

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
**UNIVERSITÉ de BLIDA 1 Faculté de Technologie Département de Génie des  
Procédés**



# Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER EN GENIE DES PROCEDES**

**Spécialité : génie des procédés des polymères**

Intitulé du mémoire

**Modélisation de l'inhibiteur de la corrosion acide d'un acier  
par un polymère**

Présenter par :

BOUAIACHE ABDELHAKIM

Promotrice : H. HAMITOUCHE

HABBICHE AISSA

Année universitaire 2023/2024

## ABSTRACT :

In this work, we focused on the extraction and physicochemical characterization of chitosan and studied its inhibitory power against the corrosion of mild steel in 1M HCl using EIS and Tafel methods. The obtained results show that chitosan possesses certain inhibitory efficiency, evidenced by the increase in  $R_t$  and the decrease in CPE and corrosion current density. Furthermore, we attempted to apply artificial neural networks (ANN) of the MLP type to predict the efficiency of our inhibitor using MATLAB software. According to the regression curves (global, training, testing), we observe that the majority of the points are aligned on the first bisector, which confirms the robustness of our model established by

### ملخص:

في هذا العمل، اهتمنا باستخراج الكيتوسان وتوصيفه الفيزيائي الكيميائي، ودراسة قدرته المثبطة لتآكل الفولاذ الطري في 1M HCl باستخدام تقنيات EIS و Tafel. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن الكيتوسان يمتلك كفاءة تثبيطية معينة تتجلى في زيادة  $R_t$  وانخفاض CPE وكثافة تيار التآكل. علاوة على ذلك، حاولنا تطبيق الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) من نوع MLP للتنبؤ بكفاءة المثبط باستخدام برنامج MATLAB وفقاً لمنحنيات الانحدار (العامة، التقديم، الاختبار)، نلاحظ أن غالبية النقاط مصفوفة على البيسكتريس الأولى مما يؤكد متانة نموذجنا الذي تم إنشاؤه بواسطة الشبكات العصبية الاصطناعية من نوع (MLP).

artificial neural networks of the MLP type.

## Résumé :

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à l'extraction du chitosane et leur caractérisation physicochimique et a étudié son pouvoir inhibiteur vis-à-vis la corrosion de l'acier doux dans HCl 1M par EIS et Tafel. Les résultats obtenus montrent que le chitosane possède une certaine efficacité inhibitrice traduite par l'augmentation de  $R_t$  et la diminution de CPE et la densité de courant de corrosion. Par ailleurs, on a essayé de s'initier à l'application de réseaux de neurones artificiels (RNA) type MLP pour prédire l'efficacité de notre inhibiteur à l'aide de logiciel MATLAB. D'après les courbes de régression (global, app, test), on remarque que la majorité des points sont alignés sur la première bissectrice ce qui confirme la robustesse de notre modèle établi par les réseaux de neurones artificiels de type (MLP).

## REMERCIEMENTS

Après avoir rendu grâce à Dieu le Tout-Puissant, nous tenons à remercier vivement tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé à la rédaction de ce mémoire.

Il s'agit plus particulièrement de :

Mme. **Hamitouche**, notre promotrice, **Mr.Ibrir** et **Mlle.Belkacem** , pour ses orientations et ses conseils. Il a su nous transmettre sa rigueur et ses connaissances et son expertise.

Il fut d'une aide précieuse dans les moments les plus délicats.

## Dedicase

À la mémoire de mon père, dont l'amour, la sagesse et les enseignements continuent de guider mes pas, bien qu'il ne soit plus parmi nous. Son souvenir reste à jamais gravé dans mon cœur, et ce travail est dédié à son honneur.

À ma mère, pour son soutien indéfectible, son amour inconditionnel et ses sacrifices innombrables. Sa force et sa bienveillance m'ont inspiré et soutenu tout au long de ce parcours.

À mes amis et collègues de l'université (Z, WASH, MIZ, KLAY....) , pour leur camaraderie, leur encouragement et les moments partagés qui ont rendu ces années d'études inoubliables. Leur soutien et leurs échanges ont été d'une grande aide dans la réalisation de ce mémoire. Ce mémoire est le reflet de leur amour, de leur dévouement et de la solidarité de tous ceux qui m'ont accompagné dans cette aventure académique.

## Listes des figures

### Chapitre I

Généralité sur la corrosion Les moyens de protection contre la corrosion

**Figure 1.1.** Classement des inhibiteurs de corrosion

**Figure 1.2.** Structure chimique de la chitine

**Figure 1.3.** Structure chimique de chitosane

**Figure 1.4.** réseaux RBF

### Chapitre II

**Figure 2.1.** Carapaces de crevettes séchée.

**Figure 2.2.** Etapes de l'extraction chimique du chitosane.

**Figure 2.3.** Déminéralisation

**Figure 2.4.** Déprotéinisation.

**Figure 2.5.** Produit après blanchiment

**Figure 2.6.** Test de solubilité de chitosane

**Figure 2.7.** Schéma de l'électrode de travail

**Figure 2.8.** Schéma de la chaîne de mesure et la cellule électrochimique

### Chapitre III

**Figure 3.1.** spectre de transmittance de chitine

**Figure 3.2.** spectre de transmittance de chitosane

**Figure 3.3.** Diagramme de Nyquist de l'interface acier/solution, en absence et en présence de différentes concentrations D'inhibiteur dans HCl 1M à 25°C

**Figure 3.4.** Courbes de polarisation potentiodynamique de l'acier X60 dans HCl 1M à 25°C sans et avec inhibiteur, à différentes concentrations

**Figure 3.5.** interface crée par logiciel MATLAB

**Figure 3.6.** Courbe d'apprentissage de régression des données calculées en fonction de données expérimentales .

**Figure 3.7.** Courbe globale de régression des données calculées en fonction de données expérimentales

**Figure 3.8.** Courbe teste de régression des données calculées en fonction de données expérimentales

## Liste des tableaux

**Tableau1.1:** L'étude de capacité inhibitrice de chitosane par quelques chercheurs

**Tableau1.2:**Sources potentielles de chitine (Tolaimateet al,2003)

**Tableau 2.1 :** Produits chimiques utilisés, leurs rôles et origines lors de l'extraction du chitosane

**Tableau 2.2 :** Le matériel utilisé dans la spectrometrie IR

**Tableau 2.3 :** Composition chimique en pourcentage massique des différents éléments de l'acier

**Tableau 2.4 :** Paramètres des essais électrochimiques

**Tableau3.1 :** Les caractéristiques électrochimiques de l'interface : acier X60/ HCl 1M, à 25°C sans et avec inhibiteur, à différentes concentrations, obtenues par la méthode de EIS....

**Tableau 3.2:**Les paramètres de corrosion de X60 obtenus par la méthode de la résistance de polarisation, sans et avec différentes concentrations d'inhibiteur, dans HCl1M a25°C.

**Tableau 3.4 :** La couche d'entrais que contienne 4 éléments (Iw1, Iw2, Iw3, Iw4) et la couche caches bi

**Tableau 3.4 :** La couche d'entrais que contienne 4 éléments (Iw1, Iw2, Iw3, Iw4) et la couche caches bi

**Tableau 3.3 :** La couche sortie qui contienne 5 éléments (jw1,jw2,jw3,jw4,jw5) avec ()bj environment

## Sommaire :

### Resume :

<b>Introduction général :</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 :INHIBITION DE LA CORROSION ACIDE DES ACIERS</b> .....	<b>2.</b>
1.1 Introduction : .....	2.
1.2 Les moyens de protection contre la corrosion : .....	2.
1.3 Lutte contre la corrosion par l'utilisation des inhibiteurs de corrosion : .....	3.
<b>1.3.1 Définition :</b> .....	<b>3</b>
<b>1.3.2 Propriétés des inhibiteurs :</b> .....	<b>4</b>
<b>1.3.3 Utilisation :</b> .....	<b>4</b>
<b>1.3.4 Classes d'inhibiteurs :</b> .....	<b>4</b>
1.4 Inhibition de la corrosion par les composés organiques en milieu acide : .....	11
<b>1.4.1 Types d'adsorption :</b> .....	<b>11</b>
<b>○ Méthodes d'étude des inhibiteurs de corrosion :</b> .....	<b>12</b>
<b>1.4.2 Méthodes d'étude des inhibiteurs de corrosion :</b> .....	<b>13</b>
1.5 Généralités sur le chitosane : .....	16
<b>1.5.1 Principales applications du chitosane :</b> .....	<b>19</b>
1.6 Application de l'intelligence artificielle (AI) dans l'inhibition de la corrosion :19	
<b>1.6.1 Optimisation de la Formulation des Inhibiteurs :</b> .....	<b>19</b>
<b>1.6.2 Prévision de la Performance des Inhibiteurs :</b> .....	<b>20</b>
<b>1.6.3 Détection et Surveillance de la Corrosion :</b> .....	<b>20</b>
<b>1.6.4 Modélisation et Simulation :</b> .....	<b>20</b>
<b>1.6.5 Analyse de Big Data :</b> .....	<b>20</b>
1.7 Généralités sur Les réseaux de neurones artificiels (RNA) : .....	21
<b>1.7.1 Conception de nouveaux inhibiteurs de corrosion :</b> .....	<b>23</b>
<b>1.7.2 Optimisation des formulations d'inhibiteurs :</b> .....	<b>23</b>
<b>1.7.3 Prédiction de l'efficacité des inhibiteurs :</b> .....	<b>23</b>

1.7.4	<b>Optimisation des conditions de traitement :</b>	<b>23</b>
1.8	difintion de RNA:	23
1.9	Structure de RNA:	24
1.10	Architectures de réseaux de neurones Artificiels:	25
1.10.1	<b>Les reseaux boucles:</b>	<b>25</b>
1.10.2	<b>Reseaux non boucles:</b>	<b>25</b>
<b>CHAPITRE 2 : MATERIELS ET METHODES</b>		
2.1	Introduction :	29
2.2	Extraction du chitosane	29
2.2.1	<b>Extraction de la chitine :</b>	<b>31</b>
2.2.2	<b>Extraction de chitosane :</b>	<b>32</b>
2.3	Caractérisation du chitosane	33
2.3.1	<b>Test de solubilité :</b>	<b>33</b>
2.3.2	<b>2Caractérisation par FTIR (infrarouge à transformée de Fourier) :</b>	<b>33</b>
2.3.3	<b>Par la détermination de degré de désacétylisation (DDA) :</b>	<b>35</b>
2.4	Étude de la corrosion :	35
2.4.1	<b>Matériau utilisé :</b>	<b>35</b>
2.4.2	<b>Préparation de l'électrode de travail</b>	<b>35</b>
2.5	Modélisation par les raisons de neurone artificielle :	38
2.5.1	<b>Collection de base de données :</b>	<b>38</b>
2.5.2	<b>conception de réseau de neurone artificiel :</b>	<b>39</b>
<b>CHAPITRE 3 :RESULTATS ET DISCUSSION</b>		
3.1	Introduction :	42
3.2	Extraction de la chitine et du chitosane	42
3.2.1	<b>Caractérisation de la chitine et du chitosane</b>	<b>42</b>
3.3	Détermination du pouvoir inhibiteur du chitosane :	44
3.3.1	<b>Par EIS :</b>	<b>44</b>



<b>3.3.2</b>	<b>Par Tafel :</b> .....	<b>47</b>
3.4	Modélisation intelligente de l'inhibition de la corrosion : .....	49
	<b>Conclusion :</b> .....	<b>52</b>

## INTRODUCTION GENERALE

Dans un monde où les industries de transformation et de production sont confrontées quotidiennement au problème de la corrosion, imaginer des solutions efficaces et durables est primordial. Le chitosane, un polymère naturel issu de la chitine, est apparu comme un candidat prometteur pour agir comme inhibiteur de corrosion dans divers procédés industriels. Ses caractéristiques uniques (biodégradabilité, biocompatibilité et capacité à former un film) en font un choix attrayant pour la prévention de la corrosion des surfaces métalliques. Cependant, l'utilisation efficace du chitosane nécessite une compréhension approfondie des mécanismes d'action et du comportement dans divers environnements de corrosion.

Parallèlement, L'application des réseaux de neurones artificiels (RNA) dans le domaine des inhibiteurs de corrosion offre de nouvelles opportunités passionnantes dans la recherche de solutions contre la corrosion. L'intégration de l'intelligence artificielle dans l'évaluation et l'optimisation des inhibiteurs de corrosion offre généralement de nouvelles perspectives vers une protection plus efficace et proactive contre la corrosion dans les processus industriels.

Cette étude explore la synergie qui existe entre l'inhibiteur du chitosane et l'intelligence artificielle pour le développement de stratégies innovantes de protection contre la corrosion. Nous combinons les avantages intrinsèques du chitosane avec les capacités d'optimisation prédictive par RNA et proposons des solutions plus efficaces et durables pour prévenir la corrosion et garantir la durée de vie des équipements et des installations industrielles.

Dans le cadre de ce mémoire nous nous sommes intéressés à l'utilisation du chitosane extrait chimiquement et caractérisé comme inhibiteur de la corrosion de l'acier ordinaire dans un milieu HCl 1 M à l'aide de techniques électrochimiques (EIS et Tafel) d'une part et de prédire l'efficacité de notre inhibiteur par les réseaux de neurones artificiels (RNA) d'autre part.

Le travail que nous présentons dans ce mémoire est subdivisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur l'inhibition de la corrosion, les généralités sur le chitosane et sur les réseaux de neurones artificiels (RNA). Le second chapitre traite l'aspect expérimental de ce mémoire. Les résultats expérimentaux et les discussion sont exposés dans le troisième chapitre. Enfin, une conclusion générale sur l'ensemble de ce travail viendra clore notre étude [1][2][3][4][5].

## CHAPITRE 1

### INHIBITION DE LA CORROSION ACIDE DES ACIERS

La corrosion métallique est le phénomène suivant lequel les métaux et les alliages ont tendance, sous l'action de réactifs chimiques ou d'agents atmosphériques, à retourner vers leur état originel d'oxyde, de sulfure, de carbonate ou de tout autre sel plus stable dans le milieu ambiant [6].

L'étude de la corrosion ne demande pas à être justifiée, les pertes de métaux et le coût des conséquences de la corrosion sont très importants pour tous les pays industrialisés [7]. Les coûts de la corrosion représentent trois à quatre pour-cent du produit national brut. Ces chiffres prennent en compte : le remplacement des matériaux corrodés, les équipements, les réparations et les pertes de production [8].

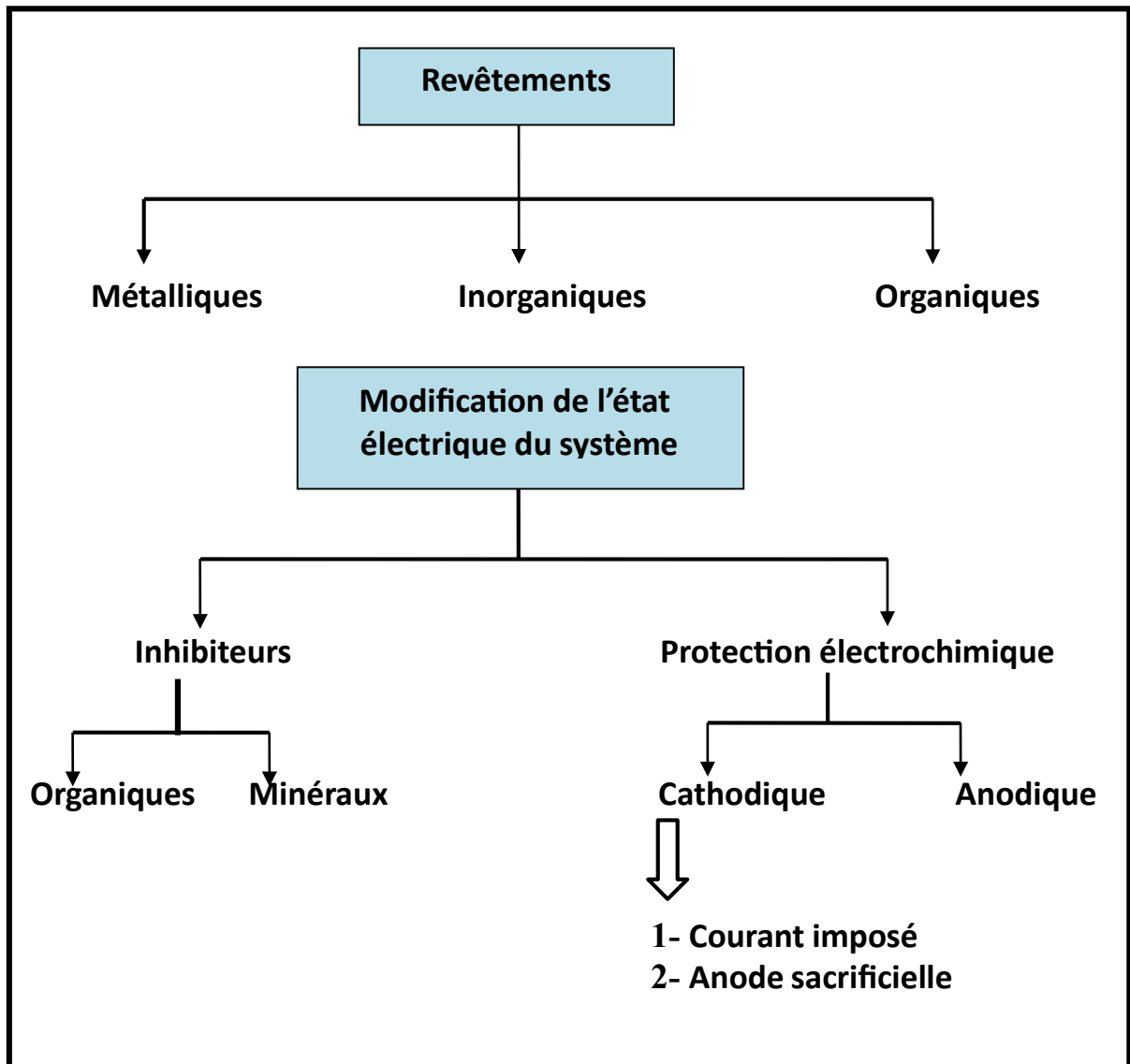
On estime qu'elle détruit un quart de la production annuelle mondiale d'acier, ce qui représente environ 150 millions de tonnes par an ou encore 5 tonnes par secondes [9]. Or, la corrosion ne se limite pas à l'acier, mais affecte tous les métaux ainsi que les polymères et céramiques. Elle résulte d'interactions chimiques et/ou physiques entre le matériau et son environnement.

