fettah, A. (2019). Etude phytochimique et évaluation de l'activité biologique (antioxydante - antibactérienne) des extraits de la plante *teucrium polium* L. sous espèce thymoïdes de la région Beni Souik, Biskra (thèse de doctorat). Université Mohamed Khider Biskra.
- [60] Muanda, F. (2010). Identification de polyphénols, évaluation de leur activité antioxydante et étude de leurs propriétés biologiques (thèse de doctorat). Université Paul Verlaine-Metz.
- [61] Tuo, K. (2020). Criblage phytochimique, activité antioxydante et antiplasmodiale in vitro de cinq plantes utilisées traditionnellement en Côte d'Ivoire contre le paludisme (thèse de doctorat). Université Félix Houphouët-Boigny.
- [62] Sahli, R. (2017). Etude phytochimique de quelques plantes extrêmophiles tunisiennes et exploration de leurs activités biologiques (thèse de doctorat). Université Lille 2 ; Université de Carthage.
- [63] Kraza, L. (2021). Évaluation de l'activité antioxydante, antimicrobienne et antidiabétique des composés phénoliques d'une plante médicinale *globularia alypum* L. dans la région de Laghouat (thèse de doctorat). Université Larbi Ben M'hidi Oum El-Bouaghi.
- [64] Achat, S. (2013). Polyphénols de l'alimentation: extraction, pouvoir antioxydant et interactions avec des ions métalliques (thèse de doctorat). Université Mira-Bejaia.
- [65] Boubekri, C. (2014). Etude de l'activité antioxydante des polyphénols extraits de *solanum melongena* par des techniques électrochimiques (thèse de doctorat). Université Mohamed Khider Biskra.
- [66] Obame Engonga, L. (2009). Etude phytochimique, activités antimicrobiennes et antioxydantes de quelques plantes aromatiques et médicinales africaines (thèse de doctorat). Université d'Ouagadougou.
- [67] Bendif, H. (2017). Caractérisation phytochimique et détermination des activités biologiques in vitro des extraits actifs de quelques Lamiaceae: *Ajuga reptans* (L.) Schreb., *Teucrium polium* L., *Thymus munbyanus* subsp. *coloratus* (Boiss. & Reut.) Greuter & Burdet et *Rosmarinus eriocalyx* Jord & Fourr. (thèse de doctorat). Université de M'sila.

- [68] Bensouici, C. (2015). Etude phytochimique et évaluation des activités biologiques de deux plantes du genre *sedum* (crassulaceae) (thèse de doctorat). Université Frères Mentouri Constantine.
- [69] Diallo, A. (2005). Etude de la phytochimie et des activités biologiques de *syzygium guineense* willd. (myrtaceae) (thèse de doctorat). Université de Bamako.
- [70] Lakhdari, A. (2022). Optimisation de rendement et étude des activités des principes actifs de quelques plantes médicinales de la wilaya de ghardaïa (sud algérie) (thèse de doctorat). Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [71] Abdessemed, D. (2014). Etude phytochimique de *gladiolus segetum* (these de doctorat). Université el Hadj Lakhdar-Batna.
- [72] Touafek, O. (2010). Etude phytochimique de plantes médicinales du nord et du sud algériens (thèse de doctorat). Université Mentouri Constantine.
- [73] Kone, K. (2018). Application des techniques de chromatographie et de spectroscopie dans l'identification des métabolites secondaires de trois plantes antidiabétiques et antihypertensives de la pharmacopée ivoirienne (thèse de doctorat). l'Institut National Polytechnique.
- [74] Malecky, M. (2008). Métabolisme des terpénoïdes chez les caprins (thèse de doctorat). Agroparistech.
- [75] Bohui, P ; Adima, A ; et autres. (2018). Etude comparative de trois méthodes d'extraction des flavonoïdes totaux à partir des feuilles de plantes médicinales : *azadirachta indica* et *psidium guajava*. Journal de la société ouest-africaine de chimie,046, 50 – 58.
- [76] Saidi, I. (2019). Caractérisation et valorisation d'une plante de la famille des fabaceae : *gleditsia triacanthos* de la région de sidi bel abbès : extraction des substances bioactives (thèse de doctorat). Université Djillali Liabès Sidi bel Abbés.
- [77] Penchev, P. (2010). Etude des procédés d'extraction et de purification de produits bioactifs à partir de plantes par couplage de techniques séparatives à basses et hautes pressions (thèse de doctorat). Université de Toulouse.
- [78] Bouchouka, E. (2016). Extraction des polyphénols et étude des activités antioxydante et antibactérienne de quelques plantes sahariennes (thèse de doctorat). Université Badji Mokhtar –Annaba.

