



République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj – Bouira
Faculté des sciences et sciences appliquées
Département de Génie des Procédés



Mémoire

Présenté par

MAOUCHE Samia

MATARI Khadidja Malak

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie chimique

Thème

Etude de l'efficacité inhibitrice sur la corrosion de l'acier, d'un terpolymère conducteur synthétisé sous champ magnétique

Le jury est composé de :

Mr. S. BELKACEMI

Encadreur

Mme. A. ZAABAR

Examinatrice

Mr. H. LOUNICI

Président

2023/2024

التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية



انا الممضي اسفله،

السيدة (ة) مباركة خديجة م.أ.أ.الصفة: طالب (ماجستير / دكتوراه)

الحامل (ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 110010337009110009 والصادرة بتاريخ 2024/04/27

المسجل (ة) بكلية / معهد العلوم والطوبى التطبيقية قسم هندسة البرق

تخصص: هندسة كهربائية

والمكلف (ة) بإنجاز اعمال بحث (مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).

عنوانها: Etude de l'efficacité inhibitrice sur la corrosion de l'acier, d'un terpolymère conducteur synthétisé, sous champ magnétique.

أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

توقيع المعني (ة)

التاريخ: 2024 جويلية

| | |
|------------------------------|-----------------------------|
| البويرة في <u>2024/06/30</u> | هيئة مراقبة السرقة العلمية: |
| | النسبة: <u>13</u> % |

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce mémoire.

Tout d'abord, nous remercions chaleureusement M. Belkacemi Samir, notre encadreur, pour ses conseils avisés, sa patience et son soutien constant tout au long de cette recherche. Son expertise et sa rigueur scientifique ont été des sources d'inspiration et d'encouragement pour nous.

Nous souhaitons également remercier le directeur de l'institut ainsi que tous les ingénieurs du laboratoire, dont l'aide précieuse a grandement contribué à la réussite de ce projet. Leur disponibilité et leurs compétences ont été indispensables.

Nous sommes infiniment reconnaissants envers notre famille, et notamment notre mère, notre père, et nos sœurs, pour leur amour, leur compréhension et leur soutien sans faille. Leur présence et leurs encouragements ont été essentiels à la réalisation de ce mémoire.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réussite de ce mémoire. Votre aide et votre soutien ont été inestimables.

Merci à tous.

Dédicace

*Je remercie avant tout **Allah** pour m'avoir accordé la force, la patience et la détermination nécessaires pour accomplir cette recherche.*

*Je dédie ce travail à **mes parents**, pour leur amour inconditionnel et leur soutien indéfectible. Vous avez toujours cru en moi et m'avez encouragé à donner le meilleur de moi-même.*

*Je dédie également ce travail à **mon cher frère**, que Dieu ait son âme. Compagnon de route qui nous a quittés, nos moments ensemble étaient comme une histoire inoubliable, pleine de rires, d'enseignements et d'aventures. Aujourd'hui, mes mots expriment une profonde tristesse pour ta perte et pour les moments qui ne reviendront plus. J'aurais tant souhaité te voir à mes côtés aujourd'hui, mais le destin a écrit une séparation douloureuse. Que Dieu t'accorde Sa miséricorde et t'accueille dans Ses vastes paradis. Puissé-je trouver la force de continuer mon chemin sans toi, en attendant le jour où nous nous retrouverons pour l'éternité dans un monde de paix et de bonheur.*

*À **mes sœurs**, pour leur amour et leur soutien constants.*

Je remercie également mon encadrant, M. Belkacemi Samir, pour son soutien, ses conseils avisés et sa patience tout au long de ce travail.

*Et à **mes chères amies**, en particulier à mon amie **HAMADACHE Chafika**, qui ne m'a jamais privé de son soutien infini et de sa générosité. Elle a toujours été à mes côtés, me donnant force et courage, m'encourageant avec toute son expérience et son savoir, sans jamais envier mes réussites, et bien sûr mon ami **GRAZEM O**.*

*Enfin, à toute **ma famille**, pour leur présence et leur soutien tout au long de ce parcours académique.*

MAOUCHE Samia

Dédicace

C'est avec une immense joie et un grand honneur, joignant toute la chaleur de mon cœur que je dédie ce modeste travail :

A mon cher père

A mon cher père Brahim aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi.

Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse dieu le tout puissant te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A ma chère mère

A ma très chère mère honorable aimable

Tu représente pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager.

Ta prière et ta bénédiction m'ont été un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.

A mon cher frère

Cher frère, ton cœur généreux et ton esprit aimant font de toi un être extraordinaire. Votre soutien et vos encouragements ont rendu ce travail possible.

A toute ma famille et mes chers amis

En témoignage l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous, vous êtes toujours dans mon cœur je vous remercie d'être l'épaule sur laquelle je peux toujours compter.

Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite

MATARI Khadidja Malak

Liste des abréviations

Liste des abréviations

| | |
|--------------------|--|
| PANI | Polyaniline |
| POT | Polyorthotoluidine |
| POMA | Polyorthométhoxyaniline |
| FT-IR | Infra Rouge à Transformée de Fourier |
| UV-Vis | Ultra-violet |
| Visible DRX | la diffraction des rayons X |
| DMSO | Di-méthylsulfoxyde |
| PCE | Polymères Conducteurs Extrinsèques |
| PCI | Polymères Conducteurs Intrinsèques |
| OMA | Orthométhoxyaniline |
| OA | Ortho-anisidine |
| OT | O-toluidine |
| ANI | Aniline |
| ISO | Organisation Internationale de Normalisation |
| NACE | National association of corrosion engineers |

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre 1 : Etude bibliographique

| | |
|---|----|
| FIGURE I. 1: SCHEMA DE L'HISTORIQUE DES POLYMERES CONDUCTEURS. | 3 |
| FIGURE I. 2: SCHEMA DES TYPES DE POLYMERES CONDUCTEURS ELECTRONIQUES..... | 5 |
| FIGURE I. 3: SCHEMA DE METHODES DE SYNTHESE DES POLYMERES CONDUCTEURS..... | 6 |
| FIGURE I. 4: SCHEMA DES APPLICATIONS DE POLYMERES CONDUCTEURS..... | 7 |
| FIGURE I. 5: LA STRUCTURE DE PANI. | 8 |
| FIGURE I. 6: LA STRUCTURE DE L'ORTHOMETHOXYANILINE..... | 9 |
| FIGURE I. 7: LA STRUCTURE DE L'O-TOLUIDINE..... | 10 |
| FIGURE I. 8: MECANISME DE SYNTHESE DU TERPOLYMERE CONDUCTEUR (ANI-co-OMA-co-OT). | 12 |
| FIGURE I. 9: LE MAGNETISME DANS LA MATIERE. | 16 |

Chapitre II : Matériel et techniques de caractérisations

| | |
|---|----|
| FIGURE II. 1: ETAPES DE LA PREPARATION DU MILIEU DE SYNTHESE ET DE LA TERPOLYMERISATION. | 25 |
| FIGURE II. 2: SOLUTIONS SOUS AGITATION..... | 25 |
| FIGURE II. 3: DISPOSITIFS DE CHAMP MAGNETIQUE UTILISES POUR LA TERPOLYMERISATION.... | 26 |
| FIGURE II. 4: FILTRATION SOUS VIDE..... | 27 |
| FIGURE II. 5: PRODUIT FINAL..... | 27 |
| FIGURE II. 6: SPECTROMETRE FTIR-4200 DE JASCO. | 28 |
| FIGURE II. 7: SPECTROPHOTOMETRE UV-VISIBLE CARY 60 UV-Vis..... | 29 |
| FIGURE II. 8: ÉCHANTILLON DU TERPOLYMERE A ANALYSER PAR SPECTROSCOPIE UV-VIS. | 30 |
| FIGURE II. 9: APPAREIL DE DIFFRACTION DES RAYONS X (DRX). | 31 |
| FIGURE II. 10: LES ECHANTILLONS D'ACIER..... | 32 |
| FIGURE II. 11: ÉCHANTILLONS AVANT LA CORROSION. | 33 |

Chapitre III : Résultats et discussions

| | |
|--|----|
| FIGURE III. 1: MASSE DE TERPOLYMERE SYNTHETISES SOUS DIFFERENTS CHAMPS MAGNETIQUES. | 35 |
| FIGURE III. 2: SPECTRE UV-VIS DE TERPOLYMERE SYNTHETISE SOUS ET SANS MAGNETISME. . | 37 |
| FIGURE III. 3: SPECTRE FTIR DE TERPOLYMERE SYNTHETISE SOUS ET SANS MAGNETISME | 39 |
| FIGURE III. 4: SPECTRES DRX DE TERPOLYMERE SYNTHETISE SOUS ET SANS MAGNETISME. | 41 |
| FIGURE III. 5: VARIATION DE LA PERTE DE POIDS DE L'ACIER EN FONCTION DE TEMPS. | 42 |
| FIGURE III. 6: PERTE EN POIDS DE L'ACIER EN PRESENCE ET L'ABSENCE DE TERPOLYMERE. | 43 |
| FIGURE III. 7: ACIER IMMERSÉ DANS HCL SANS INHIBITEUR APRES CORROSION. | 44 |
| FIGURE III. 8: ACIER IMMERSÉ DANS HCL AVEC INHIBITEUR APRES CORROSION..... | 45 |
| FIGURE III. 9: VARIATION DE LA PERTE DE POIDS DE L'ACIER AVEC ET SANS INHIBITEUR DANS LE MILIEU HCL..... | 46 |
| FIGURE III. 10: ACIER IMMERSÉ DANS NaCl AVEC INHIBITEUR APRES CORROSION..... | 47 |

| | |
|---|----|
| FIGURE III. 11: ACIER IMMERGE DANS NaCl AVEC INHIBITEUR APRES CORROSION..... | 47 |
| FIGURE III. 12: VARIATION DE LA PERTE DE POIDS DE L'ACIER AVEC ET SANS INHIBITEUR DANS LE MILIEU NaCl..... | 48 |
| FIGURE III. 13: RENDEMENT D'EFFICACITE DE L'INHIBITEUR DANS LE MILIEU NaCl. | 50 |
| FIGURE III. 14: RENDEMENT D'EFFICACITE DE L'INHIBITEUR DANS LE MILIEU HCl..... | 51 |
| FIGURE III. 15: SPECTRES DRX DE L'ACIER AVANT ET APRES CORROSION DANS LE MILIEU NaCl. | 54 |
| FIGURE III. 16: SPECTRES DRX DE L'ACIER AVANT ET APRES CORROSION DANS LE MILIEU NaCl. | 57 |

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre 1 :Etude bibliographique

TABLEAU I. 1: LES TYPES DE CORROSION..... 17

Chapitre II : Matériel et techniques de caractérisations

TABLEAU II. 1 LES PRODUITS UTILISES

TABLEAU II. 2: DIMENSIONS DES ECHANTILLONS DU L'ACIER.....

Chapitre III : Résultats et discussions

TABLEAU III. 1:MASSE DE TERPOLYMERE SYNTHETISE SOUS ET SANS L'EFFET DE CHAMP
MAGNETIQUE..... 35

TABLEAU III. 2: MASSE DE L'ACIER AVANT ET APRES CORROSION DANS LE MILIEU HCL..... 45

TABLEAU III. 3: MASSE DE L'ACIER AVANT ET APRES CORROSION DANS LE MILIEU NaCl. 48

TABLEAU III. 4: MASSE DE L'ACIER AVANT ET APRES CORROSION DANS LE MILIEU NaCl 49

TABLEAU III. 5: MASSE DE L'ACIER AVANT ET APRES CORROSION DANS LE MILIEU NaCl. 51

Sommaire

Sommaire

| | |
|---|----|
| Remerciement | |
| Dédicace | |
| Liste des abréviations | |
| Liste des figures | |
| Liste des tableaux | |
| Sommaire | |
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre 1 :Etude bibliographique | |
| I. Etude bibliographique | 3 |
| I.1. Introduction sur Les polymères conducteurs | 3 |
| I.2 Historique des polymères conducteurs | 3 |
| I.3. Définition de polymère conducteur | 4 |
| I.4. Type de polymères conducteurs..... | 4 |
| I.4.1. Les polymères conducteurs ioniques | 4 |
| I.4.2. Les polymères conducteurs électroniques | 4 |
| I.5. Dopage des polymères conducteurs..... | 5 |
| I.6. Méthodes de synthèse des polymères conducteurs | 6 |
| I.7. Applications des polymères conducteurs..... | 7 |
| I.8. Les polymères conducteurs usuels | 7 |
| I.9. Mécanisme de terpolymérisation | 10 |
| I.10. Synthèse bibliographique..... | 12 |
| I.11. Le magnétisme | 15 |
| I.11.1. Le magnétisme d'un matériau..... | 15 |
| I.11.2. Effet du magnétisme sur les solutions électrolytiques | 16 |
| I.12. La corrosion | 17 |
| I.12.1. Définition | 17 |
| I.12.2. Type de corrosion | 17 |
| I.12.3. Réaction électrochimique..... | 18 |
| I.13. Inhibition de la corrosion | 19 |
| I.13.1. Définition | 19 |
| Références bibliographiques | |

Chapitre II : Matériel et techniques de caractérisations

| | |
|---|----|
| II. Matériel et techniques de caractérisations | 22 |
| II.1. Réactifs utilisés | 22 |
| II.2. Matériel utilisé | 23 |
| II.3. La préparation des solutions à utiliser | 23 |
| II.4. Synthèses du terpolymère (ANI-co-OMA-co-OT) par oxydation chimique..... | 25 |
| II.5. Synthèse du terpolymère sous l'effet de magnétisme | 26 |
| II.6. Caractérisation des polymères synthétisés..... | 28 |
| II.6.1. Spectroscopie infrarouge | 28 |
| II.6.2. La spectroscopie UV-Vis..... | 29 |
| II.6.3. La diffraction de rayons X (DRX)..... | 30 |
| II.6. Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier dans le milieu NaCl 3% | 31 |
| II.6.1. Etude gravimétrique : | 31 |
| Références bibliographiques | |

Chapitre III : Résultats et discussions

| | |
|--|----|
| Chapitre III : Résultats et discussions. | 35 |
| III.1. Résultats de la masse des polymères | 35 |
| III.2. Caractérisation par spectroscopie UV-Visible : | 37 |
| III.3. Caractérisation par spectroscopie infrarouge (FTIR) | 38 |
| III.4. Caractérisation par diffraction aux rayons X | 40 |
| III.4. Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier dans le milieu NaCl 3% | 42 |
| III.4.1. Etude gravimétrique: | 42 |
| III.4.2. Analyse par diffraction des rayons X (DRX) et caractérisation des produits de corrosion:..... | 54 |
| III.4.2.1. Analyse par DRX pour le milieu NaCl: | 54 |
| III.4.2.2. Analyse par DRX pour le milieu HCl: | 57 |
| Références bibliographiques | |
| Conclusion..... | 60 |
| Résumé | 62 |

Introduction générale

Introduction générale

La corrosion est un phénomène universellement connu qui entraîne chaque année d'importantes pertes matérielles pour l'industrie et la collectivité. Plus grave encore, elle peut causer des dommages irréversibles à l'environnement et même entraîner des problèmes de santé tels que la pollution et la contamination. De plus, elle affecte les appareils et structures en service, provoquant des altérations telles que la diminution générale d'épaisseur, la génération de piqûres et des fissures de corrosion sous tension dans les zones soudées ou à leur voisinage. Ces considérations justifient l'intérêt actuel pour la lutte anticorrosion. Les travaux de recherche se sont concentrés sur l'étude de la corrosion et ont abouti à des méthodes de protection avancées. Parmi ces méthodes, on trouve la protection cathodique, les traitements de surface et l'ajout d'inhibiteurs de corrosion. Ces derniers constituent un moyen original de lutter contre la corrosion, et leurs performances sont évaluées en termes de protection métallique et environnementale [1].