La lutte contre la corrosion doit être une préoccupation constante, depuis la conception des équipements jusqu'à leur entretien quotidien. Si les moyens à mettre en œuvre sont variés et dépendent en grande partie des situations d'utilisation particulières, le but recherché est le même: enrayer la dégradation des équipements pour augmenter la durée de leur vie, en empêchant que se produisent les réactions électrochimiques qui entraînent une dissolution et une attaque du métal ; autrement dit, réduire ou même annuler la circulation des électrons de l'anode vers la cathode [10].

#### Les moyens de protection contre la corrosion

Etant donné que la corrosion résulte de l'action de deux partenaires, le métal ou l'alliage d'une part, la solution d'autre part, il sera possible de lutter contre ces effets par :

- Protection par revêtements ;
- Protection électrochimique ;
- Protection par inhibiteurs de corrosion [11].



**Figure 1.1** : Les moyens de protection contre la corrosion [12].

## Lutte contre la corrosion par l'utilisation des inhibiteurs de corrosion

### 1.2.1. Définition

Selon la norme ISO 8044, un inhibiteur est une “substance chimique ajoutée au système de corrosion à une concentration choisie pour son efficacité ; celle-ci entraîne une diminution de la vitesse de corrosion du métal sans modifier de manière significative la concentration d’aucun agent corrosif contenu dans le milieu agressif” [13].

### 1.2.2. Propriétés des inhibiteurs

D'une manière générale, un inhibiteur doit :

- abaisser la vitesse de corrosion d'un métal, sans en affecter les caractéristiques physico-chimiques, en particulier la résistance mécanique (par exemple, risque de fragilisation par l'hydrogène en milieu acide) ;
- être stable en présence des autres constituants du milieu, en particulier vis-à-vis des oxydants ;
- être stable aux températures d'utilisation ;
- être efficace à faible concentration ;
- être compatible avec les normes de non-toxicité ;
- être peu onéreux [14].

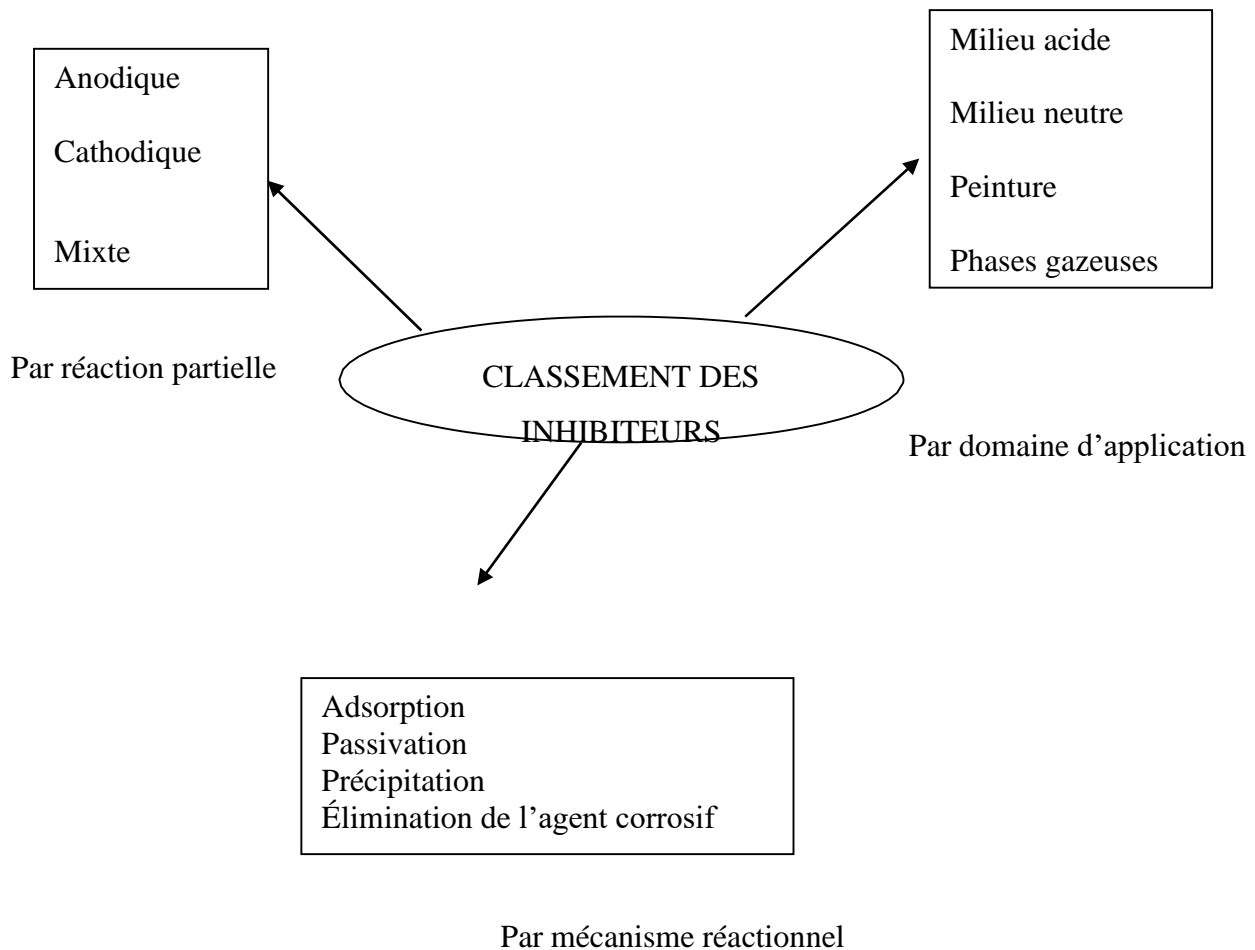
### 1.2.3. Utilisation

Les inhibiteurs ont plusieurs domaines traditionnels d'application :

- ✓ Le traitement des eaux (eaux sanitaires, eaux des procédés industriels, eaux de chaudières, etc.) ;
- ✓ L'industrie du pétrole : forage, extraction, raffinage, stockage et transport. Dans cette industrie, l'utilisation des inhibiteurs de corrosion est primordiale pour la sauvegarde des installations ;
- ✓ Les peintures où les inhibiteurs de corrosion sont des additifs assurant la protection anticorrosion des métaux.
- ✓ La protection temporaire des métaux, que ce soit pendant le décapage acide, le nettoyage des installations ou le stockage à l'atmosphère (inhibiteurs volatils, incorporation aux huiles et graisses de protection temporaire) ou pour le traitement des huiles de coupe [15].

### 1.2.4. Classes d'inhibiteurs

Il existe plusieurs façons de classer les inhibiteurs de corrosion. Généralement, ils sont classés en fonction de leur domaine d'application, de la formulation des produits (inhibiteur organique, inhibiteur inorganique), de la réaction électrochimique inhibée (inhibiteur cathodique, inhibiteur anodique ou mixte), ou du mécanisme réactionnel mis en jeu (adsorption et/ou formation d'un film) [13, 16, 16,17]. Néanmoins, cette classification n'est pas tout à fait adéquate car un même inhibiteur peut présenter à la fois des caractéristiques propres à chaque groupe de classement.



**Figure 1.2 :** Classement des inhibiteurs de corrosion.

a) Par domaine d'application

Dans la classification relative au domaine d'application, on peut distinguer les inhibiteurs de corrosion utilisés en milieux aqueux, organiques ou gazeux. Ceux utilisés en milieux aqueux sont choisis en fonction du pH du milieu : en milieu acide, ils sont utilisés afin d'éviter l'attaque chimique de l'acier lors d'une opération de décapage ou de détartrage et en milieu neutre/alcalin, ils sont souvent utilisés pour protéger les conduites des circuits de refroidissement. Les inhibiteurs utilisés en milieu organique sont incorporés dans les lubrifiants pour moteurs, dans l'essence ou dans les peintures. Les inhibiteurs en phase gazeuse sont employés pour protéger les objets métalliques pendant leur transport et stockage. Pour cela, des composés organiques ayant une pression de vapeur élevée sont souvent utilisés [16].

Dans la classification relative à la formulation des produits, on peut distinguer les inhibiteurs organiques et les inhibiteurs minéraux.

a) Par la nature de l'inhibiteur

### b-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 (-NH<sub>2</sub>), hydroxyle (-OH), mercapto (-SH), phosphonate (-PO<sub>3</sub>H<sub>2</sub>), sulfonate (-SO<sub>3</sub>H), carboxyle (-COOH) et leurs dérivés (les groupes fonctionnels usuels, permettant de se fixer sur la surface du métal).

### b-2) Les inhibiteurs minéraux

Les inhibiteurs minéraux sont utilisés en milieu neutre/alcalin mais rarement en milieu acide. Ce sont souvent leurs produits de dissociation (anion ou cation) qui sont efficaces en tant qu'inhibiteurs de corrosion. Parmi les anions inhibiteurs, on trouve les chromates, les phosphates, les molybdates, les nitrates, les nitrites, les silicates, etc.... et parmi, les cations inhibiteurs on trouve essentiellement les ions Ca<sup>2+</sup> et Zn<sup>2+</sup>. Les inhibiteurs minéraux sont de moins en moins utilisés en raison de leur toxicité. Leur emploi se limite à certains systèmes en circuit fermé [14, 16,18].

#### b) Par réaction partielle

Dans la classification relative au mécanisme d'action électrochimique, on peut distinguer les inhibiteurs anodiques, cathodiques ou mixtes. Les inhibiteurs de corrosion forment une couche barrière sur la surface métallique, qui modifie les réactions électrochimiques en bloquant soit les sites anodiques (siège de l'oxydation du métal) soit les sites cathodique (siège de la réduction de l'oxygène en milieu neutre aéré ou siège de la réduction du proton H<sup>+</sup> en milieu acide) [19].

### c-1) Les inhibiteurs anodiques

Les inhibiteurs anodiques diminuent la densité de courant de dissolution du métal et déplacent le potentiel de corrosion dans le sens positif. Ce type d'inhibiteurs doit être utilisé en quantité suffisante car dans le cas contraire, ils peuvent accentuer la corrosion des zones non

protégées.

### c-2) Les inhibiteurs cathodiques

Les inhibiteurs cathodiques, en revanche, diminuent la densité de courant de réduction du solvant et déplacent le potentiel de corrosion dans le sens négatif. Du fait de leur mode d'action, les inhibiteurs cathodiques sont considérés comme plus sûrs que les inhibiteurs anodiques car ils ne risquent pas de favoriser la corrosion localisée.

### c-3) Les Inhibiteurs mixtes

Les inhibiteurs mixtes diminuent la vitesse des deux réactions partielles en modifiant peu le potentiel de corrosion [16].

Les inhibiteurs de corrosion qui augmentent la résistance ohmique de l'électrolyte sont considérés, dans certains cas, comme inhibiteurs filmant (anodique et cathodique). La résistance de la solution augmente suite à la formation d'un film à la surface du métal. Lorsque le film est déposé sélectivement sur la surface anodique, le potentiel de corrosion se déplace vers des valeurs positives. Dans le cas où le film est déposé à la surface cathodique, le potentiel de corrosion balance vers des valeurs négatives.

Dans le cas de la formation d'un film sur les surfaces anodiques et cathodiques, le déplacement du potentiel de corrosion est du côté de la tendance prédominante.

Les inhibiteurs mixtes diminuent la vitesse des deux réactions partielles mais modifient peu le potentiel de corrosion [20,21].

### c) Par mécanisme réactionnel

Dans la classification liée au mécanisme réactionnel mis en jeu en fonction de leur mode d'action, on peut distinguer différents types d'inhibiteurs : ceux agissant par adsorption, par passivation ou par précipitation.

Les inhibiteurs agissant par adsorption sont en général les inhibiteurs organiques. Ils empêchent l'action du milieu agressif en se fixant sur la surface du métal. Leur fixation se fait principalement par la fonction active de l'inhibiteur ; cependant, les parties polaires peuvent être également adsorbées. Ceux qui agissent par adsorption chimique s'avèrent souvent plus efficaces que ceux agissant par adsorption physique, car le partage des électrons renforce la liaison entre le métal et l'inhibiteur. Généralement, en présence d'une chimisorption, la molécule inhibitrice agit comme donneur d'électrons alors que le métal agit comme accepteur



d'électrons.

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 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.

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 [13, 16 ,18].

#### Inhibition de la corrosion par les composés organiques en milieu acide

Dans les milieux acides, les inhibiteurs les plus utilisés sont des molécules de type organique, elles agissent d'abord par adsorption à la surface des métaux, avant même d'intervenir dans les processus réactionnels de corrosion pour en diminuer la vitesse par l'intermédiaire des principaux mécanismes suivants :

- Changement de la structure de double couche à l'interface métal/électrolyte ; les vitesses de réactions électrochimiques sont ainsi affectées [22].
- Formation d'une véritable barrière physique.
- Diminution de la réactivité du métal.
- Participation de l'inhibiteur aux réactions partielles à l'électrode.

Dans les solutions aqueuses, les molécules d'eau s'adsorbent à la surface du métal à cause de leur caractère polaire. Alors, les inhibiteurs organiques efficaces doivent donc déplacer les molécules d'eau adsorbées.

## Types d'adsorption

Les principaux modes d'adsorption des molécules organiques sont l'adsorption électrostatique (physique) et l'adsorption chimique.

### a) Adsorption physique

L'adsorption physique ou physisorption met en jeu des liaisons faibles, du type de forces de Van Der Waals (forces électrostatiques) qui se créent entre les ions ou les dipôles des molécules de l'inhibiteur et la surface du métal électriquement chargée.

L'adsorption des cations d'inhibiteur peut se faire d'une manière coopérative ou concurrentielle avec les ions halogénures [23]. Dans le cas de l'adsorption coopérative, les ions organiques sont adsorbés sur la surface du métal recouverte par un film d'ions halogènes déjà adsorbés. Dans l'autre cas, les ions du composé organique déplacent les molécules d'eau adsorbées et les remplacent avec les ions halogènes. En outre, la physisorption est un processus relativement rapide, indépendant de la température et caractérisé par une faible énergie d'adsorption.

### b) Adsorption chimique (chimisorption)

L'adsorption chimique est un mécanisme plus fréquent que le mécanisme de physisorption et conduit à une efficacité de l'inhibiteur plus importante. Il fait intervenir un transfert électronique entre les orbitales du métal et la molécule inhibitrice, ce qui engendre la formation de liaisons chimiques bien plus stables car basées sur des énergies de liaison plus importantes. On rencontre, généralement, le transfert molécule donneur/ métal accepteur ; il existe aussi le transfert où le métal est le donneur d'électrons et la molécule l'accepteur [24]. La chimisorption est un phénomène irréversible et spécifique pour chaque métal. C'est un processus rapide, dépendant de la température et caractérisé par une grande énergie d'activation.

Le transfert électronique est favorisé par la présence d'électrons libres comme ceux que l'on trouve dans les anions, dans les molécules neutres contenant une paire d'électrons libres ou dans les systèmes d'électrons  $\pi$  [24] associés à des doubles ou triples liaisons ou à des cycles aromatiques. La présence d'une liaison insaturée peut être très favorable à l'efficacité inhibitrice d'une molécule organique en milieu acide, puisque celle-ci peut alors s'adsorber indifféremment sur une

surface chargée positivement (électrons  $\pi$ ) ou négativement (cation).

La tendance à une forte adsorption augmente quand les électrons sont moins liés à l'atome donneur ; en effet plus les atomes fonctionnels ont tendance à former des liaisons avec le métal en donnant facilement des électrons, plus les inhibiteurs sont efficaces. Pour une série de molécules organiques qui ne diffèrent que par leurs atomes fonctionnels, l'adsorption et donc l'efficacité de l'inhibition augmente avec la diminution de l'électronégativité de ces atomes fonctionnels [25].

L'efficacité de l'inhibition augmente dans l'ordre suivant :



Souvent, d'autres facteurs tels que la structure de la molécule, et plus particulièrement les effets stériques, influencent l'adsorption des molécules organiques.

#### Isothermes d'adsorption

Les isothermes d'adsorption sont très importantes dans la détermination du mécanisme des réactions organo-électrochimiques. Les plus connus sont les isothermes de : Langmuir, Frumkin, Temkin, Freundlich, Flory-Huggins, Elawady...etc.

#### Méthodes d'étude des inhibiteurs de corrosion

Les méthodes d'étude des inhibiteurs de corrosion sont celles de la corrosion d'une manière générale, qu'elles soient électrochimiques ou non. Il faut distinguer entre essai à réaliser :

- a) Sur une surface métallique propre.
- b) Surface déjà recouverte par des produits de corrosion.

Certains essais électrochimiques de laboratoire sont difficiles à reproduire, dans des milieux artificiels, par suite de la formation d'une couche de produits, identique à celle formée dans les milieux naturels. Les essais dans les conditions (b) peuvent cependant s'avérer indispensables quand il s'agit d'utiliser l'inhibiteur pour stopper un processus de corrosion déjà établi. Parmi ces méthodes, on peut citer les méthodes suivantes. [27, 28,29].

## Méthodes d'étude des inhibiteurs de corrosion

### a) Méthode par perte de masse

Cette méthode relativement simple d'utilisation est préférée par rapport à d'autres types d'essais qui nécessitent l'utilisation d'instruments sophistiqués [30], mais ne permet pas l'approche des mécanismes mis en jeu lors de la corrosion. Elle consiste à exposer des échantillons de surface  $S$  à un milieu corrosif maintenue à température constante pendant un temps déterminé, et à mesurer la différence de masse des échantillons avant et après chaque essai.

### b) Méthode électrochimique

La technique de perte de poids, ne permet pas l'approche des mécanismes mis en jeu lors de la corrosion. Cependant, les techniques électrochimiques constituent une méthode plus complète puisqu'elles étudient la base même du phénomène de corrosion, le processus électrochimique. L'aspect quantitatif de ces techniques (courbes de polarisation à vitesse de balayage modérée, spectroscopie d'impédance électrochimique,...) permet d'accéder à des vitesses de réaction et des valeurs de paramètres physiques décrivant l'état du système (capacité de double couche, résistance de transfert de charges, capacité du film,...).