- [79] Triaux, Z. (2019). Développement de méthodes d'extraction et d'analyse de molécules terpéniques à activité anti-inflammatoire (thèse de doctorat). Université de Strasbourg.
- [80] Boukhatem, M ; Ferhat, A ; Kameli, A. (2019). Méthodes d'extraction et de distillation des huiles essentielles. Revue de littérature. *Une*, 3(4), 1653-1659.
- [81] El Haib, A. (2011). Valorisation de terpènes naturels issus de plantes marocaines par transformations catalytiques (thèse de doctorat). Université de Toulouse.
- [82] Aouidad, I ; Siad, S. (2022). Caractérisation microstructurale et micromécanique d'un assemblage X60/316L, réalisé par Cladding, après déformation par laminage à chaud (mémoire ingénieur d'Etat). Ecole Nationale Polytechnique.
- [83] Belloufi, A. (2010). Comportement à la Corrosion d'un Acier Doux, dans un Milieu à Différents pH, en Présence de ZnCl (thèse de magister). Université Hadj Lakhdar De Batna.

Résumé :

Dans ce travail, nous visons à étudier le phénomène de corrosion de l'acier X70 en milieu acide HCl, et à étudier l'effet inhibitrice contre la corrosion de l'acier des extraits de *Artemisia campestris* (Dgouft) et *Anvillea radiata* (Negd)

Les résultats obtenus par différentes méthodes ont confirmé que les extraits végétaux ont un bon effet contre la corrosion de l'acier, avec un bon taux durant les 42 premières heures, estimé à 72,06% pour la plante Negd et 75,0% pour la plante Dgouft par la méthode gravimétrique.

Les résultats obtenus par la méthode électrochimique montrent aussi que l'inhibiteur D est plus efficace que l'inhibiteur N.

Mots clés: Corrosion de l'acier, inhibiteur vert, méthode gravimétrique, méthode électrochimique.

Summary :

In this work, we aim to study the corrosion phenomenon of X70 steel in HCl acid medium, and to study the inhibiting effect against steel corrosion of extracts of *Artemisia campestris* (Dgouft) and *Anvillea radiata* (Negd)

The results obtained by different methods confirmed that the plant extracts have a good effect against the corrosion of steel, with a good rate during the first 42 hours, estimated at 72.06% for the Negd plant and 75.0% for the Dgouft plant by the gravimetric method.

The results obtained by the electrochemical method also show that the D inhibitor is more effective than the N inhibitor.

Keywords: Corrosion of steel, green inhibitor, gravimetric method, electrochemical method.

المخلص:

نهدف من خلال هذا العمل إلى دراسة ظاهرة تآكل الفولاذ X70 في وسط حمضي HCl، ودراسة الأثر التثبيطي ضد تآكل الفولاذ للمستخلصات النباتية لكل من نبات (النقد والدققت).

حيث قمنا في البداية بالفحص الكيميائي لمعرفة أهم العناصر الموجودة في المستخلصات النباتية، ثم دراسة تآكل الفولاذ بطريقة فقدان الوزن والطريقة الكهروكيميائية.

أكدت النتائج المتحصل بمختلف الطرق أن المستخلصات النباتية لها تأثير جيد ضد تآكل الفولاذ، وبنسبة جيدة خلال 42 ساعة الأولى تقدر بـ 72.06% لنبته النقد و75.0% لنبته الدققت بطريقة فقدان الوزن، وقد أكدت هذه النتائج الدراسة الكهروكيميائية أن مستخلص الدققت أكثر تأثيراً من مستخلص النقد.