L'utilisation des polymères conducteurs dans les solutions anticorrosion est une approche innovante qui offre une protection efficace contre la corrosion. Ces polymères, sont appliqués sur les surfaces métalliques pour créer une barrière qui inhibe la dissolution du métal. Le processus implique généralement un prétraitement de la surface métallique suivi d'une électropolymérisation du polymère [2].

Les recherches ont montré que ces polymères, lorsqu'ils sont correctement formulés, peuvent offrir une protection comparable, voire supérieure, à celle des revêtements traditionnels. De plus, leur flexibilité et leur facilité de mise en œuvre les rendent adaptés à une large gamme d'applications industrielles. Les études continuent d'explorer de nouvelles formulations et méthodes d'application pour améliorer encore l'efficacité des polymères conducteurs dans la lutte contre la corrosion [3].

Les dérivés de polyaniline(PANI) sont des polymères conducteurs importants en raison de leurs caractéristiques distinctives telles que la conductivité électrique, la stabilité thermique et la facilité de préparation en solutions aqueuses. Plusieurs auteurs ont réussi à électro polymériser la PANI sur divers aciers et ont démontré son efficacité comme inhibiteur de corrosion. Une approche consistant à préparer des poudres de polymère conducteur solubles et à les utiliser comme inhibiteur de corrosion a également été envisagée. Gospondinova et Terlemzyan ont synthétisé par voie chimique une poudre de polyaniline difficilement soluble dans la plupart des solvants organiques [4]. En combinant l'aniline avec l'un de ses dérivés ou entre deux dérivés d'aniline, ils ont obtenu de nouveaux composés plus

solubles. Les propriétés de ces nouveaux composés dépendent du choix des monomères et des conditions de polymérisation [5,6].

Dans ce contexte, l'étude s'est concentrée sur la synthèse d'un terpolymère conducteur à base d'aniline et de ses dérivés (orthométhoxyaniline et orthotoluidine). Les caractéristiques de ce terpolymère ainsi que son effet sur l'inhibition de corrosion de l'acier dans le milieu NaCl 3% ont été examinés.

Dans ce cadre, ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Le chapitre I est consacré aux aspects théoriques de base relatifs aux polymères conducteurs et la Corrosion ainsi qu'à son inhibition.

Le chapitre II présente les méthodes expérimentales pour la synthèse du terpolymère (ANI-CO-OT-CO-MA) par polymérisation chimique, avec et sans magnétisme, et son utilisation comme inhibiteur de corrosion. Les techniques de caractérisation utilisées incluent la spectroscopie infrarouge (IR), la spectroscopie UV-Vis, et la diffraction des rayons X (DRX). Enfin, les méthodes d'étude de l'inhibition de corrosion par gravimétrie dans des solutions de NaCl à 3% et d'HCl à 1M.

Le chapitre III englobe les résultats expérimentaux et les interprétations liés à la caractérisation du terpolymère poly (ANI-CO-OMA-CO-OT) afin de confirmer sa synthèse et de tenter son identification. Il englobe aussi les résultats des tests d'inhibition de la corrosion de l'acier utilisant le terpolymère dissous dans le diméthylsulfoxyde(DMSO). Par ailleurs, il se focalise sur l'évaluation de l'effet inhibiteur de différents terpolymères, synthétisés sous l'influence de divers champs magnétiques, sur la corrosion de l'acier en présence de deux types de solutions corrosives : une solution saline (NaCl à 3%) et une solution acide (HCl à 1 M).

Une conclusion générale résumant l'essentiel des résultats de ce travail sera présentée à la fin de ce Travail.

Références bibliographiques

- [1] Aalloua-Nazef, M. (2009). "Introduction des polymères conducteurs dans la lutte contre la corrosion saline des installations pétrolières et gazières de surface." *Revue de l'Algerian Petroleum Institute*, 3(2), Juillet.
- [2] Pham, M.C., Mourcel, P., Lacaze, P.-C., & Dubois, J.-E. (1985). "Évaluation des propriétés anti-corrosives des films de poly (oxyde de phénylène) obtenus par électropolymérisation de phénols sur acier." *Bulletin de la Société Chimique de France*, 1169.
- [3] DeBerry, D.W. (1986). *Journal of the Electrochemical Society*, 132, 1022.
- [4] Gospodinova, N., & Terlemezyan, L. (1998). *Progress in Polymer Science*, 23, 443.
- [5] Rivas, B.L., Sanchez, C.O., Bernede, J.-C., & Basaez, L. (2003). *Journal of Applied Polymer Science*, 90, 706.
- [6] Fan, J., Wan, M., & Zhu, D. (1998). *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 36, 3013.

CHAPITRE I :
Etude bibliographique

I. Etude bibliographique

I.1. Introduction sur Les polymères conducteurs

Les polymères conducteurs, un terme général englobant divers polymères conjugués, présentent une structure en chaîne caractérisée par une conjugaison totale, conférant ainsi des propriétés électriques communes qui les rapprochent des semi-conducteurs. Leur capacité à conduire l'électricité est essentiellement obtenue par le dopage, où des composés sont introduits pour augmenter leur conductivité. Parmi les exemples courants de polymères conducteurs figurent le polyaniline, le polypyrrole ...etc. Ces matériaux sont cruciaux dans un large éventail d'applications, de l'électronique organique aux dispositifs électroniques flexibles, en raison de leurs propriétés électriques ajustables et de leur capacité à être transformés en diverses formes pour répondre aux besoins spécifiques des applications [1].

I.2 Historique des polymères conducteurs

L'histoire des polymères est riche en découvertes et en avancées scientifiques. Le terme "polymère" a été officiellement introduit dans le lexique scientifique en 1832 par le célèbre chimiste suédois Jöns Jacob Berzelius:

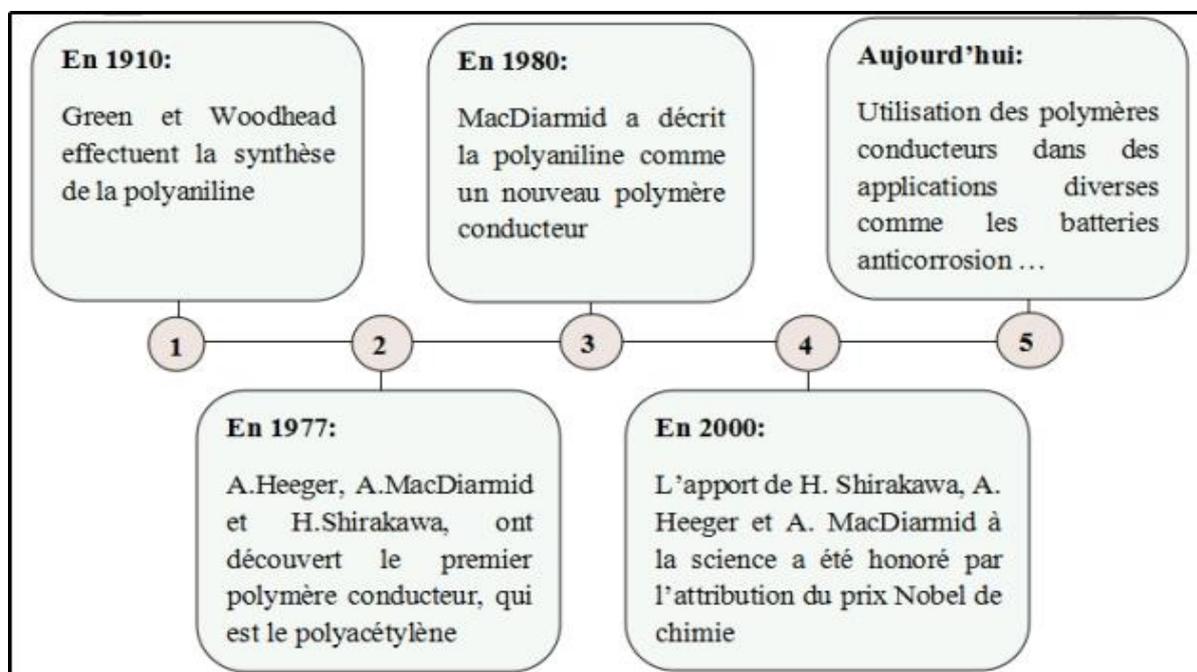


Figure I. 1:Schéma de l'Historique des polymères conducteurs [2-4].

I.3. Définition de polymère conducteur

Les polymères conducteurs représentent une catégorie de matériaux polymères ayant la capacité de transporter des charges électriques, Contrairement aux polymères conventionnels qui agissent généralement comme des isolants électriques. Les polymères conducteurs présentent une structure π -conjuguée spéciale qui permet la délocalisation des électrons le long de leur chaîne moléculaire et cette structure π -conjuguée se caractérise par une alternance de liaisons simples et doubles, conférant ainsi une grande rigidité à la chaîne moléculaire. Par conséquent, ces polymères deviennent insolubles et non fondus [5,6].

Afin d'améliorer leur conductivité électrique, les polymères conducteurs sont souvent dopés avec des composés favorisant le transport des charges électriques.

I.4. Type de polymères conducteurs

Les polymères conducteurs sont habituellement regroupés en deux principales catégories, selon le type de charge électrique qui se déplace à travers leur structure polymère:

I.4.1. Les polymères conducteurs ioniques

Les polymères conducteurs ioniques sont des matériaux qui présentent une conductivité électrique grâce à la capacité des ions de se déplacer au sein de leur structure polymère. Cette mobilité ionique est essentielle pour permettre le passage du courant électrique à travers le matériau. Ces polymères sont largement utilisés dans diverses applications, en particulier en tant qu'électrolytes solides. Ils sont employés dans les piles à combustible. De plus, les polymères conducteurs ioniques sont également utilisés comme membranes séparatrices dans les piles à combustible et d'autres dispositifs électrochimiques [7].

I.4.2. Les polymères conducteurs électroniques

Les polymères conducteurs électroniques sont couramment divisés en deux catégories distinctes :

Les polymères conducteurs extrinsèques (PCE) et les polymères conducteurs intrinsèques (PCI) [8]:

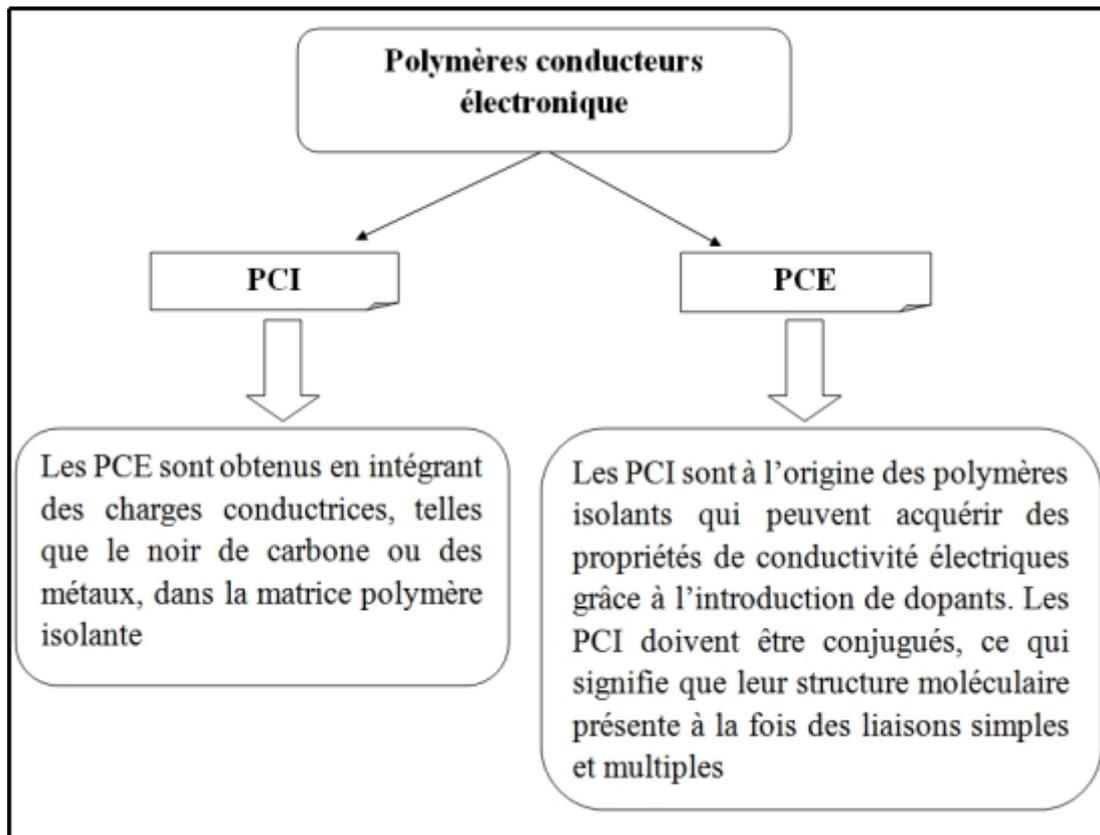


Figure I. 2:Schéma des types de polymères conducteurs électroniques [8].

I.5. Dopage des polymères conducteurs

Les polymères conducteurs se comportent comme des isolants à l'état neutre ou réduit. Cependant, grâce à un processus appelé dopage, ils peuvent être convertis en matériaux conducteurs en introduisant des porteurs de charge mobiles. Bien que le terme « dopage » soit emprunté au domaine des semi-conducteurs inorganiques, le dopage des polymères conducteurs est différent. Il s'agit d'une réaction chimique destinée à augmenter sa conductivité électrique à des niveaux comparables à ceux des métaux [9].

Généralement, cette réaction redox implique l'introduction d'une espèce donneuse d'électrons pour le dopage de type n (réductions du polymère) ou d'une espèce acceptrice d'électrons pour le dopage de type p (oxydation du polymère). Ces substances, appelées dopants ou contre-ions, assurent la neutralité électrique du matériau et induisent des charges le long des chaînes polymères. Une augmentation du taux de dopage peut conduire à un passage d'un état isolant à un état conducteur [10].