#### b-1) Mesure du potentiel de corrosion

Elle indique le type de l'inhibiteur (anodique- cathodique) suivant le sens de déviation du potentiel par rapport au potentiel mesuré en l'absence d'inhibiteurs. Si l'inhibiteur a un caractère mixte, aucune indication n'est donnée par la faible variation du potentiel.

#### b-2) Tracé des courbes transitoires intensité-potentiel

Elle permet de confirmer les indications données par l'évolution du potentiel de corrosion et de les préciser en distinguant l'influence de l'inhibiteur sur chacune des réactions élémentaires, anodique et cathodique, à l'électrode, il peut également en utilisant la partie linéaire des transformations semi- logarithmique  $E = f(\log i)$ , qui permettent d'accéder à la valeur de la densité de courant de corrosion (loi de Tafel). Il faut toutefois rappeler que :

- Les conditions d'adsorption de l'inhibiteur à la surface peuvent être modifiées par une polarisation croissante de l'électrode : le taux de recouvrement peut varier avec le potentiel appliqué, l'inhibiteur peut désorber à un certain potentiel, etc.
- L'interprétation de la courbe  $I = f(E)$  doit être faite en tenant compte de ces possibilités ;

Le courant mesuré en présence d'inhibiteur dépend de la surface géométrique de l'échantillon et ne donne pas nécessairement la densité de courant de dissolution du métal, en particulier si l'adsorption de l'inhibiteur conduit à une localisation du processus de corrosion (taux de recouvrement  $\theta$ ).

### b-3) Mesure de la résistance de polarisation par le tracé de la courbe $I = f(E)$ au voisinage du potentiel de corrosion

Cette méthode est rapide et particulièrement adaptée à l'étude de l'efficacité inhibitrice d'une molécule dont l'effet n'est pas connu (tri de composés). Sa validité doit être vérifiée avec soin dans le cas particulier de chaque système étudié. Elle peut également permettre un suivi dans le temps du comportement de l'inhibiteur. Cependant cette technique ne permet pas de différencier les phénomènes réactionnels mis en jeu lors de l'inhibition de la corrosion.

### b-4) La spectroscopie d'impédance électrochimique

La spectroscopie d'impédance électrochimique est une méthode non-stationnaire qui permet d'avoir des informations sur les étapes élémentaires qui

constituent le processus électrochimique global.

La méthode d'impédance est une des puissantes techniques utilisées dans le domaine de l'électrochimie et des matériaux. Elle donne des renseignements sur les propriétés de transport de charge au sein des matériaux et des phénomènes électrochimiques qui se produisent aux interfaces électrode- solution.

Son principe consiste à superposer au potentiel de l'électrode une modulation de potentiel sinusoïdale de faible amplitude et à suivre la réponse en courant pour différentes fréquences du signal perturbateur. La réponse en courant est également sinusoïdale, superposée à un courant stationnaire mais déphasée d'un angle  $\varnothing$  par rapport au potentiel. Inversement, un courant peut être imposé et le potentiel enregistré.

#### Intérêt du chitosane dans la problématique de corrosion

L'emploi de composés organiques contenant des groupements polaires comme inhibiteurs de corrosion est déjà largement reconnu en raison de leur capacité d'adsorption aux substrats métalliques [31-32]. Les substances organiques polymériques présentent aussi un intérêt majeur, puisque leur caractère à la fois hydrophobe et hydrophile leur permet de former une barrière d'inhibition compacte à l'interface métal/solution [33-34]. Des composés ayant la capacité de se polymériser à la surface même du métal ont également été investigués [35, 36].

Le chitosane est un polymère polaire et plusieurs de ses caractéristiques exposées plus haut, le rendent aussi particulièrement intéressant vis-à-vis des solutions de protection contre la corrosion.

D'abord, sa grande affinité pour les métaux constitue un argument de poids quant à ses possibilités d'interactions avec les structures métalliques à protéger. De plus, sa grande souplesse pour les transformations chimiques rend possible sa modification selon les propriétés recherchées pour diverses applications. Ainsi, puisque le chitosane est un polymère organique non toxique contenant des groupements polaires, quelques chercheurs ont déjà étudié sa capacité et celle de certains de ses dérivés à inhiber la corrosion [37-38].

De façons générales les différents travaux relatifs à l'inhibition de la corrosion par le chitosane ont mis l'accent principalement sur l'influence des certains paramètres comme la concentration, la température et le temps

d'immersion. Le tableau 1.1 regroupe les études de quelques chercheurs sur la capacité d'inhibitrice de chitosan.

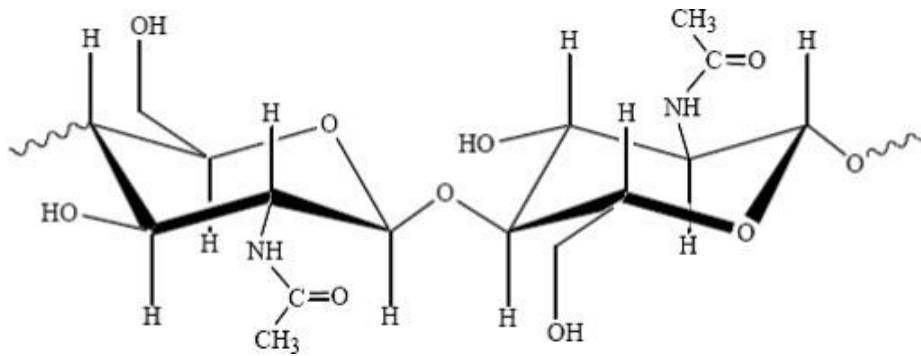
**Tableau 1.1 :** L'étude de capacité inhibitrice de chitosane par quelques chercheurs

Reference	Inhibiteur	HCl (M)	T(°C)	Efficacité (%)
[37]	16-200 ppm	0.5	25	20 à 90
[39]	$10^{-8}$ - $10^{-4}$ M	1	25	88.5 et 79.45
[41]	50-250 ppm	1	35	66 – 93
[62]	0.06-0.36 g/l	0.5	21	54 – 89
[61]	0.4-1.6 g/l	0.1	25	76 – 93
[60]	0.1-1.5 g/l	1	25	49.3 – 66.83
[58]	100-500 ppm	1	25-55	79 – 88
[59]	0.4-4 $\mu$ M	0.1	30-70	65 – 68

### Généralités sur le chitosane :

Le chitosane, dérivé désacétylé de la chitine, est un copolymère linéaire  $\beta(1\rightarrow4)$  de N- Acétyl D-Glucosamine. Il se trouve plus rarement dans la terre : il n'est présent que dans la paroi d'une classe particulière de champignons et chez quelques insectes. La chitine est ainsi la source la plus intéressante du chitosane.

La chitine est un polymère de glucose composé du monomère N-Acétyl-D-Glucosamine. Plus précisément, ce sont des molécules de glucoses dont un groupement N- Acétyle est attaché au carbone 2 du sucre. Les monomères sont reliés entre eux par des liens  $\beta 1, 4$  (voir la figure 1.3). La chitine se retrouve rarement à l'état pur dans la nature. La plupart du temps, elle forme des liens faibles non-covalents avec des protéines des organismes qui l'ont produite. La chitine est un polymère insoluble dans les solvants organiques. Elle ne peut être dissoute que dans des solutions acides très concentrées. [18]



**Figure 1.3** : Structure chimique de la chitine.

La chitine est le polymère de structure des exosquelettes de tous les arthropodes (crustacés et insectes) et des endosquelettes des céphalopodes (seiches, calamars,...). Elle provient principalement de la carapace de la crevette. Le tableau 1.1 résume les différences sources de la chitine.

Ces deux biopolymères (Chitine et chitosane) se distinguent par le degré d'acétylation. En générale, on parle de chitosane lorsque plus de 50 % des fonctions glucosamines sont désacétylé.

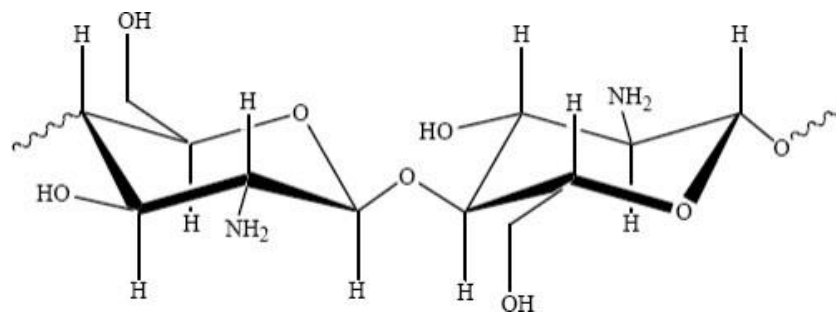
Le chitosane et la chitine se distinguent par leur différence de solubilité. Le chitosane est soluble dans des solutions aqueuses acides diluées ( $pK_a \sim 6.3$ ) alors que la chitine demeure pratiquement insoluble dans les milieux aqueux et la plupart des solvants courants. Cette propriété de solubilité accrue du chitosane le rend exploitable dans divers domaines d'application.

**Tableau 1.2** : Sources potentielles de chitine (Tolaimate et al, 2003) [42]

Sources de chitine	Teneur en chitine (%)
Bernacle	7
Crabe marbré	10
Crabe rouge	10
Crabe araignée	16
Homard	17



Homard sauterelle	25
Langouste	32
Ecrevisse	36
Crevette	22
Seiche	20
Calamar	40



**Figure 1.4 :** Structure chimique de chitosane.

### **Principales applications du chitosane :**

La chitine et le chitosane possèdent de nombreuses propriétés physico-chimiques et biologiques intéressantes (Biocompatibilité, bioactivité et biodégradabilité) qui ont permis d'entrevoir de nombreuses applications potentielles. Le chitosane a suscité un intérêt plus vif que la chitine. Les premières applications ont été développées en pharmacologie, cosmétologie, et surtout en médecine.

### **Application de l'intelligence artificielle (AI) dans l'inhibition de la corrosion**

L'intégration de l'intelligence artificielle l'IA dans le domaine des inhibiteurs de corrosion offre de nombreuses perspectives pour améliorer l'efficacité et la durabilité des matériaux. Les avancées technologiques permettent de mieux comprendre les mécanismes de corrosion, de concevoir des inhibiteurs plus performants, et de gérer la corrosion de manière proactive et efficace. Ces développements sont essentiels pour de nombreuses industries, notamment celles où la corrosion pose des défis majeurs pour la maintenance et la sécurité des infrastructures. L'application de l'intelligence artificielle

(IA) dans les inhibiteurs de corrosion est une approche révolutionnaire qui améliore la conception, la performance et la gestion de ces composés. Voici quelques façons dont l'IA est utilisée dans ce contexte.

#### Optimisation de la Formulation des Inhibiteurs

L'IA, en particulier les algorithmes de machine Learning (apprentissage automatique), est utilisée pour optimiser la formulation des inhibiteurs de corrosion. En analysant de vastes ensembles de données sur les compositions chimiques et leurs performances, l'IA peut prédire les formulations les plus efficaces sans nécessiter de nombreux tests expérimentaux.

#### Prévision de la Performance des Inhibiteurs

Les modèles d'apprentissage machine peuvent être entraînés sur des bases de données existantes pour prédire la performance des nouveaux inhibiteurs de corrosion dans diverses conditions environnementales. Cela permet d'économiser du temps et des ressources en réduisant le nombre d'expériences nécessaires pour valider de nouvelles substances.

#### Détection et Surveillance de la Corrosion

Les techniques de vision par ordinateur et d'analyse de données assistées par IA sont utilisées pour détecter les signes précoces de corrosion. Les capteurs intelligents et les systèmes de surveillance en temps réel peuvent utiliser des algorithmes d'IA pour analyser les données provenant des infrastructures et anticiper les besoins en maintenance avant que des dégradations majeures ne surviennent.

#### Modélisation et Simulation

Les simulations assistées par IA permettent de modéliser les interactions chimiques complexes entre les inhibiteurs de corrosion et les matériaux qu'ils protègent. Ces simulations peuvent aider à comprendre les mécanismes d'action des inhibiteurs à un niveau moléculaire, facilitant ainsi la conception de nouveaux composés plus efficaces.

#### Analyse de Big Data

L'analyse de big data permet de gérer et d'analyser les vastes quantités de données générées par les tests de corrosion et les essais de matériaux. Les techniques de data mining et d'IA peuvent identifier des tendances et des relations cachées dans ces données, aidant les chercheurs à découvrir de nouveaux inhibiteurs potentiels et à améliorer ceux existants.

## Généralités sur Les réseaux de neurones artificiels (RNA)

L'inspiration des réseaux de neurones artificiels remonte à 1890 où W. James, célèbre psychologue américain, introduit le concept de mémoire associative. Il propose ce qui deviendra une loi de fonctionnement pour l'apprentissage des réseaux de neurones, connue plus tard sous le nom de loi de Hebb. Quelques années plus tard, en 1949, J. Mc Culloch et W. Pitts[1] donnent leurs noms à une modélisation du neurone biologique (un neurone automatique comportement binaire). Ce sont les premiers à montrer que des réseaux de neurones formels simples peuvent réaliser des fonctions logiques, arithmétiques et symboliques complexes. En 1949, D. Hebb, physiologiste américain, présente les propriétés des neurones par le conditionnement chez l'animal. Par exemple, nourrir tous les jours à la même heure un chien entraîne chez cet animal la sécrétion de salive à cette heure précise même en l'absence de nourriture. La loi de modification des propriétés des connexions entre neurones qu'il propose explique en partie ce type de résultats expérimentaux.

Les premiers succès de cette discipline remontent à 1957, lorsque F. Rosenblatt développe le modèle du Perceptron. Il construit le premier neuro-ordinateur basé sur ce modèle et l'applique au domaine de la reconnaissance des formes. À cette époque, les moyens à sa disposition étaient limités et c'était une prouesse technologique que de réussir à faire fonctionner correctement cette machine plus de quelques minutes.

En 1960, l'automaticien Widrow développe le modèle Adaline (Adaptative Linear Element). Dans sa structure, le modèle ressemble au Perceptron, cependant la loi d'apprentissage est différente. Celle-ci est à l'origine de l'algorithme de rétropropagation de gradient très utilisé aujourd'hui.

En 1969, M. Minsky et S. Papert publient un ouvrage qui met en exergue les limitations des réseaux de neurones artificiels.

Ces limitations concernent l'impossibilité de traiter des problèmes non linéaires en utilisant ce modèle. Quelques années d'ombre se sont ensuite succédées de 1967 à 1982.

Le renouveau de cette discipline reprend en 1982 grâce à J. J. Hopfield, un physicien reconnu. Il présente une théorie du fonctionnement et des possibilités des réseaux de neurones. Il faut remarquer la présentation anticonformiste de son article. Alors que les auteurs s'acharnent jusqu'alors à proposer une structure et une loi d'apprentissage, puis à étudier les propriétés émergentes, J. J. Hopfield fixe préalablement le comportement à atteindre par son modèle et construit, à partir de là la structure et la

loi d'apprentissage correspondant au résultat escompté. Ce modèle est aujourd'hui encore très utilisé pour des problèmes d'optimisation.

On peut citer encore la machine de Boltzmann en 1983 qui était le premier modèle connu, apte à traiter de manière satisfaisante les limitations recensées dans le cas du Perceptron. Mais l'utilisation pratique s'avère difficile, la convergence de l'algorithme étant extrêmement longue (les temps de calcul sont considérables).

C'est ensuite qu'en 1985 la rétro-propagation de gradient apparaît. C'est un algorithme d'apprentissage adapté au Perceptron Multi Couches. Sa découverte est réalisée par trois groupes de chercheurs indépendants.

Dès cette découverte, nous avons la possibilité de réaliser une fonction non linéaire d'entrée/sortie sur un réseau, en décomposant cette fonction en une suite d'étapes linéairement séparables.

Enfin, en 1989 Moody et Darken exploitent quelques résultats de l'interpolation multi variables pour proposer le Réseau à Fonctions de base Radiales (RFR), connu sous l'appellation anglophone Radial Basis Function network (RBF).

Ce type de réseau se distingue des autres types de réseaux de neurones par sa représent.

[49]

## Exemples Concrets et Cas d'Utilisation

### **Recherche de Nouveaux Composés :**

Des chercheurs utilisent des réseaux de neurones artificiels pour explorer de nouvelles combinaisons chimiques qui pourraient servir d'inhibiteurs de corrosion. Par exemple, en intégrant des données expérimentales dans des modèles de deep learning, on peut prédire quelles molécules auront les propriétés désirées pour inhiber la corrosion.

### **Maintenance Prédicative :**

Dans l'industrie pétrolière et gazière, des systèmes d'IA sont utilisés pour analyser les données des capteurs et prévoir les défaillances des équipements dus à la corrosion. Cela permet de planifier les interventions de maintenance avant que des problèmes graves ne surviennent, réduisant ainsi les coûts et augmentant la sécurité.

### **Optimisation en Temps Réel :**

Dans les systèmes de refroidissement industriels, l'IA peut ajuster en temps réel les concentrations d'inhibiteurs de corrosion dans l'eau de refroidissement, en fonction des données sur la qualité de l'eau et des conditions opérationnelles, assurant ainsi une protection optimale tout en minimisant l'utilisation de produits chimiques.

En fait, les réseaux de neurones artificiels sont un élément central de l'intelligence artificielle moderne, et leur développement a été essentiel pour faire progresser de nombreux domaines d'application de l'IA.

Les réseaux de neurones artificiels sont des modèles informatiques inspirés du fonctionnement du cerveau humain. Ils sont composés de couches de neurones interconnectés, chaque neurone étant une unité de traitement élémentaire. Ces réseaux sont capables d'apprendre à partir de données en ajustant les poids des connexions entre les neurones, ce qui leur permet de résoudre une grande variété de tâches complexes, telles que la classification d'images, la traduction automatique, la reconnaissance vocale, etc.

L'application des réseaux de neurones artificiels (RNA) dans le domaine des inhibiteurs de corrosion peut se faire de plusieurs manières :

### **Conception de nouveaux inhibiteurs de corrosion :**

Les RNA peuvent être utilisés pour prédire les propriétés de nouveaux composés chimiques susceptibles d'agir comme inhibiteurs de corrosion. En utilisant des techniques d'apprentissage automatique, les RNA peuvent analyser les structures moléculaires et prédire leur capacité à inhiber la corrosion, ce qui permet d'identifier plus rapidement des candidats prometteurs pour des tests expérimentaux.