الكلمات المفتاحية: تآكل الفولاذ، المثبط الأخضر، طريقة قياس ضياع الكتلة، الطريقة الكهروكيميائية.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة محمد خيضر-بسكرة

عنوان المشروع:

صناعة مثبط التآكل للفولاذ باستعمال المستخلصات النباتية

Etude de l'effet d'inhibition de l'acier dans milieu acide par les
extraits des plantes

مشروع لنيل شهادة مؤسسة ناشئة في إطار القرار الوزاري 1275

العلامة التجارية

MP
BIO

الاسم التجاري

Métal-Protection-Bio

السنة الجامعية

2023 _ 2022

بطاقة معلومات:

حول فريق الإشراف وفريق العمل

1- فريق الإشراف:

فريق الإشراف	
المشرف الرئيسي (01): جعيل كمال	التخصص: كيمياء المواد
المشرف الرئيسي (01): /	التخصص: /
المشرف المساعد: سحنون الدراحي	التخصص: كيمياء المواد

2- فريق العمل:

فريق المشروع	التخصص	الكلية
الطالبة: بن شناف سماح	كيمياء المواد	علوم الدقيقة وعلوم الطبيعة والحياة

فهرس المحتويات

المحور الأول: تقديم المشروع

المحور الثاني: الجوانب الابتكارية

المحور الثالث: التحليل الإستراتيجي للسوق

المحور الرابع: خطة الإنتاج والتنظيم

المحور الخامس: الخطة المالية

المحور السادس: النموذج الاولي التجريبي

المحور الأول: تقديم المشروع "صناعة مثبت للآكل للفولاذ باستعمال المستخلصات النباتية"

1. فكرة المشروع
2. القيم المقترحة
3. فريق العمل
4. أهداف المشروع
5. جدول زمني لتحقيق المشروع

فكرة المشروع :

في ظل هذه الأعوام الأخيرة لما انتشر في العالم من تلوث توجه كل الصناعات نحو استعمال كل ماهو صديق بالبيئة للمحافظة عليها وكان لمثبطات التآكل حيز الدراسة، تستحق فكرة استخدام مثبطات التآكل الطبيعية (النباتية) للمعادن دراسة واهتماما كبيرا تعتبر المثبطات الكيميائية التقليدية فعالة في حماية المعادن من التآكل لكنها قد تكون لها تأثير سلبي على البيئة والصحة العامة بسبب المواد الكيميائية الضارة التي تحتوي عليها. ولهذا قررنا أن نقوم بصناعة مثبت من المستخلصات الطبيعية (النباتية) ودراسة أثره التثبيطي على المعادن في المحاليل الحمضية HCl مختلفة التركيز في أوقات مختلفة. ليكون هدفنا من هذا العمل أن نعلم فكرة استخدام المثبطات المصنوعة من المستخلصات النباتية سواء بالاستخدام المباشر أو بالإضافة على المواد المستخدمة في التنظيف. باختصار فكرة صناعة مثبطات التآكل للمعادن باستخدام مستخلصات نباتية تهدف إلى استغلال الخصائص المضادة للأكسدة والمضادة للتآكل المتواجدة في المواد النباتية لحماية المعادن من التآكل وتمديد عمره الافتراضي والتي تتوافق مع التوجه العالمي نحو الاستدامة والحفاظ على البيئة.

القيم المقترحة:

- 1- الاستدامة البيئية: استخدام مثبطات التآكل الطبيعية بدلا من مثبطات التآكل الكيميائية التقليدية التي قد تلوث المياه والتربة. باستخدام مثبطات التآكل الطبيعية يتم تقليل التلوث البيئي وتحسين استدامة العمليات الصناعية
- 2- الحفاظ على صحة الإنسان (تحسن جودة الهواء والمياه المحيطة).