I.6. Méthodes de synthèse des polymères conducteurs

Deux grandes méthodes de synthèse se distinguent dans la fabrication des polymères conducteurs [11-13]:

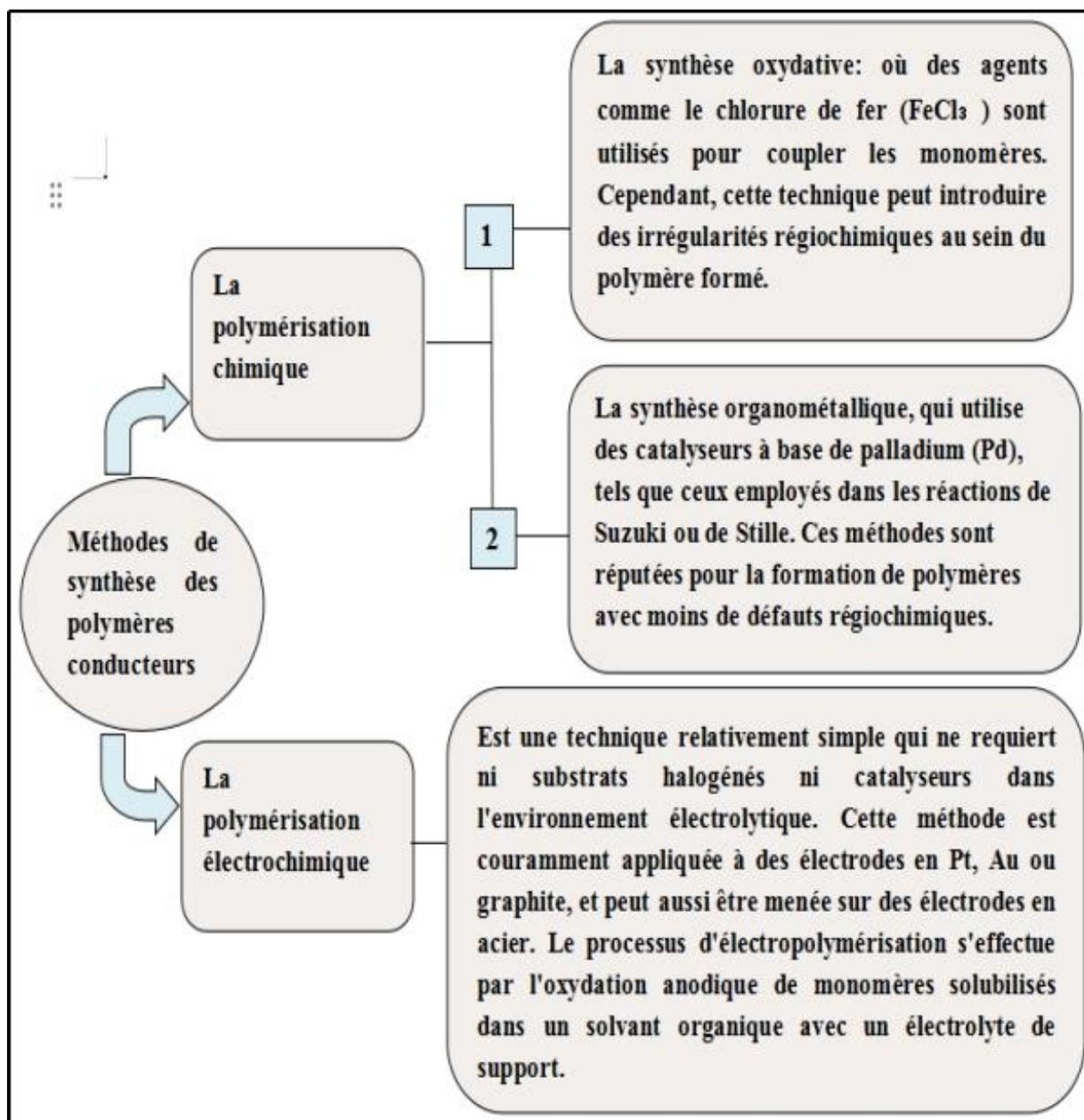


Figure I. 3:Schéma de méthodes de synthèse des polymères conducteurs [11-13].

I.7. Applications des polymères conducteurs

Les polymères conducteurs sont polyvalents grâce à leurs nombreuses caractéristiques et propriétés [14]:

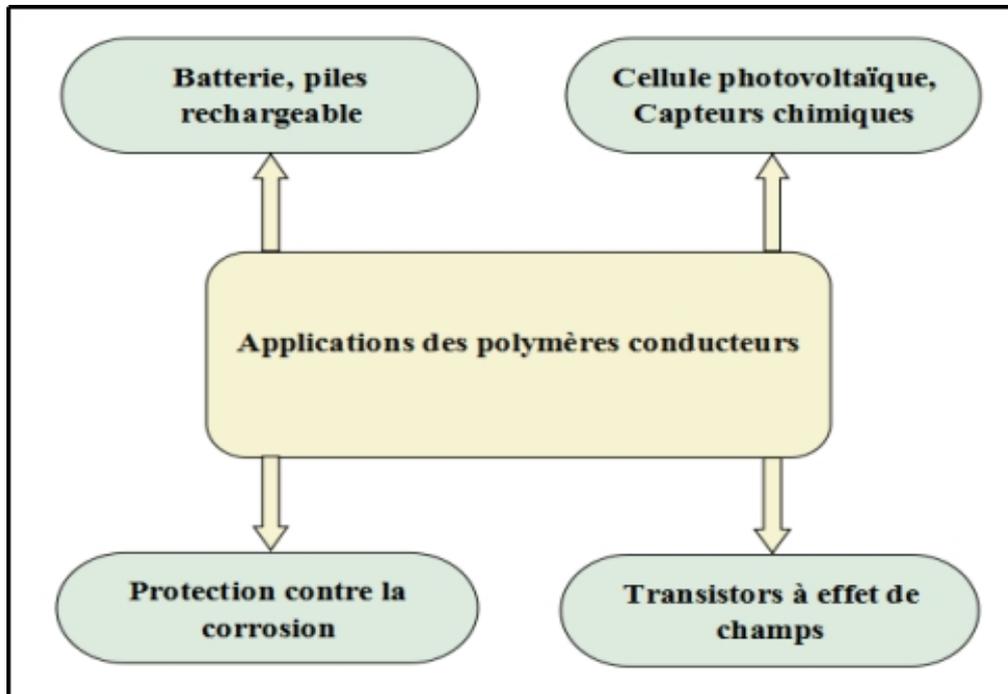


Figure I. 4:Schéma des applications de polymères conducteurs [14].

I.8. Les polymères conducteurs usuels

- **Polyaniline:**

La polyaniline (PANI), une poudre de teinte vert sombre, est obtenue par la polymérisation oxydative de l'aniline. Ce polymère peut être synthétisé avec divers niveaux d'oxydation. Sa stabilité, sa simplicité de synthèse, ainsi que ses propriétés électriques, optiques et électrochimiques distinctives, le distinguent au sein de la catégorie des polymères conducteurs. Les premières publications réussies sur l'électropolymérisation de l'aniline datent du début des années 1960 [15]. Cependant, c'est dans les années 1980 que Mac Diarmid a présenté la polyaniline comme étant un polymère conducteur innovant [3].

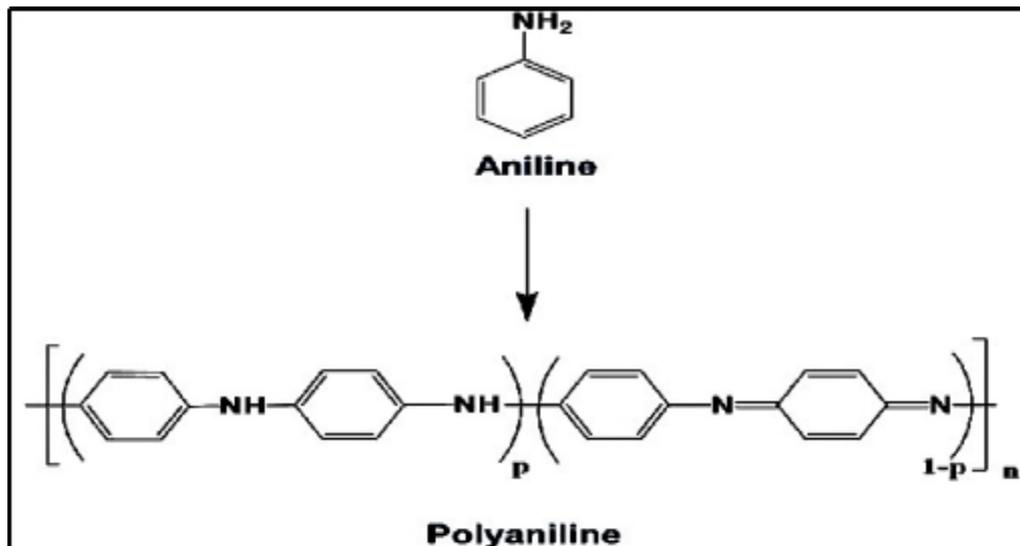


Figure I. 5:La structure de PANI.

La valeur de p détermine le degré d'oxydation du polymère. Chaque degré d'oxydation p correspond à une forme spécifique de polyaniline, qui possède des propriétés physiques et chimiques particulières.

- ✓ **La base leucoéméraldine** se présente sous forme d'un solide blanc entièrement réduit, composé uniquement de motifs réduits de type benzène diamine. Cependant, cette substance est sujette à une oxydation rapide lorsqu'elle est exposée à l'air [16].
- ✓ **L'éméraldine base**, quant à elle, est un solide bleu semi-oxydé, constitué d'un mélange équilibré de motifs réduits de type benzène diamine et d'unités oxydées de type quinone diimine. Cette forme de PANI est considérée comme stable [16].
- ✓ **Enfin, la base pernigraniline** se présente sous forme d'un solide rouge totalement oxydé, composé exclusivement de motifs oxydés de type quinone diimine. Cependant, ce solide est sujet à une hydrolyse rapide en milieu acide [16].

- **Polyorthométhoxyaniline:**

L'orthométhoxyaniline (OMA), également connue sous le nom d'Ortho-anisidine (OA), est une molécule dérivée de l'aniline. Elle se distingue de l'aniline par la présence d'un groupement méthoxyle (OCH_3) en position ortho. L'orthométhoxyaniline (OMA), également connue sous le nom d'Ortho-anisidine (OA) ou o-anisidine [17]:

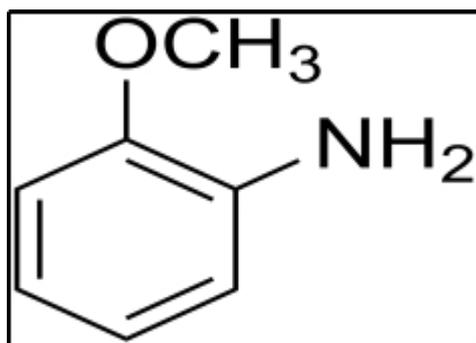


Figure I. 6:La structure de L'orthométhoxyaniline.

L'Orthométhoxyaniline se distingue par une densité de 1.092 à 25°C, une masse molaire de 123.16 g/mol et un point d'ébullition de 225°C. Le Polyorthométhoxyaniline (POMA) se dissout dans les solvants organiques courants, particulièrement lorsqu'il est dopé, contrairement à la polyaniline non modifiée qui est insoluble. L'augmentation de la solubilité pour la polyaniline modifiée est due à l'accroissement de la torsion angulaire du cycle phénylique adjacent, résultant de la contrainte stérique des substituants en position ortho [17].

La polymérisation de l'OMA est induite uniquement par la présence d'un donneur de type π en position ortho. Le polymère formé se développe rapidement grâce à la capacité du groupe méthoxyle (OCH_3) à céder des électrons. L'ajout d'un second groupe OCH_3 au cycle benzénique a également été étudié ; le poly (2,5-diméthoxyaniline) synthétisé présente une conductivité élevée, atteignant un maximum de 0,32 S/cm, et se dégrade plus aisément. La présence des groupes méthoxyles favorise l'oxydation du polymère [17].

- **Poly o-toluidine:**

L'o-toluidine, un liquide jaune clair qui se brunifie au contact de l'air et de la lumière, dégage une odeur faiblement aromatique perceptible dès 0,25 ppm. Elle se dissout modérément dans l'eau et est miscible avec l'éthanol et l'oxyde de diéthyle [18].

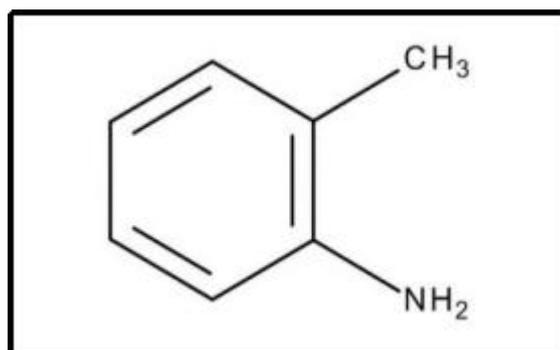
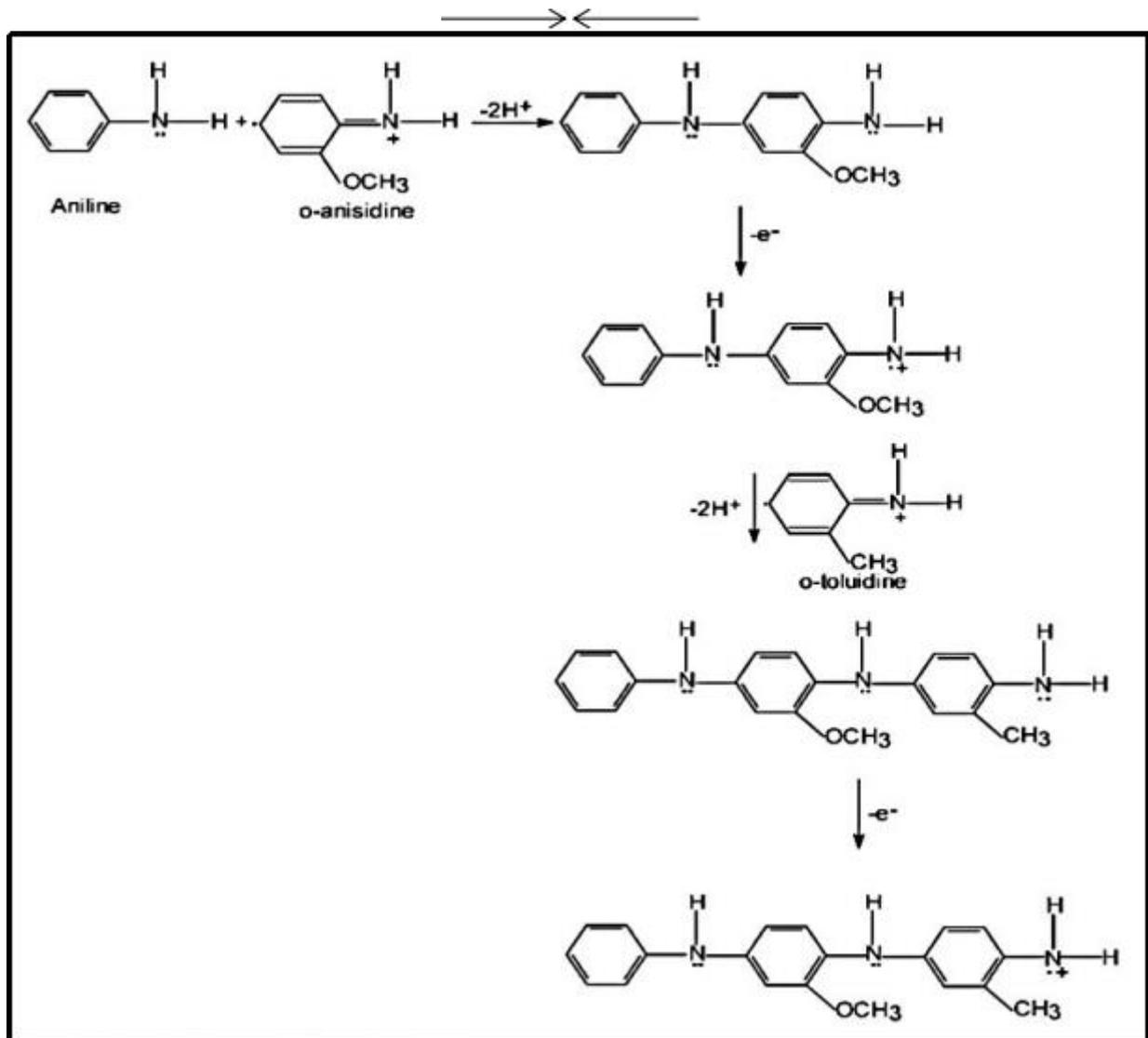


Figure I. 7: La structure de L'o-toluidine.