### **Optimisation des formulations d'inhibiteurs :**

Une fois les inhibiteurs de corrosion identifiés, les RNA peuvent être utilisés pour optimiser les formulations afin d'améliorer leur efficacité. Par exemple, en utilisant des algorithmes d'optimisation basés sur les RNA, il est possible de trouver les concentrations optimales de différents composants dans une formulation d'inhibiteur pour maximiser son efficacité tout en minimisant son coût ou son impact environnemental.

### **Prédiction de l'efficacité des inhibiteurs :**

Les RNA peuvent également être utilisés pour prédire l'efficacité des inhibiteurs de corrosion dans des conditions spécifiques, telles que la concentration en ions métalliques, le pH de la solution, la température, etc. En analysant des ensembles de données expérimentales, les RNA peuvent apprendre à identifier les facteurs qui influent sur l'efficacité des inhibiteurs et à prédire leur performance dans des situations nouvelles.

### **Optimisation des conditions de traitement :**

Les RNA peuvent aider à optimiser les conditions de traitement des inhibiteurs de corrosion, telles que la température, le temps d'exposition, le pH de la solution, etc. En analysant les données expérimentales, les RNA peuvent identifier les conditions optimales qui maximisent l'efficacité de l'inhibiteur tout en minimisant les coûts de traitement.

### **Definition de RNA:**

Un réseau de neurones (RN) est un système d'opérateurs non linéaires interconnectés, qui reçoit des signaux de l'extérieur par ses entrées et délivre des signaux de sortie. Ces réseaux de neurones sont une représentation des structures cérébrales, du traitement parallèle et de la distribution d'informations. Ils sont composés de plusieurs éléments de traitement appelés neurones.

Chaque neurone fonctionne indépendamment des autres, ce qui permet à l'ensemble du réseau d'être un système parallèle fortement interconnecté.

Contrairement à une mémoire traditionnelle qui stocke les informations de manière centralisée, l'information dans un réseau de neurones est distribuée à travers tous ses composants et n'est pas localisée dans une partie spécifique.

Le réseau de neurones n'est jamais programmé pour effectuer une tâche spécifique. Au lieu de cela, il est entraîné sur des données existantes à l'aide d'un mécanisme d'apprentissage qui ajuste les composants du réseau pour mieux accomplir la tâche souhaitée.[50]

### **Structure de RNA:**

En général, les réseaux de neurones peuvent être décrits comme des modèles de calcul qui apprennent, généralisent et organisent des données.

Un réseau de neurones artificiels est composé d'un grand nombre d'unités appelées neurones, qui communiquent entre eux en s'envoyant des signaux à travers des connexions synaptiques.

En général, un système de neurones comprend trois types de neurones :

- Les neurones d'entrée qui reçoivent les données.
- Les neurones de sortie qui envoient les données à la sortie du système.
- Les neurones cachés, dont les signaux d'entrée et de sortie restent à l'intérieur du système.

La valeur  $U_i$  représente la somme pondérée des entrées du neurone et est calculée comme suit :

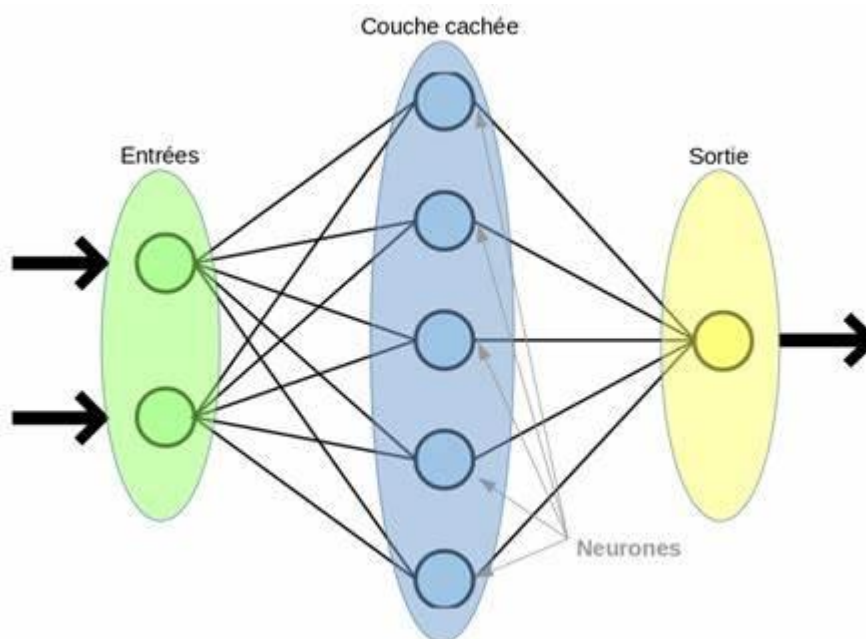
$$U_i = \sum(x_j * w_{ij}) + b_i$$

où :

- $x_j$  représente l'entrée  $j$  connectée au neurone  $i$ .
- $b_i$  est le seuil interne du neurone.
- $w_{ij}$  désigne le poids de la connexion reliant l'entrée  $j$  au neurone

La sortie  $O_i$  du neurone est déterminée par sa fonction d'activation  $g$  appliquée à  $U_i$  :

$$O_i = g(U_i). [51]$$



**Figure1.5:** structure de RNA.

### Architectures de réseaux de neurones Artificiels:

Une interface de conception de réseaux neuronaux est divisée en deux grandes catégories : des architectures non boucles (statique) ou boucles (dynamique).



### Les reseaux boucles:

Les réseaux de neurones récurrents sont utilisés pour modéliser de manière dynamique des processus non linéaires et pour les contrôler. Contrairement aux réseaux statiques, ces réseaux récurrents peuvent avoir n'importe quelle topologie de connexion, ce qui signifie qu'ils peuvent être entièrement connectés et comporter des boucles qui intègrent les valeurs de une ou plusieurs sorties en entrée. L'état global dépend également de ses états antérieurs.[52] [53]

### Reseaux non boucles:

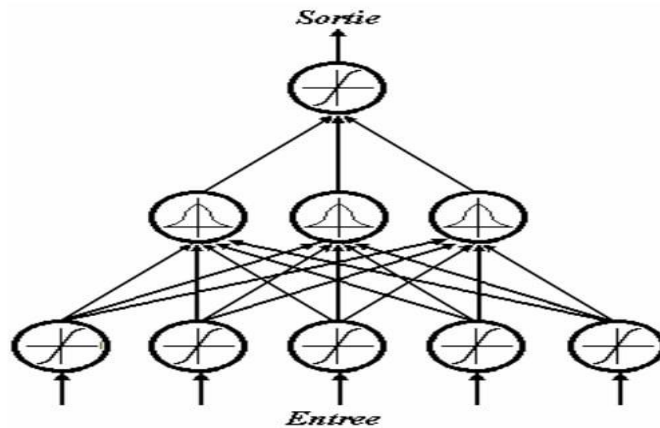
Si le graphe d'un réseau n'a pas de cycles, on dit qu'il est non bouclé ou statique. Il a donc une relation algébrique générale non linéaire entre ses entrées et ses sorties. Cela signifie qu'un réseau doit toujours être représenté sous forme graphique comme un réseau de neurones interconnectés les uns aux autres et que l'information circule des entrées vers les sorties sans rétroaction (une seule direction), ce qui signifie que la sortie actuelle n'a aucun effet sur l'entrée future.[54]

### **Le perceptron:**

Est la forme la plus simple d'un réseau neuronal, il modélise la perception visuelle. Il se compose de trois éléments principaux : la rétine, les cellules d'association et les cellules de décision. L'activation La fonction utilisée dans ce réseau est appelée tout ou rien (0 ou 1). L'apprentissage du perceptron peut se faire avec plusieurs méthodes qui ont été utilisées auparavant, il n'y en a qu'une seule couche de poids modifiables entre les cellules d'association et les cellules de décision. Perceptron a limité applications. Premièrement, elle ne peut être appliquée qu'à la classification avec des variables linéairement séparables et deuxièmement, sa sortie ne peut être que 0 ou 1.[54]

### **Les réseaux RBF (Radial Basis Function) :**

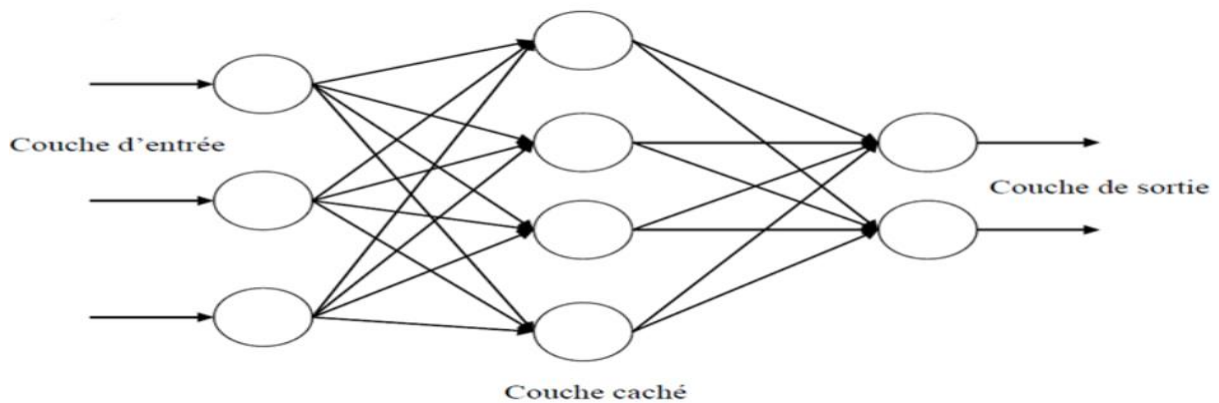
Sont des réseaux de neurones artificiels comprenant une seule couche cachée. Ils utilisent une fonction d'activation gaussienne pour la couche cachée et une fonction linéaire pour la couche de sortie. La méthode RBF est adaptée aux domaines de valeurs restreints. Les fonctions-noyau, centrées autour d'un noyau, sont pondérées et sommées pour produire la sortie. Les RBF sont utilisés pour le traitement d'images, la reconnaissance de formes et la classification. [55]



**Figure1.6** : réseaux RBF

### Réseaux de neurones multicouches (MLP) :

Cette classe est la plus importante dans les réseaux neuronaux car elle représente la généralisation du perceptron monocouche avec une fonction d'activation sigmoïde et une ou plus de couches cachées. Le vecteur d'entrée se propage à travers ce réseau couche par couche pour sortir, il entraîne avec un algorithme de rétropropagation d'erreur. Ce réseau est caractérisé par son modèle de non-linéarités de traitement des neurones. Il peut contenir une ou plusieurs couches cachées et un grand nombre de connexions qui peuvent résoudre la plupart des problèmes. Malgré ces avantages des couches cachées et des performances des algorithmes d'apprentissage, il reste encore de nombreuses questions non résolues telles que le choix des couches, les neurones par couche et le problème des minima locaux où le réseau peut converger.[56]



**Figure1.7** : reseaux de neurones multicouche (MLP).

## CHAPITRE 2

### MATERIELS ET METHODES

Ce chapitre a pour but de présenter d'une part, les différentes étapes de l'extraction du chitosane ainsi que leur caractérisation et d'autre part on va tester le chitosane extrait comme inhibiteur de corrosion acide d'un acier X60 par les techniques électrochimiques à savoir : OCP, EIS et Tafel. En effet, Par ailleurs, on a essayé de s'initier à l'application de réseaux de neurones artificiels (RNA) type MLP (perceptron multi-couches) pour prédire l'efficacité de notre inhibiteur à l'aide de logiciel MATLAB.

#### 2.1. Extraction du chitosane

Le chitosane a été extrait à partir de l'un des crustacés qui est la carapace de crevettes rouge. Le tableau 2.1 regroupe les produits chimiques utilisés lors de l'extraction de chitosane, leur rôle et leur origine.

**Tableau 2.1** : Produits chimiques utilisés, leurs rôles et origines lors de l'extraction du chitosane.

Produits utilisés	Rôle	Origine
Solution de l'acide chlorhydrique (HCl)	Déminéralisation de la chitine.	Panreac
Solution de la soude (NaOH)	Déprotéinisation et la désacétylation de la chitine.	Panreac
Acide acétique	Solubilisation du chitosane.	
L'eau oxygénée	Blanchiment du chitosane.	Panreac

Pour cette étude, la matière première utilisée est l'exosquelette de crevettes rouge qui nous ont été fournies fraîches.

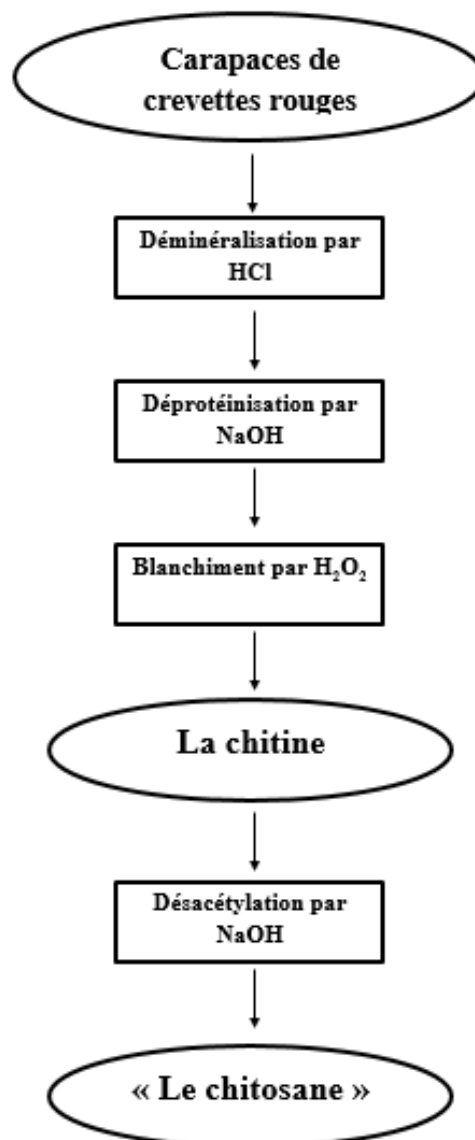
Les carapaces sont décortiquées à température ambiante, ensuite lavées puis séchées à l'air libre (voir figure 2.1). Les fragments obtenus sont séchés à 100 °C pendant 24 h puis broyées. A la fin nous avons récupérés notre poudre.

La chitine a été extraite en utilisant plusieurs opérations (démminéralisation, déprotéinisation, blanchiment). Par désacétylation de la chitine, on obtient le « chitosane ».



**Figure 2.1** : Carapaces de crevettes séchées.

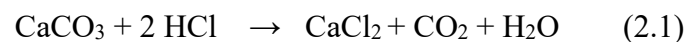
Les étapes de l'extraction chimique de chitosane sont représentées dans la figure 2.2



**Figure 2.2** : Etapes de l'extraction chimique du chitosane.1<sup>er</sup> étape : Extraction de la chitineA. Déminéralisation :

La déminéralisation s'effectue en dispersant la matière première obtenue dans une solution d'acide chlorhydrique 5M (1 :10) (m : v) sous agitation constante pendant 1 h à température ambiante. La réaction produit un dégagement de gaz carbonique qui doit être maîtrisé en ajoutant graduellement la matière première, le système doit être ouvert.

Théoriquement la réaction (2.1) se termine lorsqu'il n'y a plus de dégagement de gaz. Le contenu est ensuite filtré sur un tamis et rincé avec l'eau distillé jusqu'à la neutralité.

**Figure 2.3:** DéminéralisationB. Déprotéinisation :

On prépare une solution de NaOH à 10% en solubilisant 100g de NaOH en poudre dans un litre d'eau distillée contenue dans une fiole.

Par la suite, on prend la substance récupérée suite à la déminéralisation et on la met dans un bécher, ajoutant 10mL de NaOH pour chaque 1g de la substance, sous agitation à température 90°C durant 10 heures (figure 2.4).

Finalement, on rince la chitine résultante avec de l'eau distillée jusqu'à ce que le pH soit neutre.



**Figure 2.4 :** Déprotéinisation.

### C. Blanchiment

Lorsque l'eau de rinçage n'est pas colorée, l'eau distillée est remplacée par un volume de 20 ml de l'eau oxygénée (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) pour blanchir le produit, un ultime rinçage à l'acétone permet d'entraîner les impuretés lipidiques résiduelles. Le contenu de flacon est à nouveau rincé à l'eau distillée jusqu'à la neutralité, le filtrat est alors transféré dans une coupelle préalablement pesée qui sera par la suite placée dans l'étuve à 30 °C pendant 20 heures et en suite à 90°C pendant 12 heures.

Le nouveau poids de la coupelle contenant le produit permet de déduire le rendement massique d'après la formule suivante :

$$R_m = \frac{m_f}{m_i} \times 100 \quad (2.1)$$



**Figure 2.5 :** Produit après blanchiment

2<sup>ème</sup> étape : Extraction de chitosane :

Le chitosane a été obtenu par désacétylation de la chitine extraite par une solution de soude suivant la réaction (2.2) selon le mode opératoire ci-dessous :

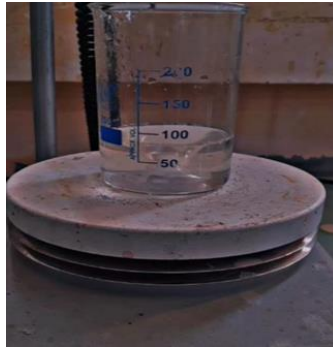
- Traitement de la chitine par solution de la soude à 50 % (m : v) (1 :10).
- Agitation de la solution à 100 °C pendant 24 heures sans oublier de fermer le bécher par un papier film pour bien réussir cette étape.
- Filtration de la solution dans un tamis et récupération de chitosane.
- Lavage de chitosane en continu pour éliminer la soude résiduelle selon la réaction jusqu'à ce que le pH atteigne la neutralité.
- Rinçage avec l'eau distillée puis séchage dans l'étuve à 80 °C.



2.2. Caractérisation du chitosane :

A. Test de solubilité

Le test de solubilité a été réalisé dans 1 % (v : v) de l'acide acétique et sous agitation.