- 3- استخدام نباتات محلية متوفرة في المنطقة ومحاولة استغلالها في الميدان الصناعي .
- 4- تقليل التكاليف : المواد الطبيعية النباتية متوفرة وبأسعار قليلة
- 5- تحسين جودة وعمر المنتجات : تساعد في حماية الأسطح من التآكل والتآكل الكهروكيميائي.
- 6- كقيمة مقترحة أخرى غير متواجد في الأسواق الجزائرية لذلك أردنا زيادة الوعي باستعمال مثبطات التآكل باستعمال المواد الطبيعية النباتية

فريق العمل :

فريق المشروع	التخصص	الكلية
الطالبة: بن شناف سماح	كيمياء المواد	علوم الدقيقة وعلوم الطبيعة والحياة

أهداف المشروع:

- 1- نسعى من هذا المشروع أن يكون الهدف الرئيسي زيادة الوعي وتعزيز ثقافة استعمال كل ماهو طبيعي كاستعمال مثبطات التآكل المصنوعة من المستخلصات النباتية بدلا من المثبطات الصناعية التقليدية . وبتحسين وتطويرها إلى أن تكون وتصل إلى المستوى العالمي والشركات العالمية كأمثال (AKZO) .Nobel/ Ecocortec

وكهدفنا المحلي: هو توفير حلول محلية لمشاكل التآكل في الصناعات المختلفة التي تعتمد على المعادن (شركات الأنايب الخاصة بالبتروال والغاز) وتحسين الكفاءة واستخداماتها في الصناعات وتقليل الخسائر التي يسببها تآكل معدات الهياكل .

جدول زمني لتحقيق المشروع:

1	2	3	4	5	6	7	8
الدراسة الأولية							
طلب التجهيزات من الخارج							
بناء المقر							
اقتناء المواد الأولية							
بداية إنتاج أول منتج							

المحور الثاني: الجوانب الابتكارية

كلا من المثبط الطبيعي والكيميائي يستعملان لغرض حماية المعادن من التآكل والتقليل من الأضرار الناجمة عنه ولكن يعتبر المثبط الطبيعي نهجا إبتكاريا في مجال صناعة مثبطات التآكل والذي يتميز بأنه:

1- مستخرج من مصدر طبيعي وذلك راجع لاكتشاف العديد من المركبات النشطة في النباتات التي تمتلك خصائص مثبطة لتآكل.

2- يستخدم المثبط الطبيعي تقنيات استخلاص متقدمة ومبتكرة لاستخلاص المادة الفعالة من هذه المصادر الطبيعية النباتية التي يمكن تطويرها لزيادة كفاءة الاستخلاص وتحسين جودة المنتج النهائي .

3- تنوع النباتات : يمكن استخدام مجموعة من النباتات لصناعة مثبط التآكل

4- إمكانية تحقيق تنوع وتعدد في المستخلصات النباتية والخصائص المثبطة في التآكل توسع إستخدامتها (النفط ، الغاز السيارات البناء ، المعالجات الكيميائية).