Dans des conditions normales de température et de pression, l'o-toluidine est stable, mais elle s'oxyde progressivement en présence d'air ou de lumière, prenant une teinte brune. Elle réagit fortement avec des agents oxydants puissants et des acides concentrés. Comme les autres amines aromatiques, elle est une base faible, ses sels sont en général des solides hydrosolubles. La combustion de l'o-toluidine produit des fumées toxiques contenant des oxydes d'azote et du monoxyde de carbone. L'o-toluidine n'est pas corrosive pour l'aluminium, mais peut dissoudre ou ramollir certains types de caoutchouc [18,19].

I.9. Mécanisme de terpolymérisation

Le mécanisme de synthèse du terpolymère conducteur (ANI-co-OMA-co-OT) implique la polymérisation de trois monomères : aniline (ANI), o-méthoxyaniline (OMA), et o-toluidine (OT). Ces monomères sont combinés en présence d'un agent oxydant comme le persulfate d'ammonium pour former un polymère conducteur. La réaction de polymérisation se déroule généralement par une série d'étapes, incluant l'initiation, la propagation et la terminaison, aboutissant à la formation du terpolymère conducteur:



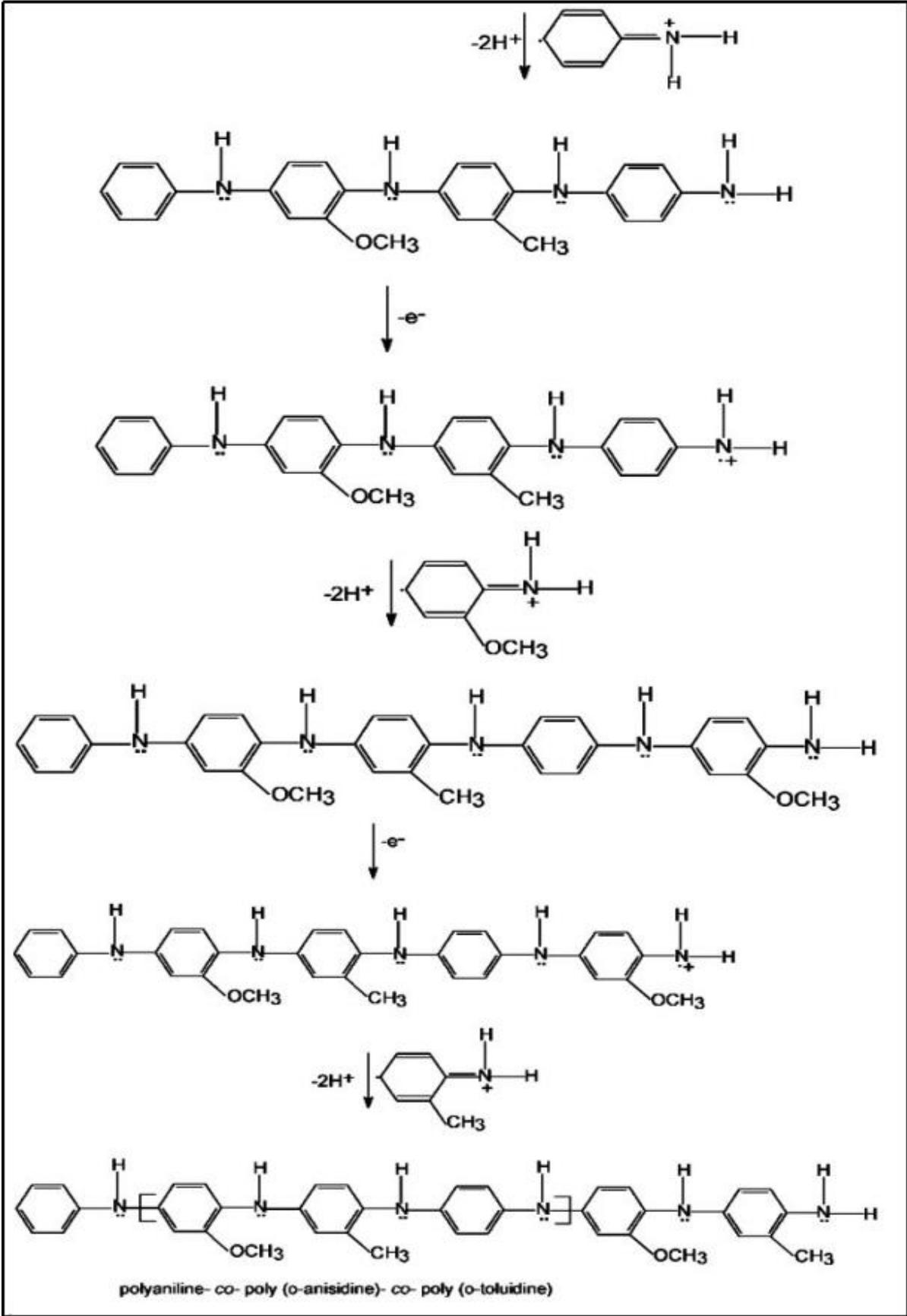


Figure I. 8: Mécanisme de synthèse du terpolymère conducteur (ANI-co-OMA-co-OT) [20].

I.10. Synthèse bibliographique

Plusieurs auteurs ont réalisé la synthèse de différents terpolymères chacun pour un objectif bien précis, on cite :

Belkacemi, S: il a mis au point la synthèse chimique d'un terpolymère conducteur soluble : poly (aniline-co-o-méthoxyaniline-co-o-toluidine) (noté (PA-co-POA-co-POT)) en milieu aqueux d'acide chlorhydrique en présence d'un oxydant fort (persulfate d'ammonium). Ce terpolymère a été caractérisé par différentes techniques d'analyse, ce qui lui a permis d'être identifié et de connaître ses propres caractéristiques en comparaison avec ses homopolymères. Afin de mettre en valeur ce terpolymère conducteur, une application comme inhibiteur de corrosion de l'acier dans le milieu NaCl 3% a été réalisée.

Borole, D. D., Kapadi, U. R., Mahulikar, P. P., & Hundiwale, D. G: Une technique simple est décrite pour la construction d'un capteur de glucose par l'emprisonnement de la glucose oxydase (GOD) dans des films minces de poly(aniline-co-o-anisidine-co-o-toluidine) [P(A-co-o-A-co-o-T)], qui ont été déposés électrochimiquement sur une plaque de platine dans un tampon phosphate et acétate. La réponse maximale du courant a été observée pour lesdits électrodes à un pH de 5,5 et un potentiel de 0,60 V (par rapport à Ag/AgCl). Le tampon phosphate offre une stabilité élevée et une réponse rapide par rapport au tampon acétate dans les mesures ampérométriques [21].

Adeosun, W. A., Katowah, D. F., Asiri, A. M., & Hussein, M. A: ont fourni une tendance et une évolution sur les méthodes de synthèse des terpolymères et de leurs applications pour la première fois dans la littérature ouverte. Une grande attention a été portée sur les homopolymères et les copolymères au début de la recherche sur les polymères conducteurs, mais la quête d'amélioration des propriétés optiques, électrochimiques et conductrices a conduit à la recherche en terpolymérisation conductrice. Cela présente des avantages pour la production de masse du film polymère, mais présente des limites dans le contrôle de l'épaisseur du film et sa faible conductivité. Dernièrement, la recherche sur la synthèse des polymères conducteurs a évolué au fil des ans et les méthodes électrochimiques ont été la méthode de synthèse préférée car elles offrent des propriétés améliorées pour le film polymère. Les terpolymères ont été appliqués au fil des ans à diverses applications dans la biosensibilité électrochimique, les inhibiteurs de corrosion et les cellules solaires polymères [22].

Li, X. G., Duan, W., Huang, M. R., & Yang, Y. L: Une série de terpolymères a été synthétisée par la polymérisation oxydative chimique de la m-phénylènediamine (MPD), de l'o-anisidine (AS) et de la 2,3-xylidine (XY) dans un milieu aqueux d'hydrochlorure. Le rendement, la viscosité intrinsèque et la solubilité des terpolymères ont été étudiés en modifiant le rapport molaire MPD/AS/XY de 100/0/0 à 53/39/8 à 0/100/0. Il a été découvert que les terpolymères MPD/AS/XY présentent un rendement de polymérisation plus élevé et une meilleure solubilité que les bipolymères MPD/AS et MPD/XY ayant la même teneur molaire en MPD. Les terpolymères MPD/AS/XY préparés ont été caractérisés par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier, ultraviolet-visible, RMN du proton, et RMN du carbone solide à haute résolution ; diffraction des rayons X à grand angle ; et thermogravimétrie [23].

Marques, M. F. V., & Coutinho, F. M. B: Des terpolymérisations d'éthylène, de propylène et de diène (1,3-butadiène, 1,5-hexadiène ou 1,7-octadiène) par le système catalytique MgH₂/TiCl₄-AlEt₃ ont été réalisées. Les compositions des terpolymères obtenus ont été évaluées. L'effet de la concentration de diène dans le milieu réactionnel pour chaque système de polymérisation sur la composition du terpolymère a été observé. La structure des motifs répétés de diène a également été étudiée [24].

Li, X. G., Huang, M. R., Pan, P., Zhu, Z. L., & Yang, Y. L: Une série de terpolymères solubles a été synthétisée par polymérisation oxydative de la 2-pyridylamine, de l'aniline et de la 2,3-xylidine en utilisant du persulfate d'ammonium comme oxydant dans une solution aqueuse de HCl à 1 M. Le rendement, la viscosité intrinsèque et la solubilité des terpolymères ont été étudiés en variant le rapport des monomères et le temps de polymérisation. À une teneur fixe en xylidine de 10 % en moles, le rendement et la viscosité intrinsèque des terpolymères diminuent avec l'augmentation de la teneur en pyridylamine et restent presque constants avec le temps de polymérisation. Les terpolymères résultants ont été caractérisés par FT-IR, RMN du proton, diffraction des rayons X à grand angle et thermogravimétrie [25].

Li, L., Yin, Z., Li, F., Xiang, T., Chen, Y., & Zhao, C: Dans cette étude, des terpolymères fonctionnels de poly(acrylonitrile-acide acrylique-vinylpyrrolidone) (P(AN-AA-VP)) avec différentes proportions de monomères ont été synthétisés par polymérisation radicalaire en solution libre en utilisant le N-méthyl-2-pyrrolidone (NMP) comme solvant. L'analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) et la calorimétrie différentielle à balayage (DSC) ont confirmé que les terpolymères ont été synthétisés avec succès [26].

Srivastava, A. K., Kamal, M., Kaur, M., Pandey, S., Daniel, N., Chaurasia, A. K., & Pandey, P: Le terpolymère, poly(styrène-acrylonitrile-linalol), a été synthétisé par polymérisation radicalaire en solution des monomères donneurs d'électrons, le linalol (optiquement actif) (LIN) et le styrène (STY) avec le monomère accepteur d'électrons, l'acrylonitrile (AN), en utilisant le peroxyde de benzoyle (BPO) comme initiateur et le xylène comme diluant à 75 °C pendant 40 minutes. Le système suit une cinétique idéale. $R_p \propto [BPO]^{0.5} [LIN]^{1.0} [STY]^{1.0} [AN]^{1.0}$ [27].

Michael, P. E., Barbe, J. M., Juneja, H. D., & Paliwal, L. J: Le terpolymère (8-HQGF) a été synthétisé en utilisant les monomères 8-hydroxyquinoléine, guanidine et formaldéhyde dans des proportions molaires de 1:1:2. La structure du terpolymère 8-HQGF a été élucidée sur la base de l'analyse élémentaire et de diverses techniques physico-chimiques, à savoir la spectroscopie UV-Visible, FTIR-ATR et RMN du proton. Une étude détaillée de la dégradation thermique du nouveau terpolymère a été réalisée pour déterminer sa stabilité thermique [28].

Borole, D. D., Kapadi, U. R., Mahulikar, P. P., & Hundiwale, D. G: L'influence des électrolytes supportant inorganiques et organiques sur les propriétés électrochimiques, optiques et conductrices de films minces de terpolymères de poly(aniline-co-o-anisidine-co-o-toluidine) a été étudiée. Des films minces homo et terpolymères ont été synthétisés électrochimiquement, sous des conditions de voltamètre cyclique dans des solutions aqueuses d'acides inorganiques, à savoir H₂SO₄, HCl, HNO₃, H₃PO₄ et HClO₄, et d'acides organiques, à savoir l'acide benzoïque, l'acide cinnamique, l'acide oxalique, l'acide malonique, l'acide succinique et l'acide adipique à température ambiante. Les films ont été caractérisés par voltampérométrie cyclique, spectroscopie UV-Visible et mesures de conductivité à l'aide de la technique à quatre pointes. Il a été observé que les densités de courant sont fortement influencées par la taille et la nature de l'anion présent dans l'électrolyte [29].