**Figure 2.6** : Test de solubilité de chitosane.

### B. Caractérisation par FTIR (infrarouge à transformée de Fourier)



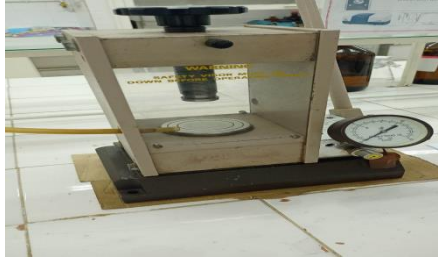


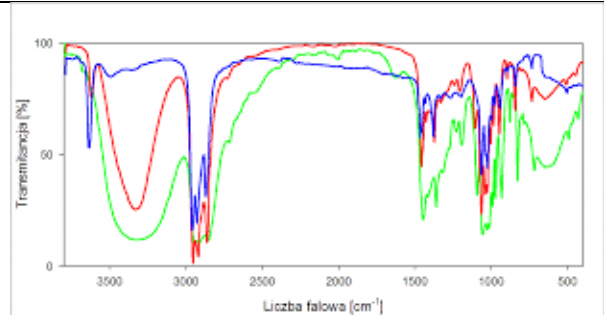
Pour déterminer les groupes fonctionnels du chitosane, vérifier sa structure chimique et évaluer sa pureté, son analyse IR doit être réalisée. Cela garantit son adéquation à de nombreuses applications biomédicales et industrielles, garantissant la qualité et l'efficacité des produits finaux.

Les spectres infrarouges de nos produits (chitine et chitosane) extraits ont été enregistrés en mode absorbance dans le domaine  $600-4000\text{ cm}^{-1}$  sur un spectromètre SHIMADZU type FTIR 8900 à l'aide de pastilles de KBr anhydre (1mg chitosane ou/ chitine / 100 mg KBr). Avant d'effectuer l'analyse, chaque échantillon a été étuvé à  $50^{\circ}\text{C}$  pendant 24 heures.

Le matériel utilisé dans la spectrométrie IR sont représenté dans le tableau suivant :



**Tableau 2.2 : Le matériel utilisé dans la spectrométrie IR**

Matériels Utilisés	Les étapes
	<p>Réduire en poudre un échantillon de chitosane avec une petite quantité de KBr dans un mortier en Agathe</p>
	<p>Mettre le mélange dans le moule pour obtenir une pastille translucide.</p>
	<p>Mettre le moule dans la presse a pastille et presser l'échantillon jusqu'à 5 tonnes maximum. Démoler la pastille de KBr avec l'échantillon .</p>
 <p><i>Magnetic Film/Pellet Holder</i></p>	<p>Placer la pastille dans le support et analyser dans l'appareil IR.</p>
	

### C. Par la détermination de degré de désacétylation (DDA)

Les propriétés physicochimiques (viscosité, solubilité, etc.) du chitosane sont influencées par le degré de désacétylation, ce qui peut être déterminant pour les applications dans lesquelles il est employé. De nombreuses méthodes sont disponibles pour évaluer le DD% du chitosane, mais les spectroscopies RMN et IR semblent les plus adaptées pour des caractérisations rapides et abordables. [1]

Le DA est déterminé comme suit :

$$DA\% = 31,92 \times A_{1320} / A_{1420} - 12,20 \quad (2.2)$$

$$DDA\% = 100 - DA \quad (2.3)$$

Avec  $A_{1320}$ ,  $A_{1420}$  sont les absorbances des pics à  $1325 \text{ cm}^{-1}$  et  $1419 \text{ cm}^{-1}$ .

## 2.3. Étude de la corrosion

### A. Matériau utilisé

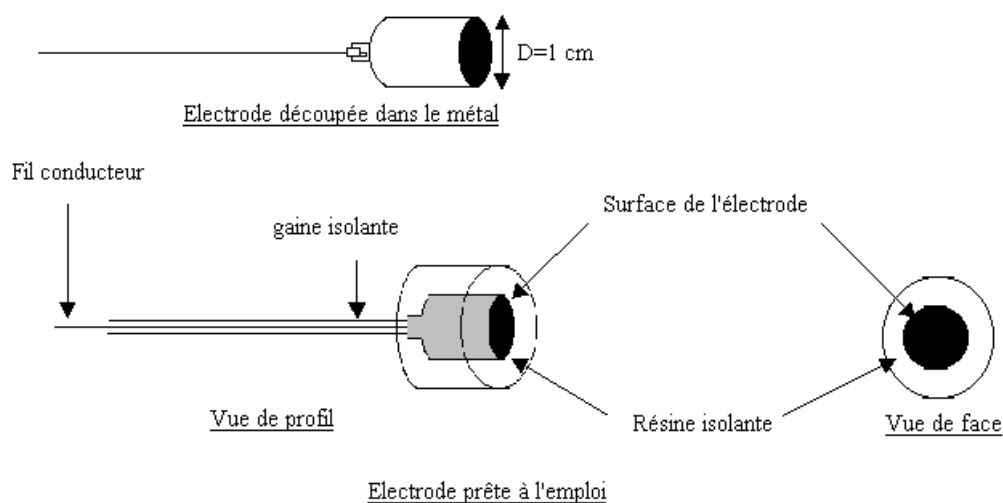
Le matériau utilisé pour étudier le phénomène de corrosion dans ce travail est un acier doux, dont la composition chimique et massique est représentée dans le tableau 2.3.

**Tableau 2.3 :** Composition chimique en pourcentage massique des différents éléments de l'acier.

Eléments	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Al	Cu	Fe
% massique	0.186	0.031	0.68	0.013	0.052	0.0074	0.029	0.066	0.032	<98.7

## B. Préparation de l'électrode de travail

Au centre de la pièce métallique en acier, de forme circulaire, est soudé un fil conducteur. L'ensemble est enrobé d'une résine thermodurcissable (Araldite) à base de méthacrylate de méthyle. La section de la surface d'acier exposée au milieu corrosif est de  $0.78 \text{ cm}^2$ . La figure 2.1 décrit le schéma de l'électrode de travail.



**Figure 2.7.** Schéma de l'électrode de travail

Afin d'obtenir des résultats fiables et reproductibles, Un prétraitement de la surface de l'électrode est effectué avant chaque essai, qui consiste en un polissage à l'aide du papier au carbure de silicium SiC de granulométrie décroissante allant de 280 jusqu'à 1200 mesh en utilisant une polisseuse sous jet d'eau type métasinax suivi d'un rinçage abondant à l'eau distillée.

## C. Milieu agressif

L'électrolyte (milieu agressif) est une solution d'acide chlorhydrique HCl d'une concentration 1 M, préparé à partir d'une solution commerciale 37% et de l'eau distillé.

#### D. Inhibiteur utilisé

Le composé testé comme inhibiteur dans cette étude est le chitosane extrait. La plage de concentrations utilisée pour mesurer le chitosane est de 0,08 à 1,6 g/L.

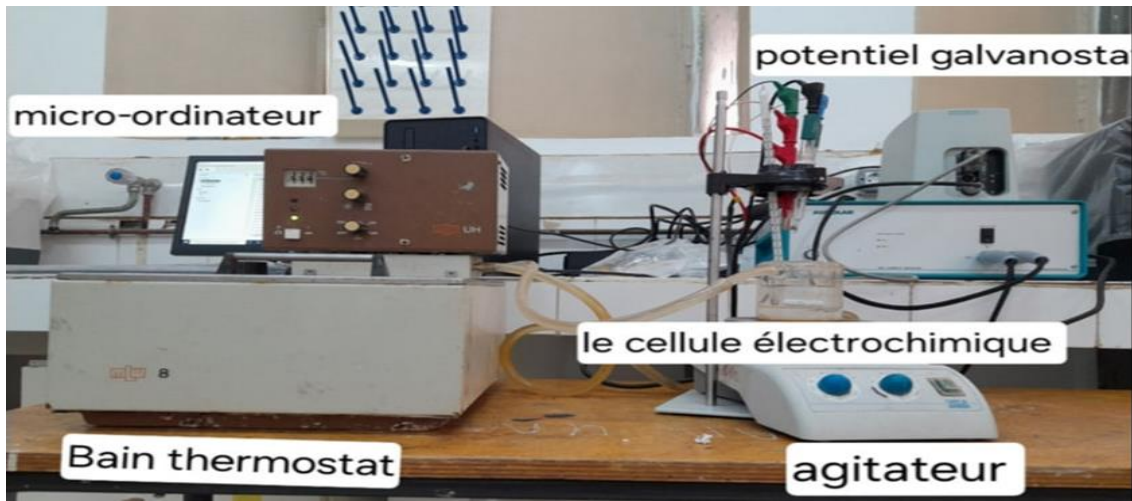
#### E. Dispositif et protocoles expérimentaux

Les mesures électrochimiques constituent une technique plus complète. Ces techniques (courbes de polarisation à vitesse de balayage modérée, spectroscopie d'impédance électrochimique) permettent d'accéder aux vitesses de réactions et aux paramètres physiques décrivant l'état du système (capacité de double couche, résistance de transfert de charges, capacité du film,...), L'analyse des courbes de polarisation et des diagrammes d'impédance peut apporter une meilleure connaissance des phénomènes impliqués dans le processus de corrosion et d'inhibition.

Les méthodes électrochimiques utilisées dans notre travail sont :

- Suivi de l'évolution du potentiel libre en fonction du temps (OCP),
- Courbes de polarisation potentiodynamique (méthode de Tafel),
- Spectroscopie d'impédance électrochimique (EIS).

Les expériences électrochimiques sont réalisées dans une cellule à trois électrodes, thermostatée à double paroi, fabriquée en verre Pyrex, L'électrode de travail est un disque d'acier au carbone, enrobé dans de la résine à base de méthacrylate de méthyle, dont la section libre en contact avec la solution est de  $0,78 \text{ cm}^2$ , La contre électrode en platine, placée vis-à-vis de l'électrode de travail, L'électrode de référence est une électrode au calomel  $\text{Hg} / \text{Hg}_2\text{Cl}_2 / \text{KCl}$  saturée, ECS (+0,24 V/ESH), Les trois électrodes sont reliées à la chaîne de mesure AUTOLAB 52851. L'ensemble est piloté par un ordinateur à l'aide d'un programme de commande et d'acquisition des résultats Nova.2.1.6. La chaîne de mesure utilisée pour les techniques électrochimiques est schématisée par la figure 2.8.



**Figure 2.8:** Schéma de la chaîne de mesure et la cellule électrochimique.

Paramètres électrochimiques:

Les paramètres fixés pour les essais électrochimiques sont consignés dans le tableau 2.4.

**Tableau 2.4. Paramètres des essais électrochimiques ;**

Méthode utilisée	Paramètres fixés	Valeurs
Mesure du potentiel libre	Circuit ouvert (courant nul)	$I = 0A$
	Temps final de stabilisation du potentiel	1800 s
Spectroscopie d'impédance électrochimique	Gamme de fréquence	100000 – 0.01 (Hz)
	Amplitude de signal	10 mV
	Potentiel de travail	E corr
Technique de Tafel	Potentiel initial	-250 mV
	Potentiel final	250 mV
	Vitesse de balayage	0.1 mV/s

En  
fait, On

calcule l'efficacité de l'inhibiteur à partir de la technique d'impédance par la loi (2.4) :

$$E(\%) = \frac{Rp - Rp0}{Rp} * 100 \quad (2.4)$$

Et à partir de la technique de TAFEL par la formule (2.5):

$$E(\%) = \frac{Icorr0 - Icorr}{Icorr0} * 100 \quad (2.5)$$

### 2.3. Modélisation par les réseaux de neurone artificielle (RNA)

Pour réaliser notre travail on doit suivre les étapes ci-dessous :

- Collection de la base de données

Nous avons sélectionné un ensemble de données par le biais des articles consultés 89 points [41→64] ont été récolté et divisé en Entrées (input) et en sorties (output). La concentration du milieu (M) : X<sub>1</sub>, concentration d'inhibiteur (g/L) : X<sub>2</sub>, température d'essais (°C) : X<sub>3</sub>, et le temps de la réaction (h) : X<sub>4</sub> concéderait comme entrées. Et l'efficacité (%): Y concéderait comme sortie. Le tableau A présente une description globale de notre dataset.

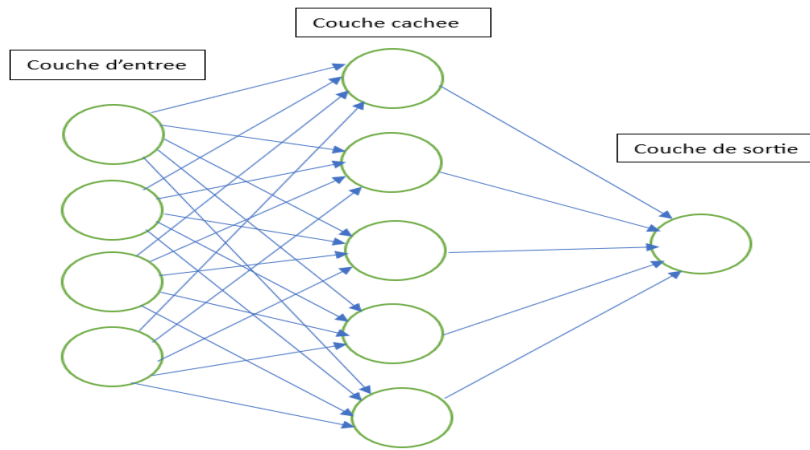
**Tableau A : Data discription**

	<b>X1</b>	<b>X2</b>	<b>X3</b>	<b>X4</b>	<b>Y</b>
<b>count</b>	89.000000	89.000000	89.000000	89.000000	89.000000
<b>mean</b>	0.926841	0.820225	38.033708	10.750000	63.945506
<b>std</b>	1.371726	0.345813	13.233437	8.628458	28.634876
<b>min</b>	0.000000	0.100000	21.000000	0.250000	0.000000

	<b>X1</b>	<b>X2</b>	<b>X3</b>	<b>X4</b>	<b>Y</b>
<b>25%</b>	0.002000	1.000000	25.000000	5.000000	60.080000
<b>50%</b>	0.360000	1.000000	35.000000	6.000000	73.640000
<b>75%</b>	1.200000	1.000000	45.000000	18.000000	85.520000
<b>max</b>	5.000000	1.000000	70.000000	24.000000	93.200000

- Conception de réseau de neurone artificiel

Dans cette phase de notre étude, nous avons abordé la conception détaillée du réseau de neurones artificiels (RNA) utilisé dans notre projet, en mettant particulièrement l'accent sur le MLP (Multi-Layer Perceptron). Nous avons déterminé l'architecture du réseau, y compris le nombre de couches cachées, le nombre de neurones dans chaque couche et les fonctions d'activation utilisées. Ce réseau a été entraîné en faisant varier le nombre de neurones (couches cachées) pour obtenir les neurones optimaux qui peuvent fonctionnellement donner le meilleur ajustement pour le modèle, en utilisant la valeur du coefficient de détermination ( $R^2$ ) obtenue aux différents niveaux d'efficacité. L'efficacité de l'inhibition a été prédite à l'aide du modèle généré par le réseau neuronal multicouche. La figure 2.9 représente la structure MLP du réseau indiquant la couche d'entrée (variables indépendantes), la couche cachée (nombre de neurones) et la couche de sortie (variable de réponse ou cible). Il est important d'indiquer que la base de données a été répartie comme suit : 80% pour l'entraînement, 15% pour la validation, et 20% pour le test.



**Figure 2.9 :** Réseau de neurones artificiels Multi-Layer Perceptron (MLP).



## CHAPITRE 3

### RESULTATS ET DISCUSSION

Dans cette partie, nous présentons comme 1er étape les résultats de l'extraction de la chitine et du chitosane qui ont été effectués au niveau de laboratoire ainsi que leurs caractérisations physicochimiques. La 2ème étape consiste à étudier le pouvoir inhibiteur du chitosane à l'aide des techniques électrochimiques EIS et Tafel.

#### 3.1. Extraction de la chitine et du chitosane

Le tableau 3.1 suivant rassemble les masses des divers produits obtenus lors de l'extraction de la chitine et du chitosane.

**Tableau 3.1** : Masse des échantillons obtenus.

La masse de carapace utilisée pour la déminéralisation est de 65g.	La masse après déminéralisation est de 22.5g.
La masse utilisée pour la dépropanisations est de 22,5 g.	La masse après dépropanisations ( <b>Chitine</b> ) est de 13.9 g.
La masse utilisée pour la désacétylation est de 13 g.	La masse après désacétylation ( <b>Chitosane</b> ) est de 8 g.

D'après le tableau 3.1 on observe que le rendement massique de l'extraction de chitine dans notre cas est 20%. L'efficacité de ce processus est significative et dépend du protocole suivi ainsi que des conditions expérimentales (C solutions, T, t, la qualité des produits). Le rendement massique d'extraction du chitosane est 61.5%.

#### 3.2. Caractérisation de la chitine et du chitosane

Dans ce travail nous avons procédé à la caractérisation après extraction de la. Les produits obtenus (chitine et chitosane) sont caractérisés par la spectroscopie infrarouge, par le test de solubilité et par la détermination de degré de désacétylation DDA%.

- **Teste de solubilité**

D'après le test de solubilité ou on a utilisé l'acide acétique 1% (1 :100) (v :v), on observe que le chitosane est très soluble dans la solution , Ceci indique l'absence de liaisons acétylées ou leur faible présence après l'étape de désacétylation, par contre la chitine n'est pas soluble dans la solution (acide acétique + eau) en raison de la présence de liaisons acétylées en abondance.

- **Caractérisation par IR**

Les figures 3.1-3.2 illustrent les spectres IR de la chitine et du chitosane respectivement.