المحور الثالث: التحليل الاستراتيجي للسوق

1/ تحليل البيئة الخارجية الكلية: تحليل باستل

<p>تخدم المشروع:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ تعزيز الجزائر لتطوير الصناعة المحلية توفير تسهيلات وحوافز للمؤسسات الناشئة التي تدعم الابتكار في الصناعة. ✓ الاستقرار السياسي بحيث لا يوجد اضطرابات سياسية التي يمكن أن تؤثر سلبا على المشروع . ✓ الامتثال للتشريعات الحكومية التي تتعلق بمعايير الجودة والسلامة والحماية البيئية ✓ توفر المواد الأولية في البلاد. 	<p>العوامل السياسية</p>
<ul style="list-style-type: none"> ✓ إمكانية الحصول على الدعم من طرف الدولة التي عززت المؤسسات الناشئة ✓ تقلبات أسعار المواد الأولية. ✓ حجم السوق صغير لأنه لا يوجد وعي بفكرة استعمال مثبتات التآكل الطبيعية سيكون هناك تحدي . ✓ زيادة فرص التمويل والاستثمار الأجنبي بزيادة التعاون والخبرات. ✓ إعفاء الكلي من الضريبة الجزافية الوحيدة (10 IFU) سنوات. 	<p>العوامل الاقتصادية</p>
<ul style="list-style-type: none"> ✓ سيكون هناك صعوبة نوعا ما في زيادة الوعي والتثقيف لدى المجتمع بضرورة استعمال مثبتات التآكل الطبيعية بدل من التقليدية ✓ زيادة فرص التوظيف في هذا المشروع يبلغ صيته وزيادة توسعته في البلد إذن تحسين المعيشة وتقليل نسب البطالة . ✓ محاولة زيادة مستوى الوعي حول المنتجات الصديقة للبيئة وأهميتها . 	<p>العوامل الاجتماعية</p>
<ul style="list-style-type: none"> ✓ توفر الآلات والمعدات في الأسواق ✓ محاولة العمل على توفير تقنيات إدارة النفايات والتخلص الآمن للنفايات الصناعية ✓ توفير أنظمة المراقبة والتحكم الآلي لمراقبة العمليات والتحكم في المعدات وحتى الكفاءة ✓ عدم توفر الآلات الأوتوماتيكية محليا ومنه الارتفاع أسعار المستوردة 	<p>العوامل التكنولوجية</p>
<ul style="list-style-type: none"> ✓ تتميز النباتات الصحراوية من الصفات التكيف التي تمكنها من النمو والازدهار في بيئات الصحاري الجافة والقاحلة ✓ استخدام مواد طبيعية متوفرة: الماء ✓ توفر المادة الأولية بشكل كبير (تنوع في النباتات التي تحمل خصائص مثبتة للأكسدة) ✓ إدارة المخلفات 	<p>العوامل البيئية</p>

العوامل القانونية	✓ القوانين والتشريعات المشجعة على حماية البيئة
	✓ قوانين تشجع انشاء المؤسسات الناشئة والمصغرة ومرافقتها
	✓ حماية الملكية الفردية
	✓ قوانين العمالة والتشغيل

2/ تحليل القوى الخمس لبورتر

1- شدة المنافسة في الصناعة:

- وجود منافس مباشر هو صانع المثبطات التقليدية
- لا توجد شركة تعمل على تصنيع مثبطات التآكل بالمستخلصات النباتية في الجزائر

2- الزبائن :

القوة التفاوضية تكون كبيرة :

- توجد مصانع صناعة مثبطات التآكل التقليدية (توفر البدائل)
- لا توجد معرفة كبيرة ومعلومات واضحة لدى المجتمع عن هذا المنتج

3- الموردون

- تتعامل المؤسسة مع العديد من المردون في قطاعات مختلفة من أجل تطبيق المشروع ،
- يختلف التعامل مع الموردين على حسب احتياجات المؤسسة :سواء المواد الخام ، مكونات ، عمالة ، الالات

بالنسبة للمادة الاولية : هي عبارة عن نباتات اذن ليست محصورة في نبتة واحدة مع دراسات كيميائية التي تؤكد جودة وفعالية النبتة في ان تكون مثبط للتآكل.

- الالات والمكونات : توجد سواء محليا أو بالاستيراد
- العمالة : متوفرة في ظل عامل البطالة المنتشر
- اذن لا يوجد قدرة تفاوضية للموردين ضعيفة جدا

4- تهديد دخول منافس جديد: تقريبا متقدمة

- يحتاج المشروع لرأس مال كبير مما يجعله صعب التطبيق ويحتاج لموارد مالية ومساهمين كبار

- في حالة ظهور توجهات جديدة في هذا المجال سيكون هناك منافسين جدد

5- تهديد دخول منتجات البديلة :

- المنتجات التقليدية للمثبطات
- منتجات تقوم بنفس العمل (تقنية الطلاء الواقي)

3/ تحليل swot:

1- نقاط القوة:

- طبيعة المشروع التي تهدف للحفاظ على البيئة
- فعالية الحماية
- تقديم تشكيلة متنوعة في المنتج
- جودة المنتج

2/ نقاط الضعف:

- قلة رأس المال
- توفير ظروف تخزين ملائمة
- تحديات التسويق والتوعية إذن يجب الاستثمار في استراتيجيات التسويق والتوعية
- لتعزيز مزايا المنتجات الطبيعية