I.11. Le magnétisme

I.11.1. Le magnétisme d'un matériau

Le magnétisme d'un matériau découle des déplacements des électrons autour du noyau des atomes constituant ce matériau. Ces électrons, en se déplaçant le long de leurs orbites, génèrent un petit moment magnétique orbital perpendiculaire à leur trajectoire. De plus, chaque électron tourne sur lui-même, créant ainsi un autre petit moment magnétique appelé

"spin". Ce mouvement de rotation du spin induit également un champ magnétique. Ainsi, à la fois le mouvement orbital et le spin des électrons créent des dipôles magnétiques qui interagissent avec un champ magnétique externe appliqué [30].

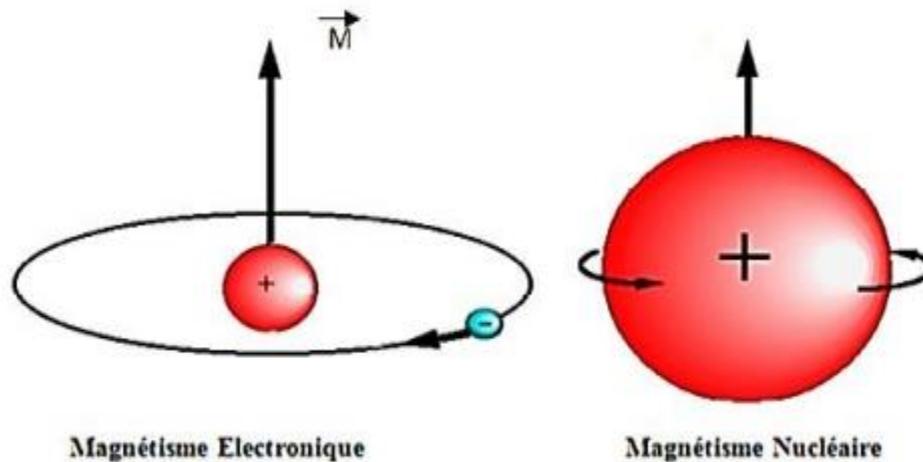


Figure I. 9:Le magnétisme dans La matière [31].

I.11.2. Effet du magnétisme sur les solutions électrolytiques

Diverses recherches ont été menées sur les impacts des champs magnétiques sur les solutions aqueuses et les biomatériaux. Cependant, ces effets magnétiques ont souvent été perçus comme peu fiables et énigmatiques. Cela est dû en partie au fait que les données présentées jusqu'à présent manquent parfois de quantification et de reproductibilité. Puisque les phénomènes se produisent pour des matériaux non magnétiques, mécanisme pour expliquer les effets magnétiques n'a pas été donné par l'électromagnétisme actuel [32].

Récemment, Higashitani et al. ont rapporté une série de données quantitatives sur les effets de l'exposition magnétique sur le taux de coagulation rapide des colloïdes, la formation de CaCO₃ de cristaux et la diffusivité des colloïdes dans les solutions d'électrolytes, et sur l'intensité d'émission des sondes fluorescentes dans les solutions, ainsi qu'un mécanisme possible pour expliquer les données.

Ces nouvelles données ont conduit à une reconnaissance croissante des effets des champs magnétiques sur les solutions, suggérant une relation avec des changements au niveau des molécules d'eau, des ions ou des ions hydratés adsorbés à la surface solide [33].

I.12. La corrosion

I.12.1. Définition

La corrosion est un phénomène physico-chimique qui se produit lorsque les métaux interagissent avec leur environnement, entraînant des modifications dans leurs propriétés et souvent une dégradation fonctionnelle [34].

Ces processus obéissent aux lois thermodynamiques, où les métaux ont tendance à retourner à leur état d'origine. À l'exception des métaux nobles tels que l'or et le platine, qui se trouvent à l'état natif, la plupart des métaux se trouvent à l'état minéral sous forme d'oxydes, de sulfures, de carbonates et de silicates [35].

I.12.2. Type de corrosion

Il existe plusieurs façons par lesquelles la corrosion peut altérer un métal, variant selon sa composition et les conditions environnementales. Une classification étendue des différentes manifestations de corrosion révèle cinq types principaux [36]:

Tableau I. 1: les types de corrosion [36].

| Type | Caractéristique |
|----------------------------------|--|
| Uniforme | Cette forme de corrosion implique l'attaque de toute la surface du métal, et elle est la plus fréquente. |
| Localisée | Dans cette forme de corrosion, certains secteurs de la surface du métal subissent une corrosion à des taux plus élevés que d'autres. Ceci est attribuable à l'hétérogénéité de la surface métallique, aux conditions environnementales, ou à la géométrie de la structure dans son ensemble. |
| Corrosion par piqûres | Cette forme de corrosion se caractérise par une attaque fortement localisée sur des secteurs spécifiques du métal, créant de petits puits qui pénètrent dans le matériau et peuvent éventuellement entraîner sa perforation. |
| Dissolution sélective | Cela se produit lorsque l'un des éléments d'un alliage est préférentiellement corrodé par rapport aux autres, laissant les autres composants relativement intacts. |
| Corrosion sous Contrainte | Cela se produit lorsque la corrosion agit en conjonction avec un facteur mécanique, tel que des contraintes, pour causer une rupture localisée ou une défaillance du matériau. |

I.12.3. Réaction électrochimique

La corrosion est un phénomène électrochimique qui résulte du couplage de deux demi-réactions. Une demi-réaction électrochimique se produit lorsque les électrons apparaissent soit du côté des produits (ce qui correspond à une réaction d'oxydation), soit du côté des réactifs (ce qui correspond à une réaction de réduction). Ces processus sont intimement liés à l'électrochimie et ont été étudiés depuis l'invention de la pile voltaïque par Alessandro Volta. De nos jours, les techniques électrochimiques utilisées pour étudier la corrosion incluent la mesure des potentiels de corrosion, les courbes de polarisation, les mesures d'impédance et l'analyse des fluctuations spontanées de potentiel ou de courant (bruit électrochimique) [37].

- **Réaction anodique : (cas de milieu NaCl)**

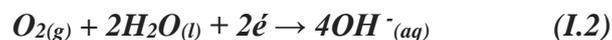
La réaction anodique se produit à la surface de l'acier, où les atomes de fer sont oxydés et perdent des électrons. Cela entraîne la formation d'ions ferreux (Fe^{2+}), Cette réaction libère des électrons qui migrent vers la cathode:



Cette oxydation s'accompagne de la libération d'électrons, qui joueront un rôle dans la réaction cathodique.

- **Réaction cathodique :**

A la cathode, les électrons libérés lors de la réaction anodique sont captés par l'oxygène dissous dans l'électrolyte (le milieu NaCl), entraînant une réaction de réduction. Cette réaction produit des ions hydroxyde (OH^-) qui réagissent avec les ions ferreux pour former des hydroxydes de fer:



I.13. Inhibition de la corrosion

Pour lutter contre la corrosion, plusieurs stratégies peuvent être adoptées : optimiser le choix du matériau, sa forme et ses contraintes selon l'usage ; appliquer des traitements de surface tels que revêtements ou peintures ; ou modifier l'environnement du matériau en utilisant des inhibiteurs de corrosion. L'emploi d'inhibiteurs est une méthode répandue pour la protection des métaux et alliages. Bien que les composés organiques soient reconnus pour leur haute efficacité inhibitrice, leur utilisation est restreinte en raison de leur toxicité environnementale, de leur coût élevé et de leur non-biodégradabilité. Ces préoccupations ont poussé la recherche vers les composés naturels, qui offrent une alternative écologique et sans danger comme agents anticorrosion [38].

I.13.1. Définition

La protection des matériaux contre la corrosion par l'utilisation d'inhibiteurs peut être mise en œuvre de manière durable ou provisoire, comme durant la phase de stockage. Ces inhibiteurs doivent répondre à des critères précis, notamment réduire la vitesse de corrosion sans altérer les propriétés physiques du métal, être efficaces même à de faibles concentrations et rester stables face aux divers composants de l'environnement ou aux changements de température [39].

Selon la norme ISO 8044 de l'Organisation internationale de normalisation, un inhibiteur est défini comme une substance chimique introduite dans un système corrosif à une concentration déterminée pour son efficacité, qui a pour effet de diminuer la vitesse de corrosion sans influencer significativement la concentration des agents corrosifs présents dans l'environnement agressif [40].

D'après la NACE (National Association of Corrosion Engineers), un inhibiteur est caractérisé comme une substance qui ralentit la corrosion lorsqu'elle est ajoutée en petite quantité à un milieu [41].

On cite comme travaux ayant utilisé les polymères conducteurs comme inhibiteurs de corrosion les deux travaux suivants :

Brinis, N.: Dans ce présent mémoire, il a été présenté une étude sur la synthèse de polymères conducteurs : le polypyrrole, la polyaniline et l'un de ces substitués (poly orthométhoxyaniline : POMA), en vue d'une application à l'inhibition de la corrosion de l'acier en milieu acide sulfurique à pH 0,3. Dans le premier volet de ce travail, des poudres de polymères POMA et POMA dopé avec AABS ont été synthétisées par voie chimique puis caractérisées par différentes méthodes d'analyses (UV-Visible, DRX, IR). Plusieurs solvants ont été testés pour solubiliser les poudres obtenues. Le meilleur taux de solubilisation est enregistré avec l'éthanol. L'effet inhibiteur apporté par ces produits a été ensuite mis en évidence en milieu acide. Dans le second volet, il a été abordé la synthèse électrochimique des revêtements à base de polymères dopés avec les ions molybdate MoO_4^{2-} . Pour ce faire, une étude dans le but d'optimiser les conditions expérimentales permettant d'obtenir des films de polymères (polyaniline ou polypyrrole) adhérents et homogènes sur la surface du métal et ce, à partir d'une solution d'acide oxalique a été nécessaire. Les revêtements obtenus présentent une protection anodique du fer et leur dopage améliore considérablement le temps de protection. Cette amélioration pourrait être le résultat d'une auto cicatrisation de la couche passive sous jacente par les ions de molybdates [42].

Djaouane, L.: Cette étude porte sur la caractérisation électrochimique et spectroscopique des films de polymères organiques conducteurs conjugués obtenus à partir de l'électropolymérisation de deux hétérocycles pentagonaux; le pyrrole et le methyl-2 furanne, dissous dans une solution $\text{CH}_3\text{CN}/\text{LiClO}_4$. L'électrocopolymérisation de ces monomères conduit à la formation d'un copolymère sur la surface d'électrode (platine, ITO). L'analyse des films obtenus par voltampérométrie cyclique montre des pics anodiques et cathodiques caractéristiques de l'oxydation et de la réduction des copolymères formés. Les diagrammes d'impédance montrent un arc de cercle aux hautes fréquences suivi par une droite aux basses fréquences qui sont respectivement caractéristiques d'un processus de transfert de charge et d'un autre purement diffusionnel. La tenue à la corrosion d'un acier A316 protégé par un film du copolymère a été aussi testée dans deux milieux corrosifs (NaCl et H_2SO_4). L'efficacité inhibitrice des revêtements a été aussi justifiée lors du tracé des courbes de Tafel, par un déplacement des potentiels de corrosion vers des valeurs négatives. Les résultats obtenus montrent que ces copolymères organiques peuvent servir d'inhibiteurs de corrosion. Mots

clés: pyrrole, methyl-2 furanne, électropolymérisation, voltampérométrie cyclique, corrosion [43].

Références bibliographiques

- [1] Lamiri, L. (2011). "Analyse des propriétés électrochimiques et spectroscopiques des films de polymères conducteurs issus de l'électrocopolymérisation d'hétérocycles pentagonaux (thiophène, pyrrole, furanne)." Mémoire de magister, Université Farhat Abbas - Sétif, Algérie.
- [2] Nkongo, J. (2005). "Les polymères dans l'industrie." Mémoire de master, Université de Douala, Cameroun.
- [3] Harfouche, N. (2016). "Electrodéposition de revêtements composites à base de polyaniline pour des applications de batterie Lithium-ion et de protection contre la corrosion." Thèse de doctorat, Université de Toulon; Université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie.
- [4] Liu, W., Kumar, J., Tripathy, S., Senecal, K.J., & Samuelson, L. (1999). "Enzymatically Synthesized Conducting Polyaniline." *Journal of the American Chemical Society*, 121, 71–78.
- [5] Martins, S. (2007). "Tétra-et Poly (aniline) Dopées par des Acides n-Alcanesulfoniques: Structures et Propriétés Electroniques." Thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier-Grenoble I.
- [6] Faiza, D.A.H. (2022). "Etude De L'effets Des Particules Métalliques Sur Les Propriété Electriques Et Thermiques Des Nanocomposites." Thèse de doctorat, Faculté des sciences et de la technologie, Université de Bejaïa.
- [7] Champagne, A. (2011). "Synthèse et caractérisation de nouveaux matériaux dérivés de la polyaniline." Mémoire de magister, Université Laval – Québec, Canada.
- [8] Carquigny, S. (2011). "Conception, caractérisation et mise en œuvre de matériaux organiques conducteurs pour le développement de capteurs de gaz pour l'environnement." Thèse de doctorat, Université Lille-1, France.
- [9] Ghzaïel, T.B. (2017). "Synthèse, caractérisation et étude des propriétés magnétiques et diélectriques de nanocomposites Polyaniline/hexaferrite pour l'absorption des micro-ondes." Thèse de doctorat, Université Paris Saclay; Université de Tunis, Faculté des sciences.
- [10] Heeger, A.J. (2002). "A novel role for organic polymers." *Synthetic Metals*, 125, 23-42.

Références bibliographiques

- [11] Khelifa Baghdouche, A., & Bencharif, L. (2018). "Synthèse et étude électrochimiques de nouveaux polymères organiques conducteurs conjugués dérivés de cyanovinylène fluorène." Thèse de doctorat, Université Frères Mentouri-Constantine 1.
- [12] E.E. DE CHIMIE. (2005). "Couplage de Suzuki atropo-diastéréosélectif : Application à la synthèse de la partie biarylique de la Vancomycine."
- [13] Raies, A. (2015). "Elaboration de films minces électroluminescents à base de polymère conducteur électronique et de nanotubes de carbone." Thèse de doctorat, Université Paris Saclay.
- [14] Jönsson, S.K.M., Salaneck, W.R., & Fahlman, M. (2003). "X-ray photo electron spectroscopy study of the metal/polymer contacts involving aluminum and poly (3, 4-ethylenedioxythiophene)-poly (styrene sulfonic acid) derivatives." *Journal of Materials Research*, 18, 1219-1226.
- [15] Palaniappan, S., & John, A. (2008). "Polyaniline materials by emulsion polymerization pathway." *Progress in Polymer Science*, 33, 732-758.
- [16] Faiza, D.A.H. (2022). "Etude De L'effets Des Particules Métalliques Sur Les Propriétés Electriques Et Thermiques Des Nanocomposites." Thèse de doctorat, Faculté des sciences et de la technologie, Université de Béjaïa.
- [17] Sathingarayanan, S. (1994). *Electrochimica Acta*, 39, 839.
- [18] Son, S., Everett, O.C.K., & Fiala, D.W. (1980). "Metabolism of o-[methyl-14C] toluidine in the F344 rat." *Xenobiotica*, 10(7-8), 457-468.
- [19] Kulkarni, B., Fiala, E.S., & Weisburger, J.H. (1983). " Estimation of N-hydroxy-o-toluidine, aurinarymetabolite of o-toluidine and o-nitrosotoluene, by high performance liquid chromatography with electrochemical detection." *Carcinogenesis*, 4(10), 1275-1279.
- [20] Borole, D.D., Kapadi, U.R., Mahulikar, P.P., & Hundiwale, D.G. (2006). *Journal of Materials Science*, 41, 1983–1990.
- [21] Borole, D.D., Kapadi, U.R., Mahulikar, P.P., & Hundiwale, D.G. (2005). "Glucose oxidase electrodes of a terpolymer poly (aniline-co-o-anisidine-co-o-toluidine) as biosensor." *European Polymer Journal*, 41(9), 2183-2188.