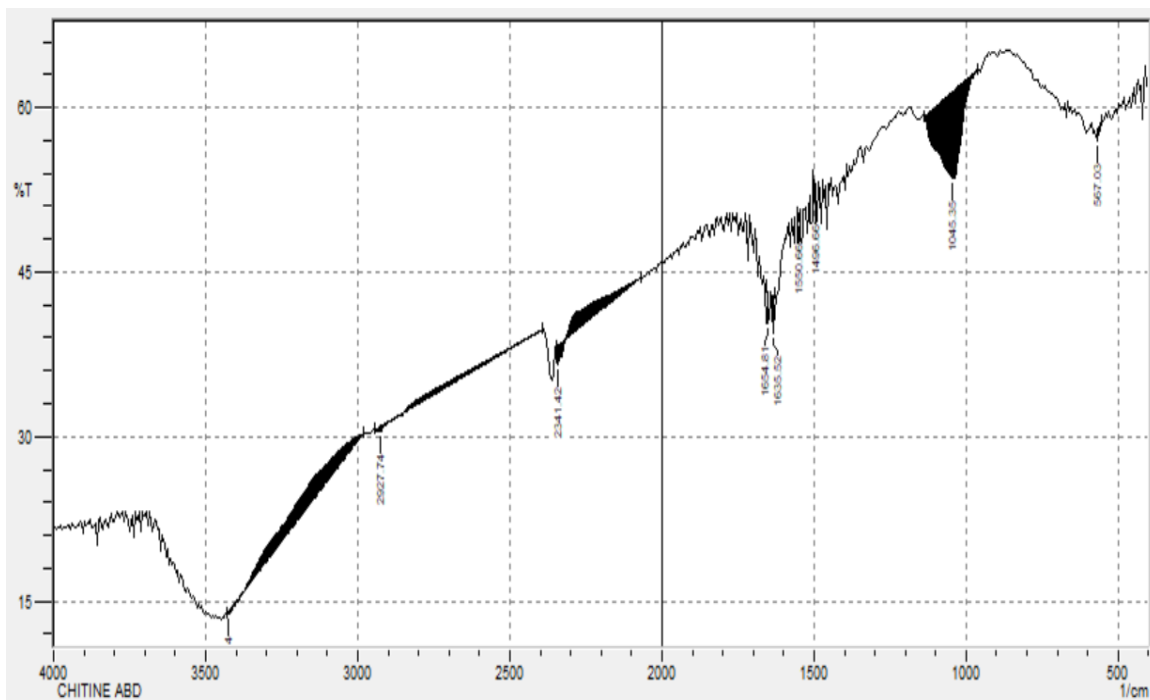


Figure3.1 : spectre de transmittance de chitine

Le spectre (figure3.1) présente l'analyse IR de chitosane .

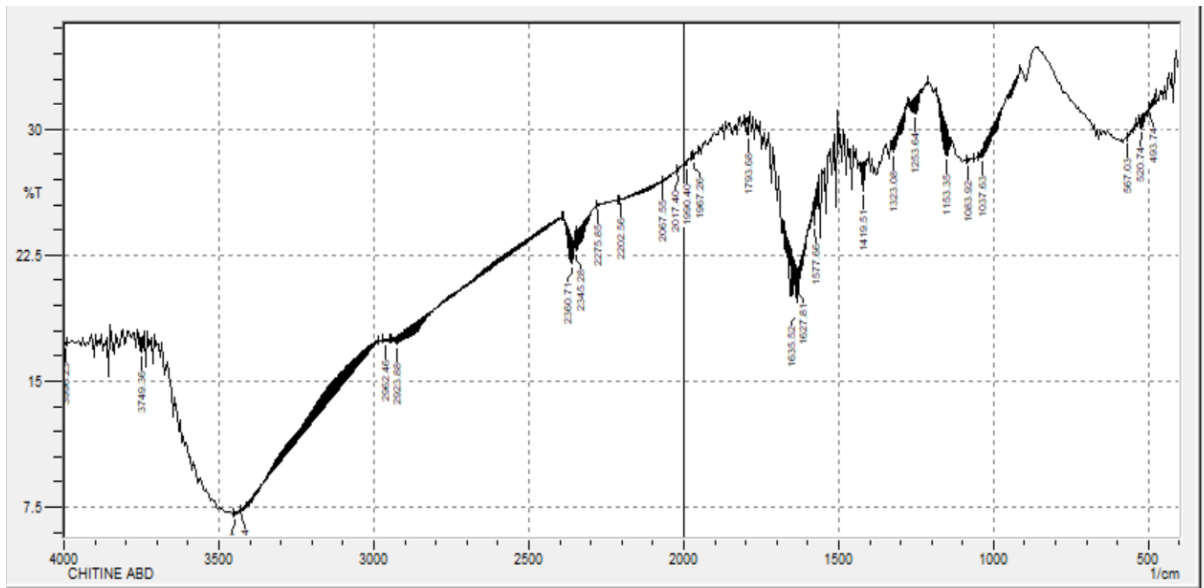


Figure3.2: spectre de transmittance de chitosane.

- **Détermination de degré de désacétylation**

D'après la loi de degré de désacétylation on déduit que le  $DA\% = 17.55\%$ , ceci indique que le  $DDA\% = 82.44\%$ .

[63]

### 3.3. Détermination du pouvoir inhibiteur du chitosane

- **Par EIS**

La résistance de l'électrolyte  $R_s$ , la résistance de transfert  $R_t$ , la capacité de la double couche  $C_d$  relevées des diagrammes d'impédance en présence de notre inhibiteur représentés sur la figure 3.1, et l'efficacité sont regroupés dans les tableaux 3.2.

L'analyse des résultats regroupés dans le tableau 3.2 montre que :

- ❖ Il est intéressant de constater que le diamètre de la boucle capacitive ( $R_t$ ) obtenue augmente avec l'augmentation de la concentration en inhibiteur, ce qui traduit une adsorption de cette molécule polymérique sur la surface métallique. Le changement des valeurs de  $R_t$  serait dû à un remplacement progressif des molécules d'eau et/ ou des anions

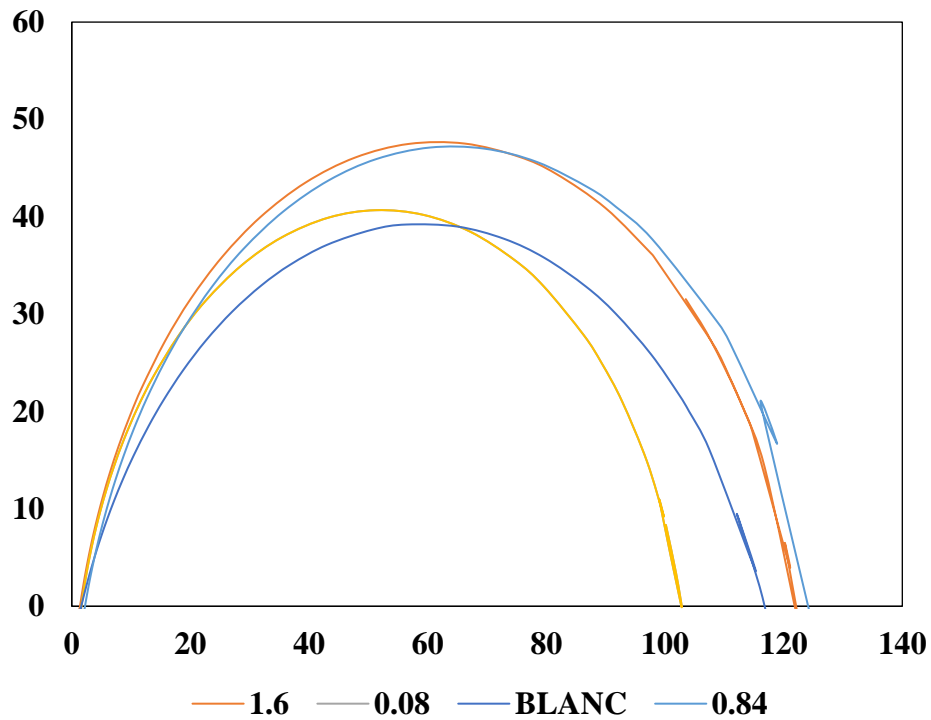
de l'acide par l'adsorption de molécules organiques sur la surface, en diminuant ainsi la vitesse de la dissolution du métal [these hamitouche].

- ❖ La capacité de la double couche diminue avec l'augmentation de la concentration de l'inhibiteur. Ce phénomène semble se manifester, lorsque des molécules de solvant (tel que l'eau) dont la constante diélectrique est élevée, sont remplacées par des molécules ayant des propriétés diélectriques moindres [these hamitouche].

On remarque, également que les diagrammes de Nyquist obtenus ne présentent pas des demi-cercles parfaits. En effet, dans ce cas l'interface n'a pas un comportement capacitif idéal. Un tel comportement est généralement attribué à une dispersion de fréquence liée aux différents phénomènes physiques tels que l'hétérogénéité extérieure résultant de rugosité de surface, d'impuretés, de dislocations, de distribution des emplacements actifs, d'adsorption d'inhibiteurs et de formation de couches poreuses, etc. La forme apparente de demi-cercle constituée d'une seule boucle indique que la corrosion du fer est principalement contrôlée par un processus de transfert de charge [these hamitouche].

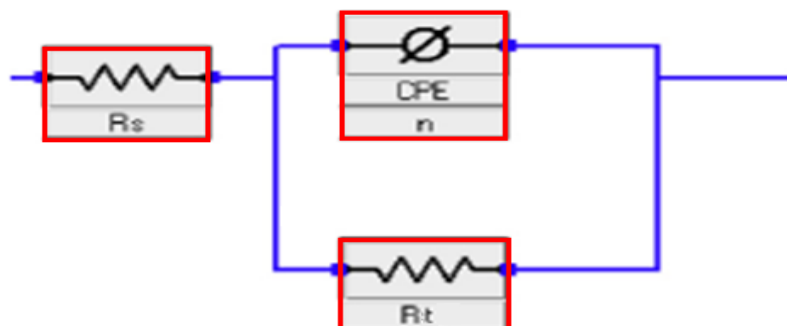
**Tableau 3.2** : Caractéristiques électrochimiques de l'interface : Acier / HCl 1M, à 25°C sans et avec inhibiteur, à différentes concentrations, obtenues par la méthode de EIS.

Quantité (mg/l)	Rs ( $\Omega$ )	Rt ( $\Omega$ )	CPE (F)
HCl 1M	1.6299	101.1	0.00010169
1.6	1.5490	138.20	0.00013241
0.84	1.4695	120.39	0.00012745
0.08	1.3976	115.21	0.00011749



**Figure 3.3 :** Diagramme de Nyquist de l'interface acier/solution, en absence et en présence de différentes concentrations D'inhibiteur dans HCl 1M à 25°C.

Les valeurs de  $R_s$ ,  $R_t$  et CPE, sont aussi déterminées par ajustement des spectres d'impédance expérimentaux par rapport aux modèles obtenus par le circuit électrique équivalent (CEE) de la figure 3.2 à l'aide du logiciel de simulation (ZView).



**Figure 3.4.** Circuit électrique équivalent de l'interface acier / HCl 1M sans et avec inhibiteur.

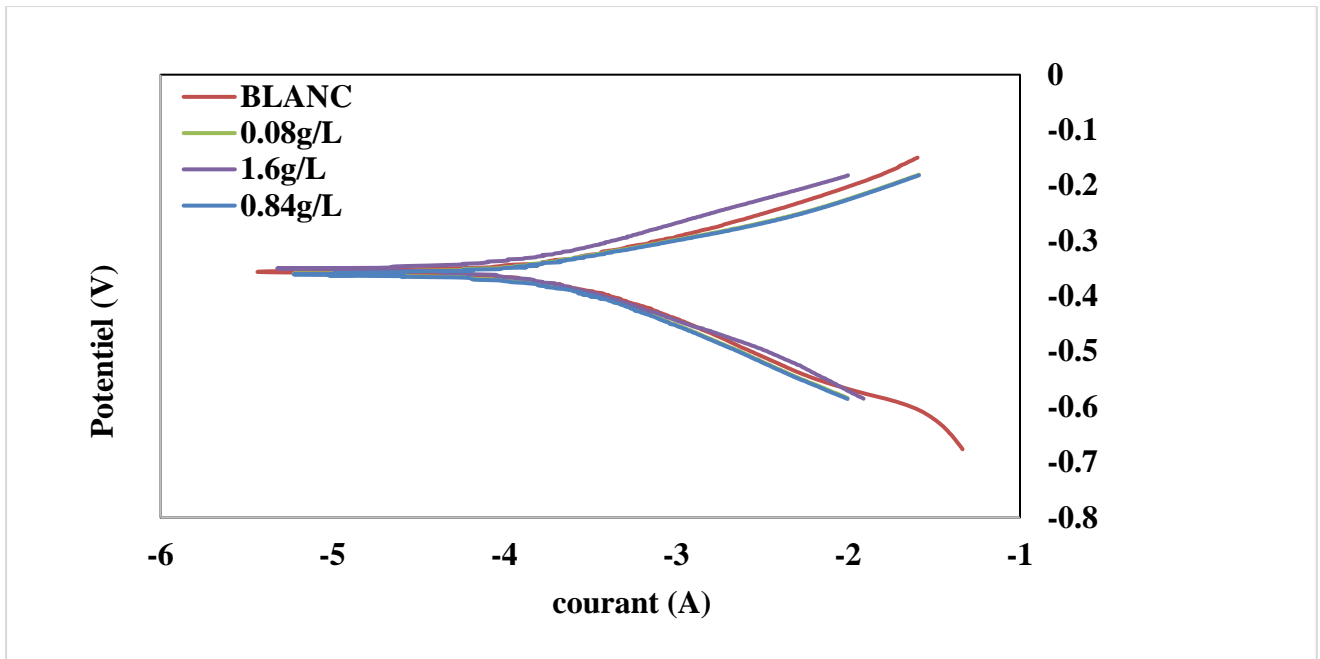
Le résultat de cette modélisation montrent que le CEE proposé modélise adéquatement l'interface acier / milieu acide en absence et en présence de notre inhibiteur puisqu'une bonne corrélation est obtenue entre les données expérimentales et simulées non seulement sur les spectres observés, mais également par le biais de la valeur du facteur d'erreur ( $\chi^2$ ) qu'est de l'ordre de  $10^{-3}$ . Ce chiffre représentant la moyenne des écarts quadratiques entre le modèle et les valeurs expérimentales et évalue la justesse de la modélisation.

- **Par Tafel**

Dans ces essais, relatifs à la méthode de Tafel, les densités de courant de corrosion sont déterminées graphiquement par l'intersection des droites de Tafel, anodique et cathodique, extrapolées. La figure 3.5 représente les courbes de polarisation cathodique et anodique de l'acier dans le milieu corrosif, sans et avec addition de différentes quantités du chitosane. Les valeurs des paramètres électrochimiques, déterminés à partir de ces courbes de polarisation : densité de courant de corrosion, pentes cathodique et anodique ainsi que l'efficacité, sont regroupées respectivement dans le tableau 3.3.

**Tableau 3.3:** Les paramètres de corrosion de l'acier obtenus par la méthode de Tafel, sans et avec différentes concentrations d'inhibiteur, dans HCl 1M à 25°C.

Quantité (mg/l)	I <sub>corr</sub> (A)	V <sub>corr</sub> (mm/an)	ba (V/dec)	bc (V/dec)	E <sub>corr</sub> (V)
Blanc	0.00024568	2.8548	0.12057	0.1083	-0.44116
1.6	0.00014643	1.7015	0.099773	0.076446	-0.42517
0.84	0.00013822	1.6134	0.097734	0.084336	-0.43417
0.08	0.00013201	1.5339	0.95077	0.10562	-0.4455



**Figure 3.5:** Courbes de polarisation potentiodynamique de l'acier dans HCl 1M à 25°C sans et avec inhibiteur, à différentes concentrations.

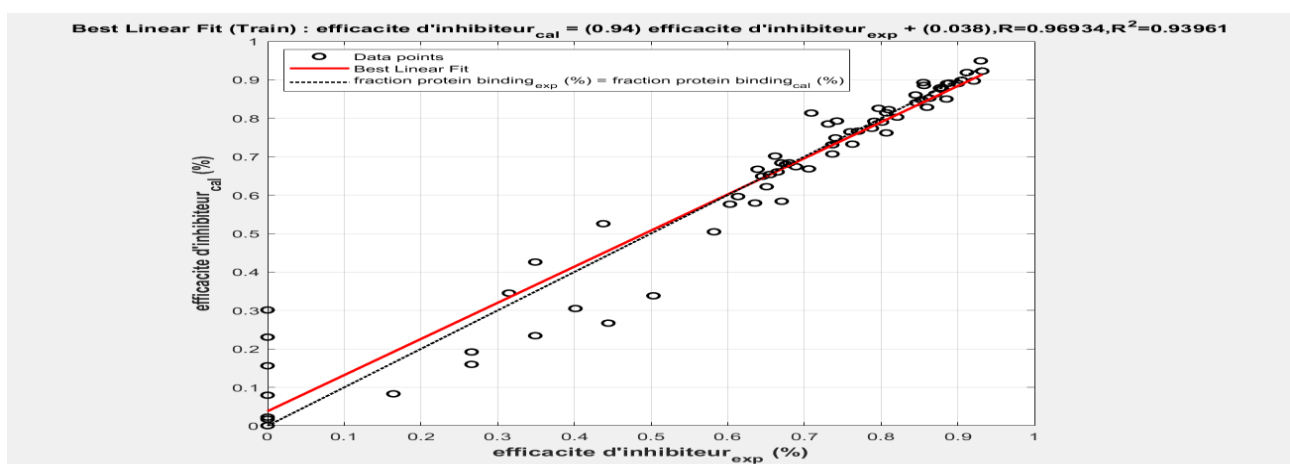
L'examen de ces résultats nous permet de relever les constatations suivantes :

- ❖ La détermination de la densité de courant par la méthode de Tafel en présence de notre inhibiteur confirme leur pouvoir inhibiteur qui augmente en fonction de la quantité injectée jusqu'à une certaine valeur.
- ❖ On observe que les deux branches cathodique et anodique, loin de Ecor, conserve leur linéarité ce qui indique que les réactions, d'oxydation du Fer et de réduction d'hydrogène, sont sous contrôle d'activation et que l'addition de l'inhibiteur ne modifie pas le mécanisme de ce processus.
- ❖ Les pentes anodique (ba) et cathodique (bc) de Tafel restent presque inchangées avec l'addition de l'inhibiteur. Il a ainsi une action par blocage de surface. Par conséquent, l'inhibiteur réduit l'aire de la surface sans modification du mécanisme de dissolution.