3/ الفرص:

- التوجه نحو الاستدامة
- عدم وجود مصنع محلي للمنتج
- يساعد تقديم تشكيلة جديدة من المنتج ان يتوسع في صناعات أخرى

4/ التهديدات

- احتمالية دخول منافس جديد للسوق (مثبط طبيعي ليس من النباتات ولكن لديه نفس الأهمية بخصائص أخرى)
- تخوف الزبائن من المنتج كونه جديد في السوق
- وجود بعض البدائل القريبة للمنتج
- يجب الامتثال للتشريعات والقوانين المتعلقة بالمواد الكيميائية والمستخلصات الطبيعية

4/ تحليل الميزج التسويقي

المنتج : يركز المشروع على إنتاج منتج مثبط لتآكل المعادن في المحاليل الحمضية من المستخلصات النباتية استعمالها يكون بتطبيقها مباشرة او باضافتها على مواد التنظيف

السعر: 1000 دينار جزائري لسعر الوحدة الواحدة

الترويج : الدعاية والاعلام على مواقع التواصل الاجتماعي

- لوحات إعلانية
- فتح موقع خاص
- التوزيع : المبيعات المباشرة
- التجارة الالكترونية
- عن طريق نقاط البيع

5/ الاستراتيجيات التسويقية :

إستراتيجية الانطلاق:

- تقديم منتج ذو خصائص عالمية
- تقديم منتج صديق للبيئة
- توفير تشكيلة المنتج كاملة

إستراتيجية التوسع : بعد ولوج المؤسسة للسوق واكتساب حصة سوقية وسمعة جيدة وتصبح معروفة لدى الزبائن من حيث جودة منتجاتها وزيادة الطلبات عليها فإن المؤسسة تحاول القيام بتوسيع مشروعها على نطاقات جغرافية أخرى و بإضافة أنشطة اقتصادية ذات قيمة لنفس النشاط (إضافة للطلاء ، في صناعة المعدات البحرية ، الأجهزة الالكترونية) محاولين تغيير تركيبها حتى تتماشى مع كل التطبيقات.

المحور الرابع : خطة الإنتاج والتنظيم

1/ الموقع : المنطقة الصناعية طولقة - بسكرة

- سبب اختيار الموقع :

- منطقة معروفة وبالتالي سهولة وصول الموردين والزبائن
- القرب من المنطقة الحضرية وبالتالي سهولة التنقل العمال
- تعتبر ولاية بسكرة موقعا جغرافيا مهما، وتمتاز بتوفر المواد الطبيعية الأولية وتنوع الاقتصادي مما يجعلها جذابة للاستثمار الصناعي .

2/ احتياجات المشروع :

1-2 الآلات والمعدات

الالات والمعدات	السعر بالدينار الجزائري
الة الطحن	330.000.00
الة الغريلة	210.000.00
الفلتره	880.000.00
الة تبخير المواد الكيمائية	650.000.00
المجموع	2.070.000.00

2-2 إحتياجات المعدات المكتبية

المعدات	العدد	السعر الوحدوي بالدينار الجزائري	السعر الاجمالي
المكتب	1	60.000	60.000
الطاولة	3	10.000	30.000
الكراسي	5	10.000	50.000
الة الطباعة	1	20.000	20.000
ماسحات ضوئية	1	10.000	10.000
المجموع	9		170.000

3-2 احتياجات الماء والكهرباء والانترنت

الاحتياج	السعر الاجمالي في السنة بالدينار الجزائري
الكهرباء والماء	80.000
الهاتف والانترنت	19.200
المجموع	99.200

4-2 احتياجات الموارد الأولية

الاحتياج	السعر الاجمالي بالدينار الجزائري
النباتات	50.000.00
المواد الكيميائية	100.000.00
المجموع	150.000.00

3 / النظام الانتاجي

مرت عملية تصنيع مثبتات التآكل للمعادن عن طريق المستخلصات النباتية بعدة طرق مقسمة الى شقين أساسين الشق الاول وهو عبارة عن تجهيز الفولاذ وتنظيفه جيدا بعملية الصقل وتهدف هذه العملية الى تلميع الفولاذ