Références bibliographiques

- [22] Adeosun, W.A., Katowah, D.F., Asiri, A.M., & Hussein, M.A. (2021). "Conducting terpolymers and its hybrid nanocomposites variable trends. From synthesis to applications. A review." *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 60(3), 271-285.
- [23] Li, X.G., Duan, W., Huang, M.R., & Yang, Y.L. (2001). "Preparation and characterization of soluble terpolymers from m-phenylenediamine, o-anisidine, and 2, 3-xylylidine." *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 39(22), 3989-4000.
- [24] Marques, M.F.V., & Coutinho, F.M.B. (1993). "Synthesis of ethylene-propylene-diene terpolymers with supported Ziegler-Natta catalyst." *Polymer Bulletin*, 31, 271-278.
- [25] Li, X.G., Huang, M.R., Pan, P., Zhu, Z.L., & Yang, Y.L. (2001). "Synthesis and characterization of a soluble terpolymer from pyridylamine, aniline 1, and xylylidine." *Polymer Degradation and Stability*, 71(3), 333-341.
- [26] Li, L., Yin, Z., Li, F., Xiang, T., Chen, Y., & Zhao, C. (2010). "Preparation and characterization of poly (acrylonitrile-acrylic acid-N-vinylpyrrolidinone) terpolymer blended polyethersulfone membranes." *Journal of Membrane Science*, 349(1-2), 56-64.
- [27] Srivastava, A.K., Kamal, M., Kaur, M., Pandey, S., Daniel, N., Chaurasia, A.K., & Pandey, P. (2002). "Terpolymerization: A review." *Journal of Polymer Research*, 9(3), 213-220.
- [28] Michael, P.E., Barbe, J.M., Juneja, H.D., & Paliwal, L.J. (2007). "Synthesis, characterization and thermal degradation of 8-hydroxyquinoline-guanidine-formaldehyde terpolymer." *European Polymer Journal*, 43(12), 4995-5000.
- [29] Borole, D.D., Kapadi, U.R., Mahulikar, P.P., & Hundiwale, D.G. (2006). "Synthesis and characterization of poly (aniline-co-o-anisidine-co-o-toluidine) thin films in inorganic and organic supporting electrolytes." *Journal of Materials Science*, 41, 1983-1990.
- [30] Robert, P. (1999). "Matériaux de l'électronique, vol. 2". PPUR Presses polytechniques.
- [31] Benmoussa, S. (2017). "Etude de l'aimantation et de l'hysteresis des matériaux ferromagnétiques doux (Fe, FeSi)." Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [32] Barret, P., & Colson, J.C. (2005). « A propos de 3 », *L'Actualité Chimique*, no 288.

Références bibliographiques

- [33] Oshitani, J., Uehara, R., & Higashitani, K. (1999). "Magnetic Effects on Electrolyte Solutions in Pulse and Alternating Fields." *Journal of Colloid and Interface Science*, 209, 374–379.
- [34] AFNOR. (2000). *Corrosion des métaux et alliages : termes principaux et définition (NF EN ISO 8044)*. Paris, AFNOR.
- [35] Vargel, C. (1979). *Le comportement de l'aluminium et de ses alliages*. Dunod Technique, 25-105.
- [36] Uhlig, H.H. (1971). *Corrosion and Corrosion Control*. Wiley, New York.
- [37] Whitman, W., Russell, R., & Altieri, V. (1924). "Ind. Eng. Chem. 16", 665.
- [38] Hamani, H. (2015). "Synthèse, caractérisation et étude du pouvoir inhibiteur de nouvelles molécules base de Schiff." Thèse de doctorat, Université de Sétif 1, p. 4.
- [39] Bommersbach, P. (2005). "Evolution des propriétés d'un film inhibiteur de corrosion sous influencé de la température et de conditions hydrodynamiques, caractérisation par techniques électrochimiques." Thèse génie des matériaux, INSA de Lyon, p. 154.
- [40] Fiaud, C., Lemaitre, C., & Pebere, N. (2002). "Inhibiteur de corrosion." In G. Beranger & H. Mazille (Eds.), *Corrosion et anticorrosion (pratique industrielle), Mécanique et ingénierie des matériaux*, Lavoisier, Paris, Hermès Science Publication.
- [41] NACE. (1965). *Glossary of corrosion Terms*. Materials Protection.
- [42] Brinis, N. (2009). "Application des polymères conducteurs à l'inhibition de la corrosion de l'acier." Thèse de doctorat, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, Faculté de la Technologie.
- [43] Djaouane, L. (2017). "Etude du comportement électrochimique des films de copolymères issus du pyrrole et du méthyl-2 furanne." Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas.

CHAPITRE II :
Matériel et techniques
de caractérisations

II. Matériel et techniques de caractérisations

Ce chapitre est consacré à la présentation des méthodes expérimentales utilisées au cours de ce travail pour la synthèse du terpolymère (ANI-co-OT-CO-OMA) à partir des monomères, en utilisant la méthode de polymérisation par oxydation chimique sous et sans l'effet de magnétisme, ainsi que l'utilisation de ce dernier comme inhibiteur de corrosion. Nous présentons aussi les différentes méthodes et techniques expérimentales utilisés qui sont : la spectroscopie UV-VIS et la spectroscopie infrarouge FT-IR et la diffraction des rayons X (DRX), ces méthodes sont toutes trois des techniques essentielles pour caractériser les films de terpolymères conducteurs synthétisés.

II.1. Réactifs utilisés

Tableau II. 1: Les produits utilisés

| Produits | Formule générale | Masse molaire (g/mol) | Pureté (%) | Densité (g/cm³) |
|------------------------------|---|------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Aniline | C ₆ H ₅ NH ₂ | 93.13 | 99.5 | 1.022 |
| Orthométhoxyaniline | C ₇ H ₇ NH ₂ O | 123.16 | 98 | 1.2316 |
| Toluidine | C ₇ H ₉ N | 107.156 | 99 | 0.998 |
| Persulfate d'ammonium | (NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ | 228.19 | 98 | 1.98 |
| Acide chlorhydrique | HCl | 36.46 | 35 | 1.18 |
| Diméthyle sulfoxyde | C ₂ H ₆ OS | 78.13 | 99 | 1.101 |
| Chlorure de sodium | NaCl | 58.44 | 99.99 | 2.16 |

II.2. Matériel utilisé

- Béchers ;
- Erlenmeyer ;
- Fioles ;
- Éprouvettes ;
- Pro-pipettes ;
- Agitateur à hélice à tige ;
- Agitateur magnétique ;
- Balance de précision ;
- Papier filtre ;
- Pompe à vide ;
- Générateur de courant continu ;
- Dispositif de magnétisme.

II.3. La préparation des solutions à utiliser

✓ Solution de HCl (0.2M)

On a une solution mère de HCl (12.1M), on veut préparer une solution fille à 0.2 M, en utilisant la loi de dilution pour calculer le volume à prélever (1.65 ml pour un volume de 100ml):

$$C_1V_1 = C_2V_2 \rightarrow V_1 = (C_2 \cdot V_2) / C_1$$

C₁ : Concentration de la solution mère d'HCl (M) ;

V₁ : Volume d'HCl à prélever (ml) ;

C₂ : Concentration de la solution fille d'HCl (M) ;

V₂ : Volume de la solution à préparer (ml).

✓ Solution de persulfate d'ammonium (0.1M) dans HCl à 0.2M

Nous dissolvons la masse de persulfate d'ammonium (2.33 g) dans la solution de HCl préalablement préparée. On a calculé la masse par la formule suivante :

$$C * V = (m/M) * P$$

Avec :

C: concentration de la solution à préparer (M) ;

V : volume de la solution à préparer (ml) ;

m : masse de l'oxydant à peser (g) ;

M : masse molaire de l'oxydant (g/mol) ;

P : pureté du produit.

✓ **Volumes des monomères anilines, orthométhoxyaniline et o-toluidine**

On a trois solutions aniline, orthométhoxyaniline et o-toluidine sont pures à 99.5 %, 98 % et 99.1 % respectivement, on veut calculer le volume de 0.1 mol pour les trois solutions.

On trouve $V_{\text{PANI}} = 0.92$ ml, $V_{\text{POMA}} = 1.15$ ml et $V_{\text{POT}} = 1.1$ ml, par l'utilisation d'équation suivante:

$$\rho = m/V$$

II.4. Synthèses du terpolymère (ANI-co-OMA-co-OT) par oxydation chimique

On commence par préparer le milieu de synthèse en dissolvant 2,33 g de persulfate d'ammonium dans 100 ml d'une solution d'HCl [0,2 M]. Pour HCl nous avons préparé 500 ml directement pour plusieurs synthèses;

- On ajoute les volumes des trois monomères en même temps (0.92 ml dans le cas d'ANI, 1.15 ml pour l'OMA et 1.1 ml pour L'OT):

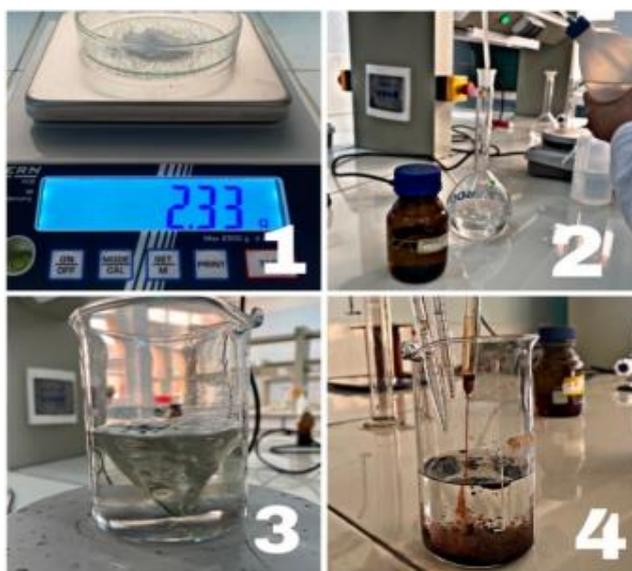


Figure II. 1: Etapes de la préparation du milieu de synthèse et de la terpolymérisation.

- Puis, on laisse la solution sous agitation pendant 2 heures:



Figure II. 2: Solutions sous agitation.

II.5. Synthèse du terpolymère sous l'effet de magnétisme

Pour explorer l'influence du magnétisme sur notre terpolymère, une configuration expérimentale a été établie. Elle implique l'utilisation d'une bobine de fil de cuivre connectée à un multimètre et à un générateur de courant continu. Pour la polymérisation par oxydation chimique, un agitateur à tige a également été employé.

Le principe de cette expérience consiste à appliquer un champ électromagnétique variable au milieu synthétique afin d'examiner l'effet de la force magnétique sur la réaction de polymérisation. En utilisant les mêmes solutions préparées antérieurement, le mélange est versé dans un bécher placé dans le dispositif magnétique.

L'intensité du courant traversant le solénoïde a été modifiée, avec des valeurs de 0,5 A, 1 A, 1,5 A, 2 A et 2,5 A.

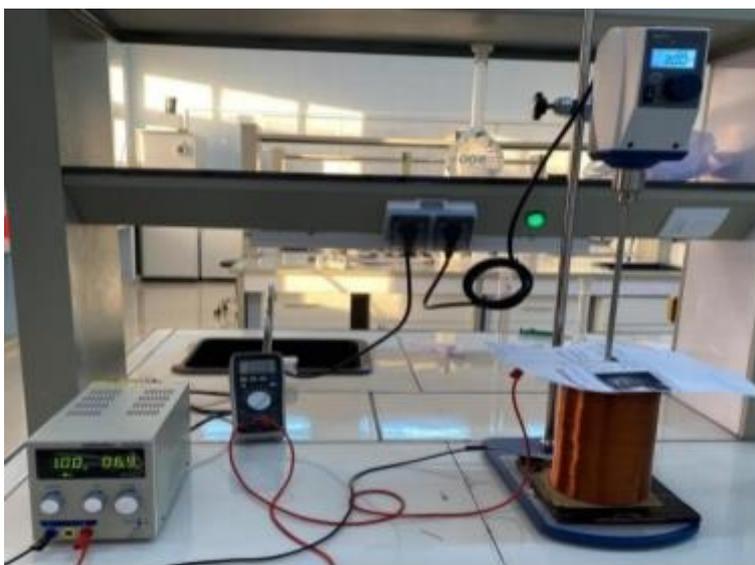


Figure II. 3:Dispositifs de champ magnétique utilisés pour la terpolymérisation.

- Après deux heures d'agitation, on fait une filtration sous vide, puis un lavage par l'eau distillé pour élimination des impuretés solubles :



Figure II. 4:Filtration sous vide.

- Enfin et après la filtration sous vide, nous laissons notre produit sécher :

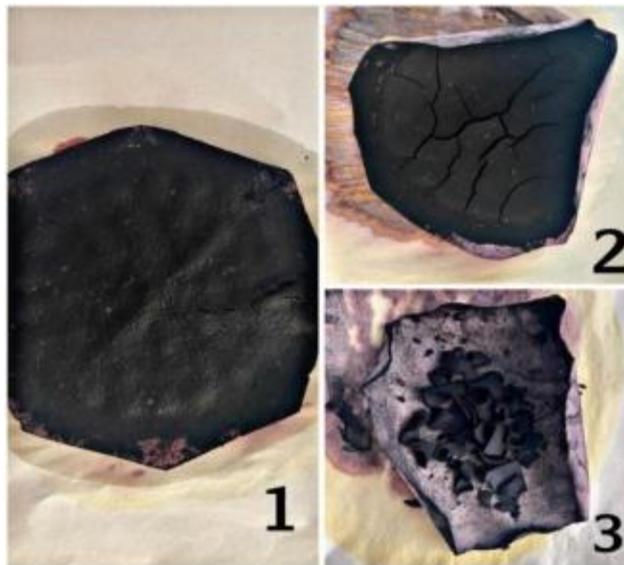


Figure II. 5:Produit final.