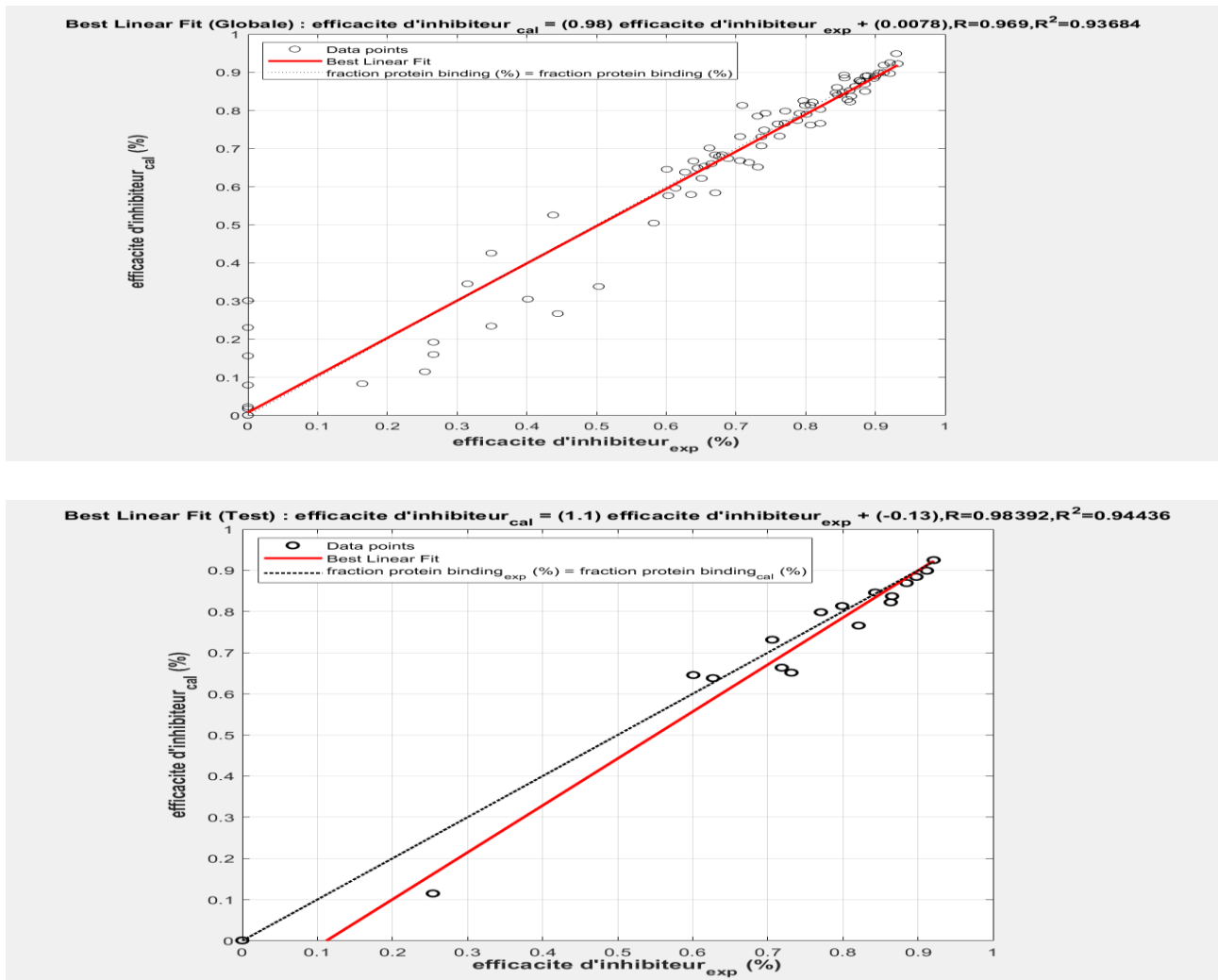
- ❖ L'addition des inhibiteurs dans le milieu d'étude, ne modifie que légèrement les valeurs du potentiel de corrosion. Ce qui constitue une preuve du caractère mixte de ces produits

### 3.4. Modélisation intelligente de l'inhibition de la corrosion

Cette partie de notre travail, nous a permis de nous familiariser avec l'application des réseaux de neurones artificiels (RNA) sur l'inhibition de la corrosion, en utilisant le logiciel MATLAB. Nous avons utilisé un ensemble de données théoriques pour former un modèle RNA capable d'estimer le pouvoir inhibiteur en fonction de différents paramètres de travail. Grâce à une architecture RNA bien définie, composée de 20 neurones dans une couche cachée et une couche de sortie avec des fonctions d'activation appropriées, nous avons réussi à obtenir des résultats prometteurs. Les courbes de régression (global, apprentissage, test) ont montré une corrélation étroite entre les valeurs prédites et théoriques, indiquant une bonne performance du modèle, comme nous pouvons remarquer clairement dans les 3 figures (voir figure 3.6). De plus, l'histogramme des erreurs de prédiction a révélé une distribution centrée autour de zéro, confirmant la précision du modèle. L'analyse de l'état d'entraînement a démontré que le modèle convergait vers une meilleure performance au fil des itérations, tandis que l'erreur MSE a confirmé une faible valeur d'erreur, ce qui témoigne de la précision élevée de notre modèle RNA. En conclusion, ce travail nous a permis d'appliquer avec succès les RNA à un problème de l'inhibition de la corrosion, en utilisant MATLAB comme outil de développement. Ces résultats encourageants ouvrent la voie à l'utilisation des RNA pour résoudre des problèmes dans le domaine de la corrosion.







**Figure 3.6:** Courbe de Régression.

Le coefficient de corrélation R est une mesure statistique de la relation linéaire entre deux variables, dans ce cas les sorties prédites par le modèle et les réponses théorique. Une valeur proche de 1 pour R indique une corrélation très forte entre les deux variables, ce qui confirme l'ajustement précis du modèle de régression. En résumé, les observations de la courbe de régression montrent un ajustement parfait entre les sorties prédites par le modèle de régression et les réponses théoriques.

La correspondance entre les prédictions du modèle et les valeurs cibles est observée à la fois pour l'ensemble de formation, de test et de validation, ce qui confirme la capacité du modèle à généraliser ses prédictions. La valeur élevée de R pour l'ensemble de données total renforce encore

davantage la précision du modèle. Ces observations témoignent de la robustesse et de la performance exceptionnelle du modèle de régression dans la prédiction précise des valeurs cibles.

Le nombre optimal de neurones obtenu est de 5, tandis que toutes les erreurs calculées sont faibles, ce qui confirme la robustesse de notre modèle établi par les réseaux de neurones. Artificiels de type (MLP).

**Ta** Tableau 3.4 : Valeurs des erreurs

Les erreurs	Train	Teste	All
RMSE (racine de l'écart quadratique moyen)	0.0782	0.0697	0.0716
RMSD (racine de la déviation quadratique moyenne)	0.0184	0.0083	0.0076
MAE (erreur absolue moyenne)	0.0467	0.00418	0.0428
MBE (erreur de biais moyen)	0.0321	7.06*10 <sup>-5</sup>	0.0065
MSE (carrée moyen des erreurs)	0.0061	0.0049	0.0051

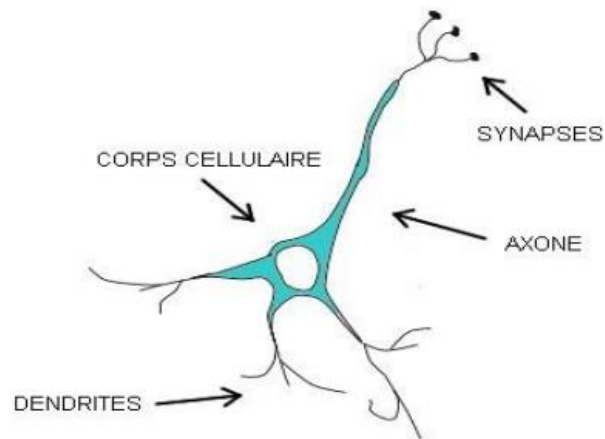
Après l'entraînement de notre modèle, nous avons procédé à des tests pour évaluer sa capacité à fournir les valeurs attendues par une interface graphique fournie par le logiciel MATLAB. Nous lui avons fourni des valeurs qui n'étaient pas présentes dans notre base de données initiale, comme indiqué ci-dessous:

Concentration d'inhibiteur (g/l)	0,24	Calculer
Concentration de milieu (M)	0.1	
Temperature (C)	30	
Temps (H)	1	
Efficacite d'inhibiteur (%)	0.96077	

**Figure 3.3 :** Interface graphique créée par le logiciel MATLAB.

Rappelant que un Neurone artificiel Appelé aussi neurone formel est un modèle mathématique inspiré d'un neurone biologique (dendrites, axone et synapses) (voir la figure 2.7) et (annexe ) le neurone artificiel possède plusieurs entrées qui correspond aux dendrites où il recueille l'information et une sortie qui correspond au cône d'émergence (point de départ de l'axone) d'où il envoie un signal électrique, Les actions excitatrices et inhibitrices des synapses sont représentées, la plupart du temps, par des coefficients numériques (les poids synaptiques) associés aux entrées. Les valeurs numériques de ces coefficients sont ajustées dans une phase d'apprentissage selon la figure 3.8 sont regroupés dans les tableaux 3.6-3.7. Dans sa version la plus simple, un neurone formel calcule la somme pondérée des entrées reçues et ajoute un biais, puis applique à cette valeur une fonction d'activation, généralement non linéaire. La valeur finale obtenue est la sortie du neurone, comme montré dans l'équation suivante :

$$y_i = f(a_j) = \varphi(\sum_{i=0}^n (w_i * x_i) + b_j)$$



**Figure 3.7:** neurone biologique

Le tableau 3.5 montre la correspondance entre le neurone biologique et artificiel.

**Tableau 3.5:** Correspondance neurone biologique/neurone artificiel

Neurone biologique	Neurone artificiel (formel)
Axones	Signal d'entrée
Synapses	Poids de la connexion
Dendrites	Signal de sortie

**Tableau 3.6:** Couche d'entrée qui contient 4 éléments ( $Iw_1, Iw_2, Iw_3, Iw_4$ ) et la couche cachée

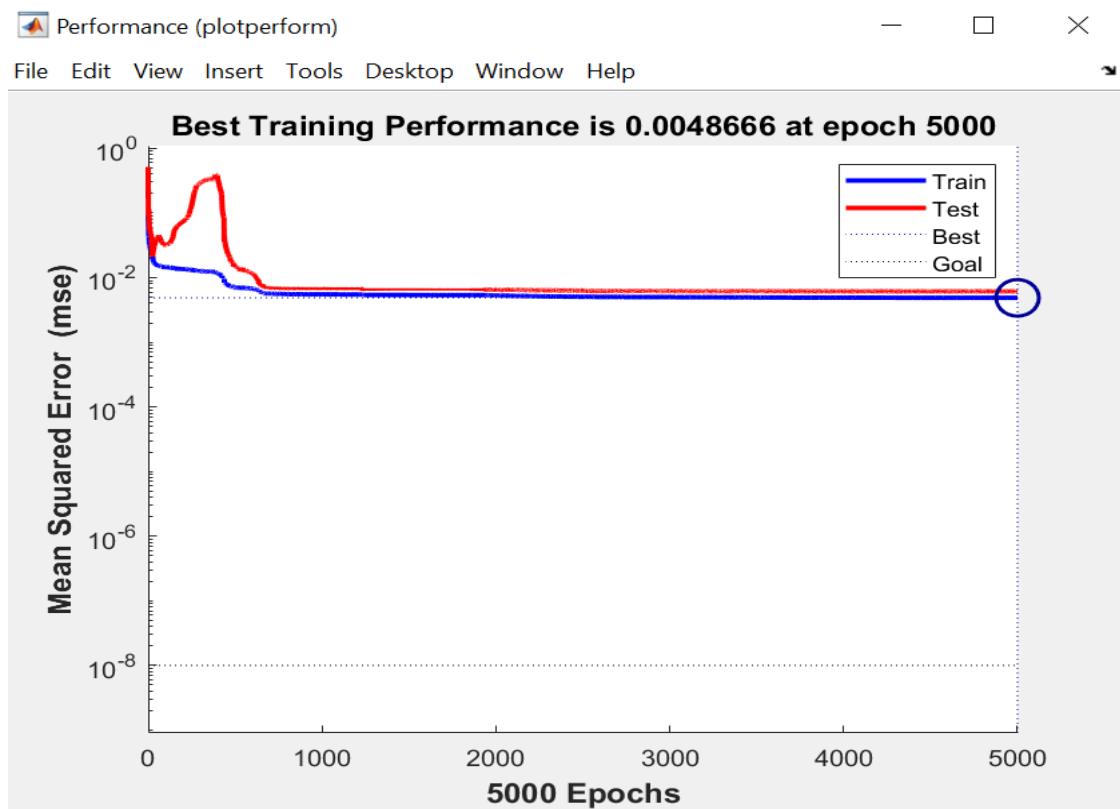
$Bi$ .

$Iw_1$	$Iw_2$	$Iw_3$	$Iw_4$	$Bi$
0.0000	-1.1689	-0.0241	-0.9923	0.0007
0.0001	1.5861	0.0357	1.6722	-0.0006
0.0086	-13.3309	9.1032	-16.2310	0.0220

0.0001	-0.9268	-0.0174	-0.4418	0.0011
4.2282	-0.0332	0.0191	0.1028	4.2311

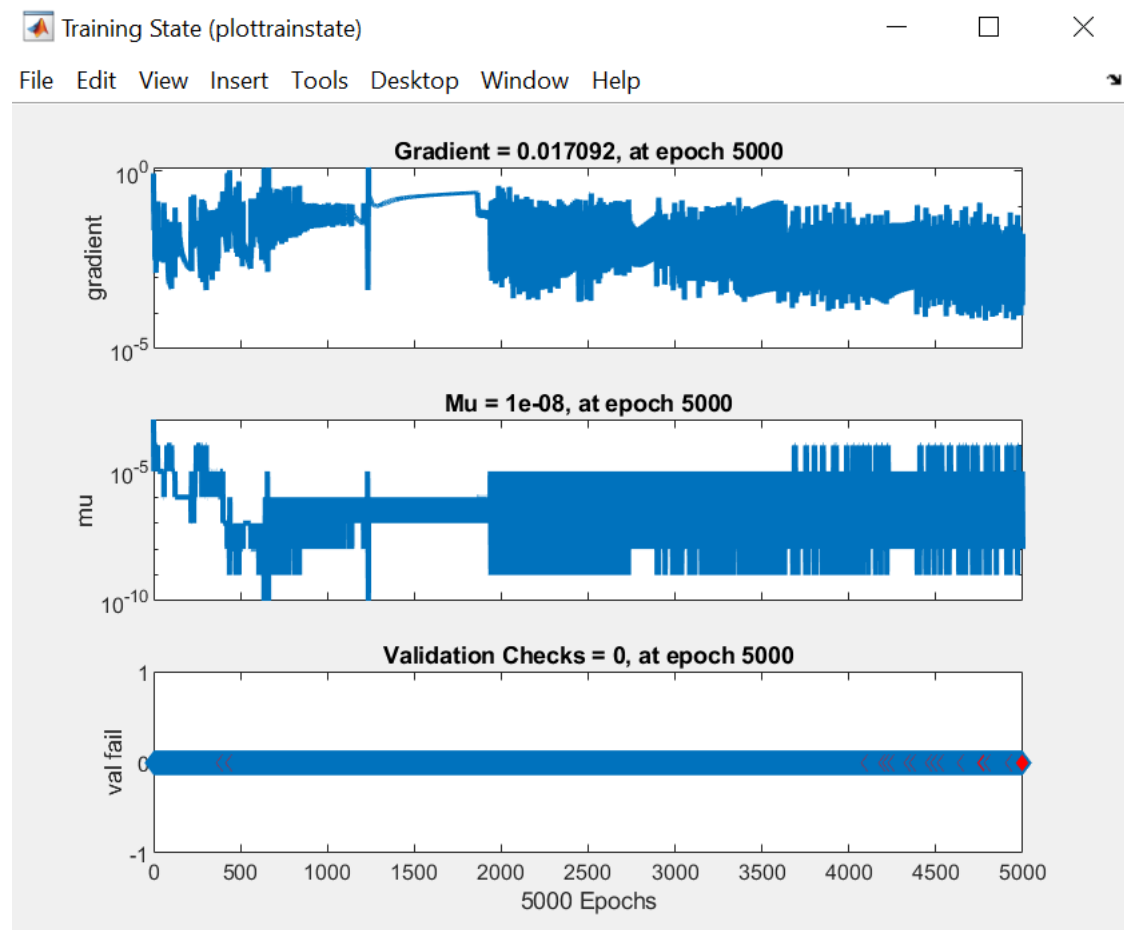
**Tableau 3.7** : Couche de sortie qui contienne 5 éléments (jw1,jw2 ,jw3,jw4,jw5) avec la couche cachée Bi.

<b>jw1</b>	<b>jw2</b>	<b>jw3</b>	<b>jw4</b>	<b>jw5</b>	<b>Bj</b>
-192.8473	-83.9755	12.9512	133.0877	235.5012	-271.3406



**Figure 3.9.** Courbe de performance

L'erreur quadratique moyenne (MSE) mesure l'écart moyen au carré entre les valeurs prédites et les valeurs théorique. Une faible valeur d'erreur MSE indique une précision élevée du modèle. Le critère d'arrêt de l'entraînement est clairement visible par la ligne discontinue.



**Figure 3.10:** Training state.

**Le gradient** représente la pente de la fonction de coût par rapport aux poids et aux biais du réseau neuronal. Cette courbe indique comment le gradient évolue au fil des époques pendant l'entraînement. Nous observons une diminution progressive du gradient, ce qui signifie que le modèle se rapproche d'un minimum global de la fonction de coût. Notant que les fluctuations du gradient peuvent indiquer des problèmes de convergence ou de surapprentissage.

**Mu**, également connu sous le nom de taux d'apprentissage, contrôle la vitesse à laquelle les poids et les biais du réseau neuronal sont ajustés lors de l'apprentissage. Cette courbe indique comment la valeur de mu varie au cours des époques. Une valeur élevée de mu peut entraîner des ajustements brusques des poids, ce qui peut conduire à une instabilité ou un dépassement de l'optimum global. Une valeur faible de mu peut rendre l'apprentissage lent et peut nécessiter plus

d'époques pour atteindre une performance satisfaisante. Il est important de trouver un équilibre approprié pour mu afin de garantir une convergence stable et rapide du modèle.

La courbe de **val** failles représente l'évolution de l'erreur de validation du modèle au cours des époques. Elle mesure l'erreur entre les valeurs prédites par le modèle et les valeurs théorique sur un ensemble de données de validation distinct. Cette courbe est essentielle pour évaluer la capacité du modèle à généraliser et à s'adapter à de nouvelles données. Une diminution régulière de l'erreur de validation indique que le modèle apprend efficacement et est capable de généraliser ses connaissances pour des données inconnues. Cependant, si l'erreur de validation augmente, cela peut indiquer un surapprentissage ou une mauvaise généralisation.