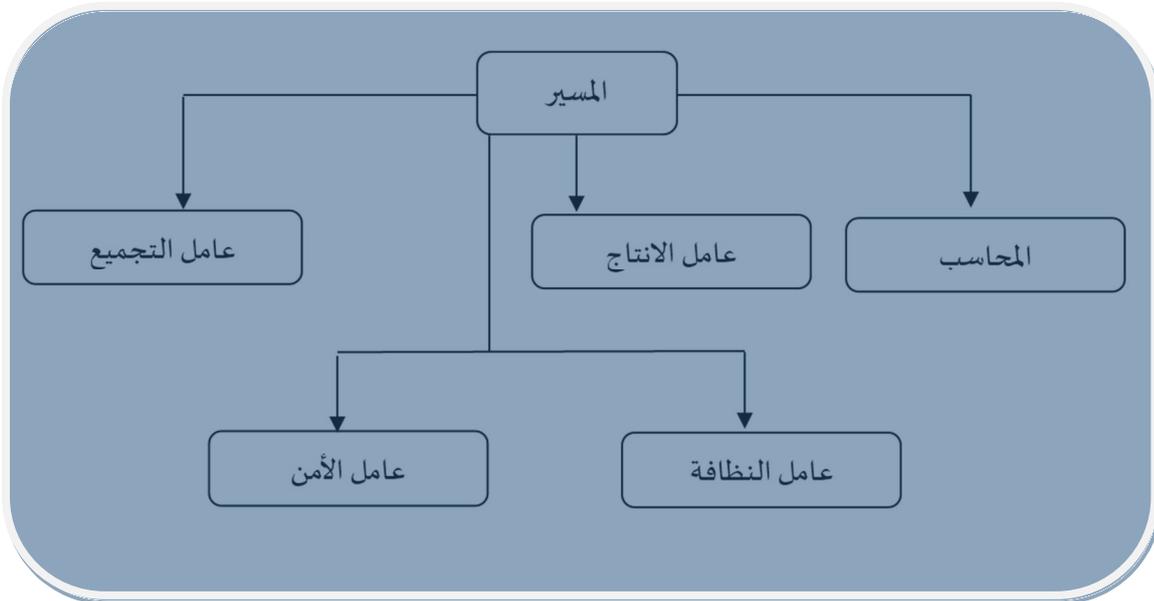
الشق الثاني وهو تحضير المثبط وتتضمن خطواته كالتالي أولا دراسة النبتة المستعملة ثم تأتي عملية الاستخلاص ثم الفلترة ثم التبخير وفي الأخير يكون المستخلص حاضرا ، كعملية تعبئة سواء في العبوات التي ترش مباشرة أو إضافتها كمضاف على المحاليل التي تخص التنظيف.

1-4 إحتياجات اليد العاملة

يحتاج هذا المشروع مبدئيا إلى 5 عمال وصاحب المشروع :

المهمة	المواصفات	المنصب
الأنضباط المسؤولية مهارة اتخاذ القرارات النزاهة حسن التصرف حسن التعامل النصائح الطموح/النزاهة/	خبرة في مجال الكيمياء وملم قليلا في جانب التسويق	المدير + المسير
جمع وتحليل البيانات المالية إعداد الميزانية كل شهر وهكذا....	متخرج في مجال المحاسبة ويستطيع التحكم الجيد في المعاملات الحسابية	المحاسب
جمع النباتات	شبكة علاقات كبيرة مع المزارعين / سياقة الشاحنات النشاط الصرامة الجهد	عامل التجميع
الإشراف على عملية تصنيع المنتج ضمان العمل داخل خطوط الإنتاج	خبرة في مجال الكيمياء	عامل الإنتاج
توفير الأمن داخل المؤسسة	اليقظة والفتنة وتحمل المسؤولية	عامل الأمن
تنظيف المكتب وقاعة العمال	النظافة الكفاءة والأمانة	عامل النظافة