II.6. Caractérisation des polymères synthétisés

II.6.1. Spectroscopie infrarouge

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) est une approche analytique qui explore les interactions entre atomes et la disposition des noyaux. Elle offre un accès immédiat aux informations moléculaires, révélant la composition chimique et la structure des matériaux étudiés. Influencées par le rayonnement infrarouge, les molécules de l'échantillon subissent des modifications dans leur état vibratoire, correspondant à des fréquences spécifiques à chaque type de liaison moléculaire. Cette technique d'analyse des vibrations est non invasive et permet une évaluation à la fois qualitative et quantitative [1].

Le spectromètre FTIR-4200 de JASCO est un appareil compact et performant conçu pour répondre à une grande variété d'exigences analytiques. Il offre une excellente résolution et une sensibilité élevée pour répondre aux demandes complexes en spectroscopie infrarouge dans les domaines de la recherche, du développement et de l'analyse de routine.

Le FTIR-4200 est adapté à un large éventail d'applications analytiques, notamment dans les secteurs de la recherche, du développement et de l'analyse de routine, notamment dans des industries telles que la pharmacie. Il peut être facilement optimisé avec de nombreux accessoires tels que l'art, les unités de réflexion diffuse et spéculaire, et être couplé avec des microscopes infrarouges et des systèmes d'imagerie.



Figure II. 6:Spectromètre FTIR-4200 de JASCO.

II.6.2. La spectroscopie UV-Vis

La spectroscopie UV-Vis s'appuie sur les transitions entre différents états électroniques énergétiques. Au sein d'un groupe moléculaire, divers niveaux vibratoires sont possibles, chacun caractérisé par de légères différences énergétiques. Pendant une transition électronique au sein de ce groupe, des changements d'états vibratoires se produisent aussi, ce qui conduit à des absorptions énergétiques variées. Ces dernières sont observées comme des lignes spectrales distinctes, qui, prises ensemble, constituent une bande d'absorption [2,3].

L'appareil **Agilent Technologies Cary 60 UV-Vis** est un spectrophotomètre UV-visible. Il est utilisé pour mesurer l'absorption de la lumière par des échantillons dans la plage des ultraviolets (UV) et du visible (Vis), généralement de 190 à 1100 nanomètres. Cet appareil est largement utilisé dans les laboratoires de recherche, de chimie, de biologie et d'autres domaines pour caractériser les propriétés optiques des matériaux, tels que la concentration des substances chimiques, la pureté des échantillons, ou encore la cinétique de certaines réactions chimiques.



Figure II. 7:Spectrophotomètre UV-visible Cary 60 UV-Vis.

Afin d'analyser la formation du terpolymère, une évaluation par spectrophotométrie UV-Visible est employée pour distinguer les bandes d'absorption propres à chaque polymère synthétisé. Pour cette démarche, des solutions de polymères dissous dans du DMSO à des concentrations uniformes de 25 ppm ont été préparées:



Figure II. 8:Échantillon du terpolymère à analyser par spectroscopie UV-Vis.

II.6.3. La diffraction de rayons X (DRX)

La diffraction de rayons X (DRX) représente une méthode essentielle dans l'analyse des matériaux cristallins. Son utilisation la plus significative en diffractométrie X réside dans la détermination des différentes phases et de la structure d'un échantillon. Cette technique permet l'examen de matériaux formés de nombreux cristaux aux orientations variées. Ces cristaux sont organisés en séries de plans parallèles et espacés régulièrement, connus sous le nom de plans réticulaires (hkl). Lorsqu'un faisceau de rayons X monochromatiques et parallèles frappe l'échantillon, il est diffracté dans des directions spécifiques par les différentes familles de plans réticulaires, chaque fois que la condition de Bragg est satisfaite [4].

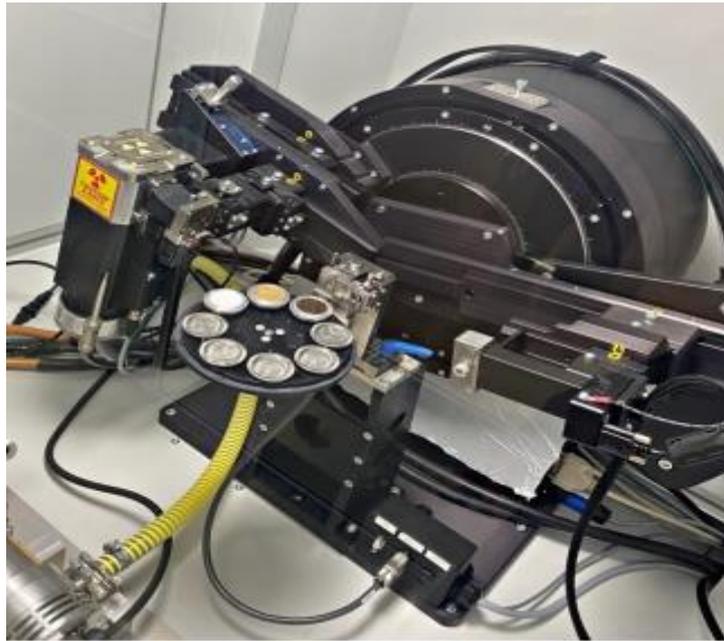


Figure II. 9: Appareil de diffraction des rayons X (DRX).

II.6. Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier dans le milieu NaCl 3%

Pour évaluer l'efficacité inhibitrice de notre terpolymère, nous avons envisagé une approche d'étude gravimétrique. Cette méthode consiste à mesurer la perte de poids d'un métal exposé à une solution électrolytique, ce qui permet de déterminer son degré de corrosion. L'avantage de cette méthode réside dans sa simplicité de mise en œuvre et le fait qu'elle ne nécessite pas un équipement complexe. En effet, en suivant cette approche, nous pouvons obtenir des résultats fiables sur l'efficacité de notre terpolymère en tant qu'inhibiteur de corrosion.

II.6.1. Etude gravimétrique :

Dans le cadre de notre étude gravimétrique, nous avons mesuré la perte de masse subie par des échantillons d'acier immergés dans des milieux corrosifs, avec l'ajout d'inhibiteurs de corrosion :

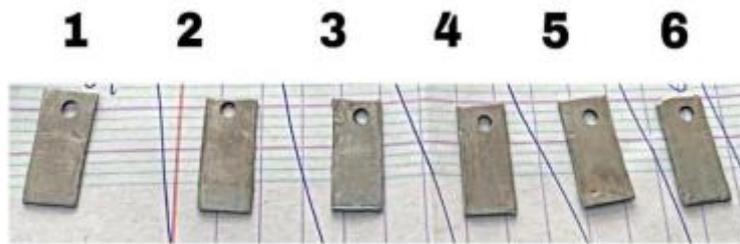


Figure II. 10: Les échantillons d'acier.

Les échantillons d'acier utilisés étaient des parallélépipèdes rectangles présentant des dimensions variées, comme illustré dans le tableau suivant :

Tableau II. 2: Dimensions des échantillons du l'acier.

| Échantillon d'acier | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Masse (g) | 1.1454 | 1.1679 | 1.1420 | 1.1728 | 1.1974 | 1.1319 | 1.1807 |
| Surface (cm ²) | 4.4 | 4.5 | 4.67 | 4.6 | 4.6 | 4.48 | 4.7 |

Partie 1 :

Cette mesure a été effectuée sur une période d'environ 6 jours, avec une concentration de 5 ppm d'inhibiteur.

- Ces échantillons sont immergés dans NaCl 3% avec addition de différents échantillons de l'inhibiteur:
- On numérote nos béchers de 1 à 6.
- On verse la solution de NaCl dans chaque bécher et on ajoute des inhibiteurs selon les conditions suivantes: bécher 1 avec inhibiteur synthétisé sous 0 ampère (sans

magnétisme), bécher 2 sous 0,5 ampère, bécher 3 sous 1 ampère, bécher 4 sous 1,5 ampère, bécher 5 sous 2 ampère, et bécher 6 sous 2,5 ampère:



Figure II. 11:Échantillons avant la corrosion.

- Un septième bécher a été préparé avec seulement la solution de NaCl, sans inhibiteur. Par la suite, de l'acier a été immergé dans chaque bécher conformément aux paramètres expérimentaux. (L'acier numéro 7 est de largeur 1cm, longueur 2.05cm et masse 1.1807).

En mesurant la perte en poids des échantillons à intervalles réguliers de deux à trois jours pendant toute la durée de l'expérience. Toutes les mesures ont été effectuées à la température ambiante, comprise entre 20 et 25 °C.

Partie B :

Cette mesure a été effectuée sur une période d'environ 7 jours, avec une concentration de 50 ppm d'inhibiteur.

Les tests ont été réalisés en immergeant les échantillons dans deux types de solutions : du NaCl à 3% et de l'acide chlorhydrique (HCl) à une concentration de 0,2 M, avec et sans l'ajout d'inhibiteur.

Pour NaCl:

On numérote nos béchers de 1 à 4, Et on verse la solution de NaCl dans chaque bécher et on ajoute des inhibiteurs selon les conditions suivantes : bécher 1 avec inhibiteur synthétisé sous 0 ampère (sans magnétisme), bécher 2 sous 1 ampère, bécher 3 sous 2 ampère, bécher 4 avec seulement la solution de NaCl, sans inhibiteur. Par la suite, de l'acier a été immergé dans chaque bécher conformément aux paramètres expérimentaux.

Pour HCl:

On numérote nos béchers de 1 à 4, Et on verse la solution de HCl dans chaque bécher et on ajoute des inhibiteurs. Selon les conditions suivantes: bécher 1 avec inhibiteur synthétisé sous 0 ampère (sans magnétisme), bécher 2 sous 1 ampère, bécher 3 sous 2 ampère, bécher 4 avec seulement la solution de HCl, sans inhibiteur. Par la suite, de l'acier a été immergé dans chaque bécher conformément aux paramètres expérimentaux.

L'efficacité inhibitrice a été évaluée après une semaine d'immersion. Toutes les mesures ont été effectuées à température ambiante, comprise entre 20 et 25 °C.

Références bibliographiques

[1]Rahal, A. R. M. (2015). "Détection du paranitrophénol par une structure hybride à base de polyvinylpyrrolidone." Thèse de doctorat.

[2] Achour, R. (2013). "Elaboration des verres conducteurs par déposition de ZnO sur des verres ordinaires." Mémoire magister, Université El-Wad.

[3]Benhaddad, L., Bernard, M.C., Deslouis, C., Makhloufi, L., Messaoudi, B., & al. (2013). "Chemical synthesis of hollow seurchin like nano structured polypyrrole particles through a core-shell redox mechanism using a MnO₂ powder as oxidizing agent and sacrificial nano structured template." *Synthetic Metals*, 175, 192-199.

[4] Aicha, Y. (2020). "Synthèse et caractérisation d'un composite hybride 'Polymère/TiO₂'." Doctoral dissertation, université Ibn Khaldoun-Tiaret.

Chapitre III :
Résultats et
discussions

Chapitre III : Résultats et discussions.

Dans ce chapitre, nous mettrons en lumière les résultats obtenus à travers une exploration détaillée et une interprétation minutieuse. Les échantillons synthétisés ont fait l'objet d'une analyse exhaustive à l'aide de diverses techniques de caractérisation. Tout d'abord, nous avons examiné leur structure à l'aide de la spectroscopie FTIR pour comprendre les liaisons chimiques et les fonctionnalités présentes. Ensuite, nous avons utilisé la spectroscopie UV-visible pour évaluer les propriétés optiques, offrant ainsi un aperçu précieux de la réponse des échantillons à la lumière. Par la suite, la technique de diffraction des rayons X (DRX) a été employée pour sonder la structure cristalline et déterminer les phases présentes dans les échantillons. Enfin, une étude sur l'inhibition de la corrosion a été menée, permettant une compréhension plus profonde des propriétés protectrices des matériaux étudiés dans des environnements corrosifs. Les résultats finaux de ces analyses seront présentés et discutés en détail, fournissant ainsi des perspectives précieuses pour comprendre la nature et les performances des matériaux synthétisés.

III.1. Résultats de la masse des polymères

Tableau III. 1: Masse de terpolymère synthétisé sous et sans l'effet de champ magnétique.

| Intensité du courant (A) | 0A | 0.5A | 1A | 1.5A | 2A | 2.5A |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Masse de terpolymère (g) | 0.76 | 0.82 | 0.83 | 0.85 | 0.94 | 0.94 |

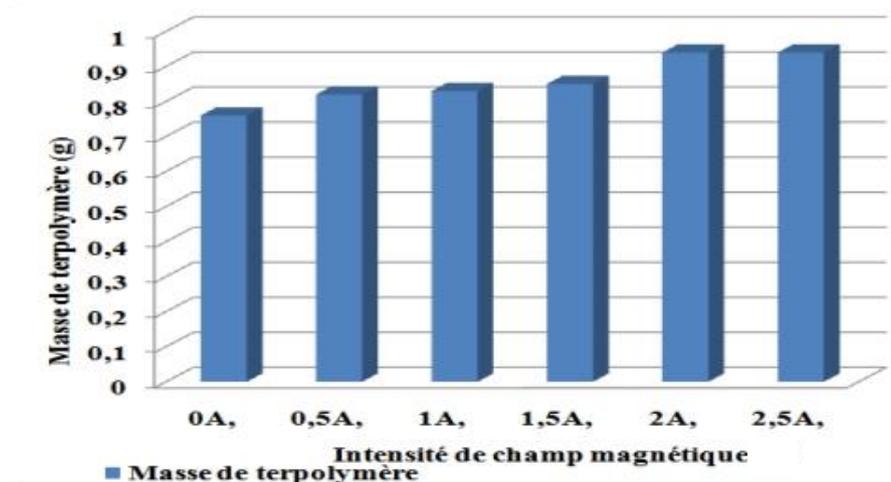


Figure III. 1: Masse de terpolymère synthétisés sous différents champs magnétiques.

La figure (III.1) montre comment l'augmentation de l'intensité du champ magnétique a un effet sur les masses des polymères. On observe que les masses des polymères augmentent lorsque l'intensité du champ magnétique augmente. Cela suggère une relation entre le champ magnétique et les propriétés des polymères. Cette augmentation peut être expliquée par l'alignement des chaînes polymères :

- L'alignement des chaînes polymères signifie que les différentes molécules constitutives des polymères sont alignées dans une direction spécifique. Cet alignement peut être favorisé par l'application d'un champ magnétique et favorise le mécanisme réactionnel [1].

Lorsque les polymères sont formés ou traités en présence d'un champ magnétique, ce champ peut influencer la manière dont les chaînes polymères se comportent. Il peut les orienter dans une direction particulière. Cela rend les chaînes plus cohérentes et bien ordonnées. Au lieu d'être dispersées dans toutes les directions, elles sont orientées dans la même direction, ce qui les rend plus structurées.

- Augmentation de la densité de porteurs de charge : Cela signifie qu'il y a plus de particules chargées (comme les électrons ou les trous, des espaces vides dans une structure cristalline où un électron peut se trouver) dans le matériau [2]:

Le champ magnétique peut pousser les particules chargées à se déplacer d'une certaine manière à travers le matériau et peut aligner ces particules dans une direction particulière. En les alignant, il y a maintenant plus de particules chargées qui se déplacent dans une direction spécifique, ce qui signifie qu'il y a une densité plus élevée de ces particules dans cette direction.