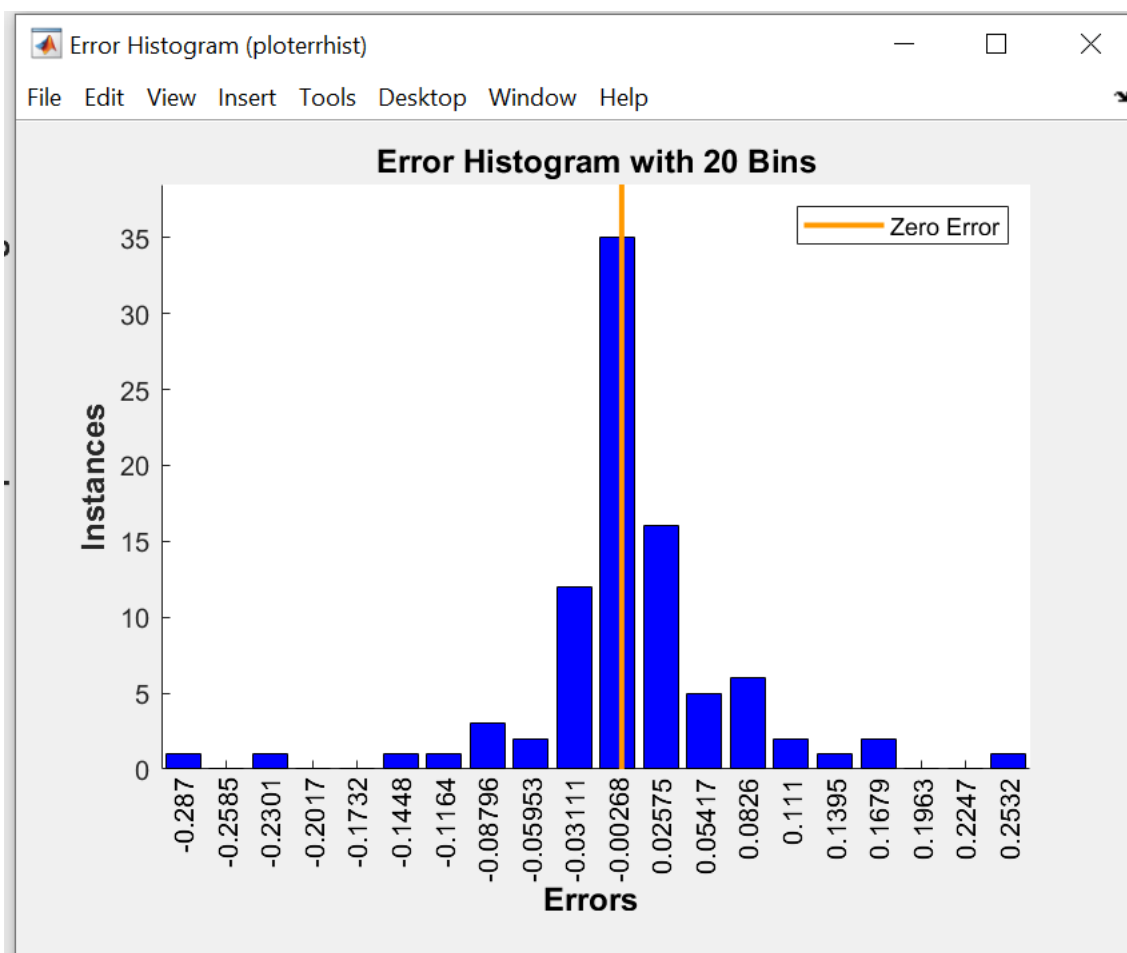


Figure 3.11: Errors histogram.



## CONCLUSION

L'objectif principal de notre recherche est d'évaluer l'efficacité du chitosane en tant qu'agent inhibiteur de la corrosion pour l'acier doux dans une solution d'acide chlorhydrique à 1M. Les caractéristiques du chitosane, notamment sa biodégradabilité, son faible coût et sa non-toxicité, le rendent particulièrement intéressant pour la prévention de la corrosion des aciers dans des conditions acides.

Au début, notre travail a consisté à extraire le chitosane des carapaces de crevettes rouges via un processus chimique incluant la déminéralisation, la déprotéinisation, le blanchiment et la désacétylation. Par la suite, nous avons réalisé des analyses spectroscopiques IR, révélant les groupes fonctionnels clés du chitosane. Ces analyses nous ont permis de calculer le degré de désacétylation (DDA) qu'est estimé de 82%. On a confirmé la solubilité du chitosane dans une solution d'acide acétique diluée.

L'analyse des résultats des tests électrochimique montre que :

Le diamètre de la boucle capacitive ( $R_t$ ) obtenue augmente avec l'augmentation de la concentration en inhibiteur, ce qui traduit une adsorption de cette molécule polymérique sur la surface métallique. Le changement des valeurs de  $R_t$  serait dû à un remplacement progressif des molécules d'eau et/ ou des anions de l'acide par l'adsorption de molécules organiques sur la surface, en diminuant ainsi la vitesse de la dissolution du métal.

La capacité de la double couche diminue avec l'augmentation de la concentration de l'inhibiteur. Ce phénomène semble se manifester, lorsque des molécules de solvant (tel que l'eau) dont la constante diélectrique est élevée, sont remplacées par des molécules ayant des propriétés diélectriques moindres.

Les diagrammes de Nyquist obtenus ne présentent pas des demi-cercles parfaits. En effet, dans ce cas l'interface n'a pas un comportement capacitif idéal. Un tel comportement est généralement attribué à une dispersion de fréquence liée aux différents phénomènes physiques tels que l'hétérogénéité extérieure résultant de rugosité de surface, d'impuretés, de dislocations, de distribution des emplacements actifs, d'adsorption d'inhibiteurs et de formation de couches poreuses, etc. La forme apparente de demi-cercle constituée d'une seule boucle indique que la corrosion du fer est principalement contrôlée par un processus de transfert de charge.

La détermination de la densité de courant par la méthode de Tafel en présence de notre inhibiteur confirme leur pouvoir inhibiteur qui augmente en fonction de la quantité injectée jusqu'à une certaine valeur.

On observe que les deux branches cathodique et anodique, loin de Ecor, conserve leur linéarité ce qui indique que les réactions, d'oxydation du Fer et de réduction d'hydrogène, sont sous contrôle d'activation et que l'addition de l'inhibiteur ne modifie pas le mécanisme de ce processus.

Les pentes anodique (ba) et cathodique (bc) de Tafel restent presque inchangées avec l'addition de l'inhibiteur. Il a ainsi une action par blocage de surface. Par conséquent, l'inhibiteur réduit l'aire de la surface sans modification du mécanisme de dissolution.

L'addition des inhibiteurs dans le milieu d'étude, ne modifie que légèrement les valeurs du potentiel de corrosion. Ce qui constitue une preuve du caractère mixte de ces produits

Enfin, l'usage de réseaux de neurones artificiels vise à éliminer la nécessité de tests en laboratoire, en les remplaçant par une interface de données capable de prédire l'efficacité de l'inhibiteur (sortie) à partir de quatre paramètres d'entrée : la concentration du milieu, la concentration de l'inhibiteur, le temps et la température. D'après les courbes de régression (global, app, test), on remarque que la majorité des points sont alignés sur la première bissectrice ce qui confirme la robustesse de notre modèle établi par les réseaux de neurones artificiels de type (MLP).

## REFERANCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] : R.A. Oriwoh, T.T. Olanrewaju, F. Akintayo : Chitosan as a green corrosion inhibitor for metals: A review, Green Materials, (2019).
- [2] : N. Njoku, M. Ikelle : Chitosan and its derivatives as corrosion inhibitors for metals, A review, Journal of Materials Science Research and Reviews, (2020).
- [3] : S. Chen, C. Deng, Q. Zhang, "Application of artificial intelligence in corrosion protection: A review", Journal of Materials Science & Technology, (2019).
- [4] : M. El-Hajjiji, M. Benhba, A. Srhiri : intelligence corrosion inhibitor selection using machine learning algorithms, journal of corrosion science and Engineering, (2018).
- [5] : R. Mishra, R. Pathak, Artificial neural networks in corrosion science and engineering: A review, Journal of Corrosion Science and Engineering, (2021).
- [6] : D. Landolt, Corrosion et Chimie de Surface des Métaux, 1, Edition, Alden Press, Oxford, (1993).
- [7] : J.Christopher Scully, Corrosion Protection, Principes Fondamentaux, Eddition Masson, Paris, (1995).
- [8] : M. Lebrini : Synthèse et études physicochimiques de nouveaux thiadiazoles inhibiteurs de corrosion de l'acier en milieu acide, Thèse de doctorat, Université des sciences et Technologies de LILLE, (2006).
- [9] : R.M. Latanision, Mater. Perform. 26 : 9, (1987).
- [10] : J. P. Baïlon, J. M. Dorlot : Des matériaux, 3ème édition, Presses internationales polytechniques, Canada, (2002).
- [11] : L. Ghilani, mémoire de magister, Université de Batna, (2008).
- [12] : K. Youcef, R. Ali, mémoire fin d'étude, Université de Jijel, (2005).
- [13] : C. Fiaud, C. Lemaitre, N. Pébère, Corrosion et anticorrosion, chapitre 13.

- [14] : K. Rahmouni, Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie CURIE, Paris VI, (Déc 2005).
- [15] : C.FIAUD : Inhibiteur de corrosion, Université Pierre & Marie curie, ENSC, Paris. Techniques de l'ingénieur, Traité corrosion – Vieillissement, Vol. Cor 1005, pp. 1-14, (2006).
- [16] : D. Landolt. Corrosion et chimie de surfaces des métaux. Presses polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Vol. 12, (1997).
- [17] : S. Bradford, Corrosion and Protection, Van Nostrand Reinhold, New York, (1992).
- [18] : G. TrabANELLI, V. Carassiti, Corrosion Science and Technology, Plenum Press, New York, (1970).
- [19] : E. Schaschl, Methods for evaluation and Testing of corrosion inhibitors. In : Ed. by C.C. Nahan, NACE, Houston, P.28, (1973).
- [20] : M. BOUNOUGHAZ : les inhibiteurs de corrosion, CRD/SH/CALCOR, pp. 34-38, 17, (mai 1995).
- [21] : D. LANDOLT : Traité des matériaux, corrosion et chimie des surfaces des matériaux, Ed. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, pp188-200.ISBN2-88074-245-5, (1993).
- [22] : Z.A. Iofa, V. Batrkov, C. Ngokba : Influence of anion adsorption on the action of inhibitors on the acid corrosion of iron and cobalt, Electrochim. Acta.09 1645-1653, (1964).
- [23] : R. Driver, R. J. Meakins : TafelSlopes and Chemical Structure of Inhibitors of the Acid Corrosion of Steel, J. Brit. Corros.Sci. 9 233-243, (1974).
- [24] : N.Hackerman, A.C. Makrides, J. of Ind. And Eng. Chem. 46 523.
- [25] : E. McCafferty, Corrosion Control by Coatings, H. Leidheiser editor, Science Press, Princeton, N.J, 279, (1979).
- [26] : H.Hamitouche : étude de l'efficacité inhibitrice de quelque tensioactifs, synthétisés à partir de coupe pétrolières algériennes, dans la lutte contre la corrosion interne des pipelines», mémoire de magistère, USDB, (2005).

- [27] : CHRISTIAN FIAUD :Protection des tuyauteries contre la corrosion  
www.techniques-ingenieur.com –, CORR 660, (2006).
- [28] : M.R. GREGG : Review of corrosion inhibitor developments and Testing for off shore oil and gas production systems, Backer Petrolite corporation, newfound land, Corrosion, Paper n° 04422, (2004).
- [29] : S. PAPA VINASAM : Advances in the evaluation of corrosion inhibitors in the laboratory and in the prediction of field performance based on laboratory evaluation (TEG253X), Journal of science and engineering, corrosion, Vol 62, n°1, Nace International, Houston, TX, January, (2006).
- [30] : Corrosion and Corrosion Protection Handbook, Edited by Philip A. Schweitzer, New York, pp. 469-495, (1983).
- [31] : Papavinasam S. Uhlig's, Corrosion Handbook, 2nd Ed, New York : John Wiley & Sons Inc, Chap. 59, (2000).
- [32] : Quraishi M.A, Sardar R, Corrosion **58**, 748-755, (2002)
- [33] : Muralidharan S., Phani K.L.N., Pitchumani S., Ravichandran S., Iyer S.V.K., Journal of the Electrochemical Society **142**, 1478-1483, (1995).
- [34] : Auinat M., Ein-Eli Y, Journal of the Electrochemical Society **152**, A1 158-A1164 (2005).
- [35] : Tuken T., Surface and Coatings Technology 200, 4713-4719, (2006).
- [36] : Tüiken T., Dûdukçu M., Yazici B., Erbil M., Progress in Organic Coatings 50, 273- 282, (2004).
- [37] : Waanders F.B., Vorster S.W., Geldenhuys J., Hyperfine Interactions **139/140**, 133- 139, (2002).
- [38] : Sugama T., Cook M., Progress in Organic Coatings 38, 79-87, (2000).
- [39] : Cheng S., Chen S., Liu T., Chang X., Yin Y., Materials Letters 61, 3276-3280, (2007).
- [40] : 40El-Sawy S.M., Abu-Ayana Y.M., Abdel-Mohdy F.A., Anti-corrosion Methods and Materials 48, 227-234, (2001).

- [41] : Mohamed H. M. Hussein, Mohamed F. El-Hady, Hassan A. H. Shehata Mohammad A. Hegazy, Hassan H. H. Hefni : Preparation of Some Eco-friendly Corrosion Inhibitors Having Antibacterial Activity from Sea Food Waste, (April 2012).
- [42] : Tolaimate A, J. Desbrieres, M. Rhazi and A. Alagui : Contribution to the preparation of chitins and chitosan with controlled physico-chemical proprieties, *polym*, 44. 7939.7952 (2003).
- [43] : Tolaimate A, J. Desbrieres, M. Rhazi and A. Alagui, M. Vincendon et P. Vottero : On chitosan from squid chitin, *polymer* vol 41 p 24632469, (1999).
- [44] : Muzzarelli, R.A.A Chitin pergamom : oxford, (1977).
- [45]: M. H. M. Hussein, M. F. El\_Hady, W. M. Sayed and H. Hefni, :Preparation of Some Chitosan Heavy Metal Complexes and Study of Its Properties, *Polymer Science, Ser. A, Vol. 54, No. 2, pp. 113–124*, (2012).
- [46] :O.Radovici, Proc. 7th European Symposium on Corrosion Inhibitors, Ann. Univ. Ferrara, Italy, P330, (1990).
- [47] : Espenson, J.H. *Chemical Kinetics and Reaction Mechanisms* (2nd ed, McGraw-Hill), p.156-160, (2002).
- [49] :Pigini, « Artificial pollution test for polymeric insulators », *INMR Magazine*, November ,(2013).
- [50] : B. François et V. Michel « Les réseaux de neurones artificiels » Presses Universitaire, Paris,(1996).
- [51] : C.Dreyfus, J.-M. Martinez, M. Samuelides, M.B. Cordon, F. Badran, S.Thiria, L. Hérault, "Réseaux de neurones .Methodologie et applications" Eyrolles, France, (2004).
- [52] : G. Dreyfus «Les réseaux de neurones une technique opérationnelle pour le traitement des données industrielles économiques et financières » École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris (ESPCI).
- [53] : S. Herivé : Méthode statique de sélection de modèles neuraux ; applications financières et bancaires, Thèse de Doctorat, Université Pière et Marie Curis VI ,(1997)

**[54]** : Rials I, Personnaz et Dreyfus G. : modélisation, classification et commande par réseaux de neurones : principe fondamentaux, méthodologie de conception et illustrations industrielles, les réseaux de neurones pour la modélisation et la commande de procédés, J.P. Corriou, coordonnateur (Lavoisier Tec et Doc, 1995). G. Dreyfus : Les réseaux de neurones, Mécanique Industrielle et Matériaux , N0 51, (1998).

**[55]**: Boutouiga Mohamed; Hor Nacereddine «Comportement d'Isolateur Capot et Tige F160D\_146DC Artificiellement Pollué sous Tension Alternative 50Hz» université Ibn-Khaldoune de Tiaret, (2018 /2019).

**[56]**: Ozdamar, Yaylali, Tayakar et Lopez «Inversion of Multi/ayer Networks». Int, Joint. Conf. Neural Networks, Washington, Juin, pp 425-430, (1989).

**[57]**:FJ. Pineda «Generalization of Back-Propagation to Recurrent Neural Networks», Physical Review letters, 59(19), pp 2229-2232, (1987).

**[58]**:M.Abdallah, A.Fawzy, H.Hawsawi “Maltodextrin and Chitosan Polymers as Inhibitors for the Corrosion of Carbon steel in 1.0M Hydrochloric Acid” Int J.Electrochem.Sci, (2020).

**[59]**:Saviour A.Umoren, Mauro J.Banera, Teodoro Alonso-Garcis, Claudio A.Gervasi, Maria V.Mirifico “Inhibition of mild steel corrosion in HCl solution using chitosan” Cellulose, (2013) .

**[60]**:R. Menaka and S. Subhashini, Chitosan Schiff base as effective corrosion inhibitor for mild steel in acid medium, Department of Chemistry, Avinashilingam Institute for Home Science and Higher Education for Women, Coimbatore-641043, Tamil nadu, India, (2016).

**[61]**:Mahmoud N. El-Haddad, Chitosan as a green inhibitor for copper corrosion in acidic medium, nternational Journal of Biological

**[62]**:Taher Rabizadeh, Shahin Khameneh Asl Chitosan as a green inhibitor for mild steel corrosion: Thermodynamic and electrochemical evaluations, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Materials Engineering, University of Tabriz, Tabriz 51666-16471, Iran, (2018).

**[63]:** Nguyen Dang Khoa VO, 89Synthèse de nanoparticules d'or par irradiation de solution aqueuse d'ions Au (III) en présence de chitosane<sup>99</sup> ; Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Reims Champagne-Ardenne ; Ecole Doctorale Sciences, Technologies et Santé, (2013)

**[64] :** M<sup>me</sup> Bouchelkia Houria NEE Hamitouche, Etude du pouvoir inhibiteur de surfactants cationique synthétique à partir de produits pétroliers algériens : Application à la corrosion interne des pipelines, Université de Blida 1, Faculté de Technologie département de Génie des procédés,