الهيكل التنظيمي



المحور السادس: النموذج الأولي



1- المادة الأولية المستخلصة من النباتات في المخبر



2- مادة أولية موجهة إلى المصانع والشركات



3- مادة مصنعة موجهة إلى المستهلك والأسواق

BMC

الموردون	الأنشطة الرئيسية	القيمة المقدمة	العلاقة مع العملاء	العملاء
المزارعين وموردين المستخلصات الطبيعية الموردين المتخصصين في معدات الإنتاج موزعي المواد الكيميائية	كهدف للعمل: إنتاج مثبت لتناكل الفولاذ بمستخلصات طبيعية كنشاط رئيسي تقوم به أولاً: جلب النباتات وغربلتها ثم طحنها ثانياً: إبراز أهم العناصر المتواجدة في تركيبها ثالثاً: استخلاص المواد الفعالة لحالة التأكسد تعينته في قارورات زجاجية أو قارورات الضغط	استخدام مثبت من النواتج الطبيعية ذات فعالية كبيرة صديقة للبيئة وغير مؤذية وهو بديل للمثبطات الصناعية مركبات قابلة للتحلل البيولوجي ولا تحتوي على معادن ثقيلة أو مواد سامة أخرى تستخدم في تثبيط تآكل المعادن في الأوساط الحمضية والقاعدية التوافق مع اللوائح ذو المعايير أداء متفوق السلامة والصحة المهنية	التواصل الفعال: استجابة سريعة للاستفسارات والاحتياجات وتوفير معلومات شاملة وشفافية حول المنتج والخدمات المقدمة تلبية احتياج العملاء الاستماع إلى ملاحظات العملاء واقتراحاتهم والاستفادة منها وأخذها بعين الاعتبار لتحسين جودة المنتج والخدمة المقدمة لهم توفير الخدمات وتتبع العملاء ما بعد البيع وحل المشاكل بفعالية وسرعة تسويق وإعلان على العمل والمنتج والتسويق للمبيعات التركيز على التقرب من العملاء ومعرفة متطلباتهم	شركات تصنيع الفولاذ الشركات الخاصة والمشاريع البناء التي تحتاج إلى حلول فعالة لحماية من التآكل للهياكل المعدنية شركات التصنيع والبناء : استهداف شركات التصنيع والمبيعات المتخصصة في توريد مثبطات التآكل للقطاع الصناعي شركات الصيانة والخدمات الصناعية
	الموارد الرئيسية الموارد البشرية عمال ذوات خبرة الموارد البشرية: تشمل التمويل لتطوير المشروع وتغطية التكاليف والبحث والتطوير موارد الشراكات : تعامل		القنوات القنوات: لتسويق منتجك تحليل السوق: فهم واضح لاحتياجات العملاء والتوجهات السوق وتنافسية الصناعة في كل الأسواق المحلية والعالمية	

	<p>مع شركات تزويد بالمواد الكيميائية ذات جودة مواد الخام</p>		<p>التسويق عبر الأنترنت والتواجد في المعارض والمؤتمرات المهنية والتعاون مع وكلاء التوزيع تطوير العلامة التجارية جعل العلامة التجارية مميزة ونعبر عن واقعية منتجك قم بتطوير موقع الإلكتروني احترافي ووجود قوي على وسائل التواصل الاجتماعي لتعزيز الوعي بالعلامة التجارية وجذب العملاء الإعلانات المطبوعة والإعلانات عبر وسائل الإعلام</p>	
<p>هيكل التكاليف التكاليف الثابتة غير متغيرة بناء على حجم الإنتاج: تكاليف الكراء الكهرباء الماء الاتصالات تكاليف الرواتب (أجور العمال) تكاليف غير ثابتة: المواد الأولية و النقل والتسويق والتوزيع</p>	<p>مصادر الأرادات مبيعات المنتج يمكن توفير خدمات الاستشارات والتدريب في مجال صناعة مثبتبات التأكل لفولاذ عن طريق العقود والتعاقدات توقيع عقود مع العملاء أو شركات أخرى لتوريد مثبتبات التأكل</p>			