- Formation de structures plus grandes ou plus complexes : L'application d'un champ magnétique peut influencer la manière dont les molécules de polymère se lient entre elles pendant le processus de polymérisation. Sous l'effet du champ magnétique, les chaînes de polymères peuvent former des structures plus grandes ou plus complexes, ce qui se traduit par une masse totale plus élevée [3].
- Incorporation de particules magnétiques : Lorsque vous appliquez un champ magnétique pendant la formation des polymères, il est possible que des particules magnétiques présentes dans l'environnement ou dans les réactifs utilisés soient piégées ou incorporées dans la structure des polymères. Ces particules peuvent être attirées et se lier aux polymères en raison de l'effet du champ magnétique. Par exemple, si des nanoparticules magnétiques sont présentes dans les réactifs ou dans l'environnement,

elles peuvent être attirées vers le polymère en cours de formation et devenir piégées à l'intérieur de sa structure. Ces particules ajoutent de la masse au matériau polymère [4].

III.2. Caractérisation par spectroscopie UV-Visible :

Comme mentionné dans le chapitre II : des solutions de polymères dissous dans du DMSO à des concentrations uniformes de 25 ppm ont été préparées.

Les résultats obtenus sont regroupés et représentés sur la figure (III.2) :

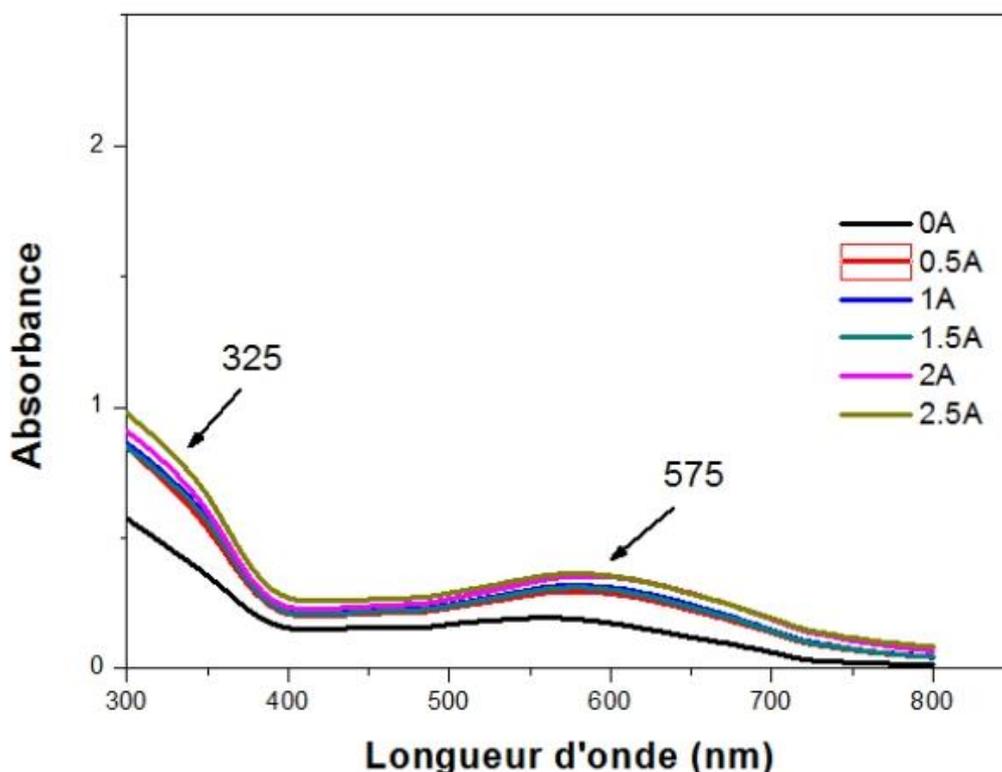


Figure III. 2: Spectre UV-VIS de terpolymère synthétisé sous et sans magnétisme.

D'après la figure III.2 on observe une bande d'absorption aux alentours de 325 nm suivie d'un deuxième large à une longueur d'onde de 575 nm.

Les pics d'absorption dans le spectre sont analysés pour déterminer les transitions électroniques dans la molécule. Chaque pic correspond à une longueur d'onde où il y a une absorption significative de lumière par les électrons de la molécule.

Dans notre cas, les pics à 325 nm et 575 nm sont interprétés comme des transitions spécifiques :

- 325 nm : Transition $\pi \rightarrow \pi^*$ du noyau benzénique.
- 575 nm : Délocalisation des électrons impliquant des atomes d'azote et des systèmes π .

Lorsque le terpolymère est synthétisé en présence de champ magnétique, les pics d'absorption présentent une meilleure absorbance par rapport à ceux du terpolymère synthétisé sans champ magnétique. On peut expliquer cette augmentation de l'absorbance par plusieurs facteurs liés à l'influence du champ magnétique sur les propriétés de la réaction de polymérisation et sur la structure moléculaire du polymère résultant :

➤ Alignement des Chaînes Polymères :

En présence d'un champ magnétique, les chaînes polymères en cours de formation peuvent avoir une tendance à s'aligner dans la direction du champ. Cela peut entraîner une orientation préférentielle des molécules de polymère, ce qui peut favoriser une absorption plus efficace de la lumière incidente dans le spectre d'absorption [5,6].

III.3. Caractérisation par spectroscopie infrarouge (FTIR)

Les polymères synthétisés ont été caractérisés par spectroscopie infrarouge pour identifier les bandes d'absorption spécifiques de chaque polymère. Cette caractérisation permet à la fois leur identification et leur comparaison. Les spectres infrarouges des poudres de terpolymère, obtenues sans l'influence d'un champ magnétique et sous l'influence d'un champ magnétique, sont présentés dans la figure ci-dessous :

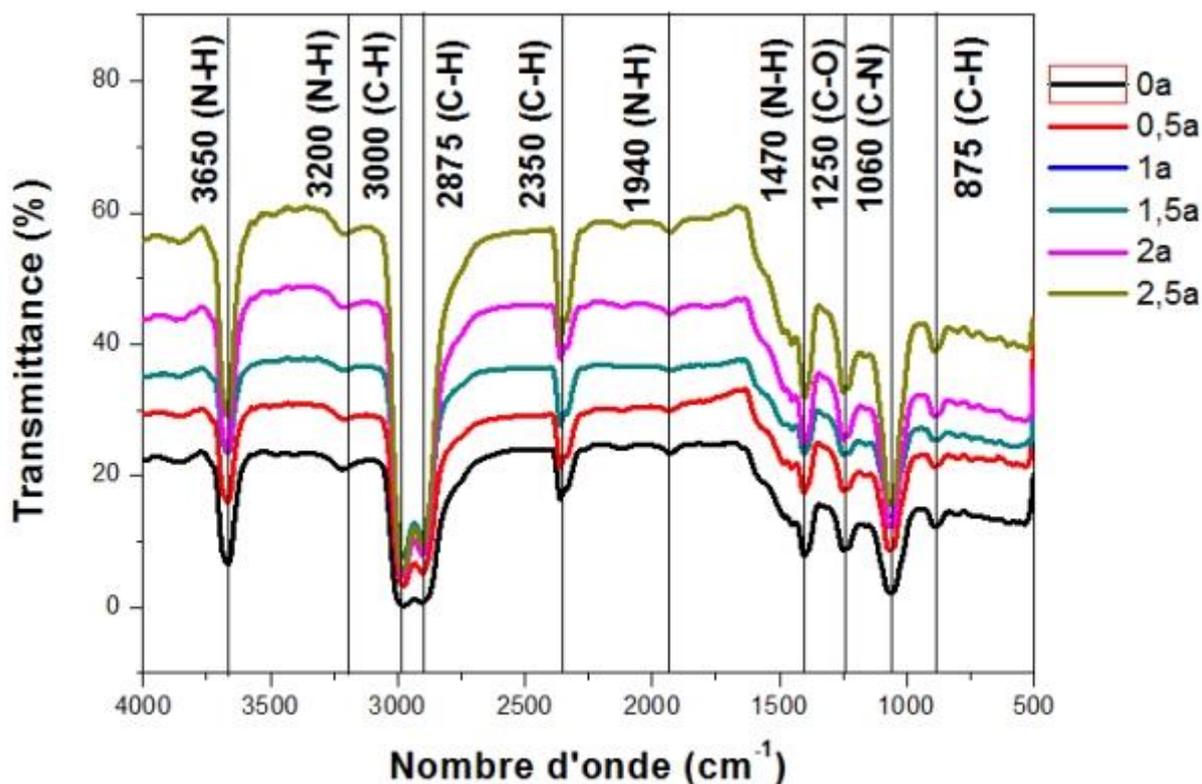


Figure III. 3:Spectre FTIR de terpolymère synthétisé sous et sans magnétisme

D'après la figure (III.3) les principales bandes d'absorption IR caractéristique de terpolymère sont :

- La bande d'absorption à 3650 cm^{-1} et 3200 cm^{-1} correspondent aux vibrations d'élongation N-H ;
- Trois bandes d'absorption à 3000 , 2875 et 2350 cm^{-1} correspondent aux vibrations d'élongation des liaisons C-H aromatiques ;
- La bande d'absorption à 1940 et 1470 cm^{-1} sont associées aux des vibrations déformation des liaisons N-H ;
- La bande d'absorption à 1250 cm^{-1} indique la présence des vibrations d'élongation de la liaison C-O aromatique.
- La bande d'absorption à 1060 cm^{-1} indique la présence des vibrations d'élongation de la liaison C-N.

- La bande d'absorption à 875 cm^{-1} est associée à la présence des vibrations déformation de la liaison C-H.

L'intensification des spectres infrarouges sous l'influence d'un champ magnétique croissant peut être expliquée par plusieurs phénomènes physiques et chimiques qui se produisent à l'échelle moléculaire:

- Effet de Zeeman

L'effet Zeeman se réfère à la scission des niveaux d'énergie des états électroniques, vibrationnels ou rotationnels d'une molécule en présence d'un champ magnétique externe. Lorsque ces niveaux se scindent, les transitions entre les niveaux deviennent plus nombreuses et plus distinctes, ce qui peut entraîner une augmentation de l'intensité des bandes spectrales observées dans l'infrarouge. Cela est particulièrement pertinent pour les transitions rotationnelles et vibrationnelles qui peuvent être affectées par un champ magnétique [7].

III.4. Caractérisation par diffraction aux rayons X

Après avoir identifié notre terpolymère, nous avons procédé à la caractérisation de l'état solide des poudres synthétisées en utilisant la diffraction des rayons X. Cette analyse a permis de déterminer le degré de cristallinité de chaque produit. Les diffractogrammes du terpolymère obtenu par voie chimique sont illustrés à la figure (III.4):

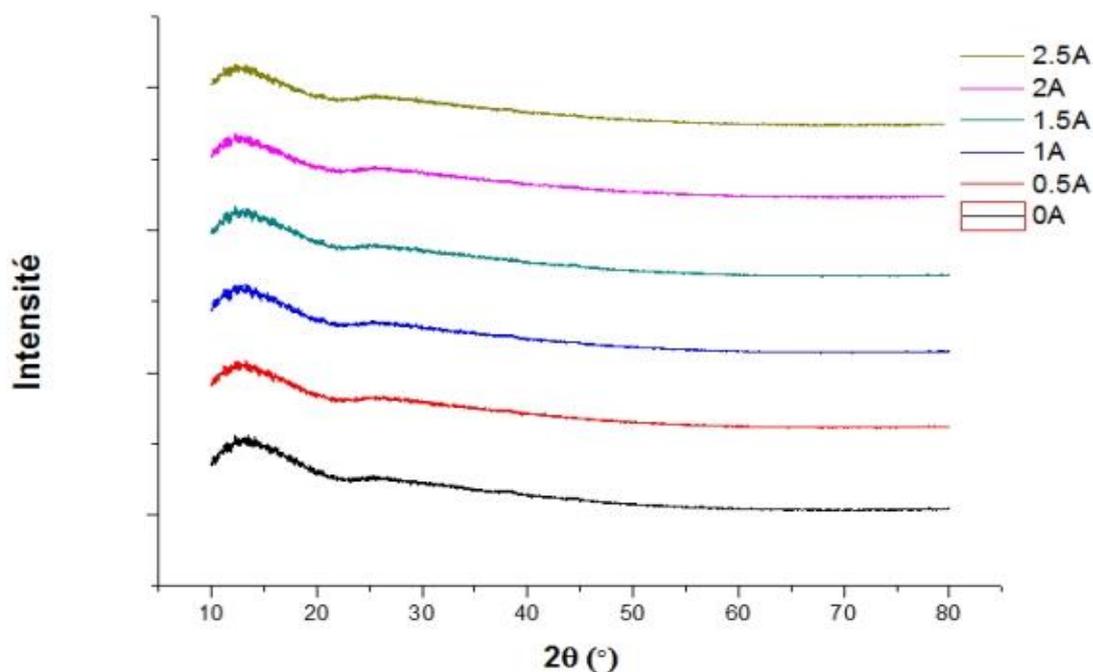


Figure III. 4: Spectres DRX de terpolymère synthétisé sous et sans magnétisme.

L'analyse des différents spectres révèle une tendance commune à tous les polymères : un pic notable s'étendant entre les angles $2\theta = 10^\circ$ et $2\theta = 20^\circ$. Cette caractéristique, connue pour être présente dans les matériaux amorphes, suggère que les polymères étudiés possèdent une structure sans ordre cristallin défini [8].

Les matériaux amorphes présentent généralement des pics larges et diffus en diffraction des rayons X, contrairement aux matériaux cristallins qui montrent des pics étroits et bien définis.

La diminution observée dans les spectres des terpolymères synthétisés à différentes intensités de courant peut être expliquée par l'influence du courant électrique sur la structure et l'ordre des polymères :

- À des intensités de courant plus élevées, l'agitation thermique et moléculaire pendant la polymérisation augmente. Cela peut entraîner une perturbation plus importante de l'ordre cristallin, conduisant à une structure plus amorphe.

Des courants plus élevés peuvent modifier les conditions chimiques de la synthèse, influençant la cinétique de croissance des polymères et favorisant des structures plus amorphes.

III.4. Etude de l'inhibition de la corrosion de l'acier dans le milieu NaCl 3%

III.4.1. Etude gravimétrique:

Partie A:

Le but de cette expérience est d'évaluer l'effet de différents terpolymères, synthétisés sous l'influence de divers champs magnétiques, sur la corrosion de l'acier dans un milieu corrosif de NaCl 3%.

L'étude vise à déterminer l'efficacité de chaque terpolymère comme inhibiteur de corrosion et à comprendre comment le champ magnétique utilisé lors de leur synthèse influence cette efficacité.

Avec **SI** : Sans Inhibiteur.

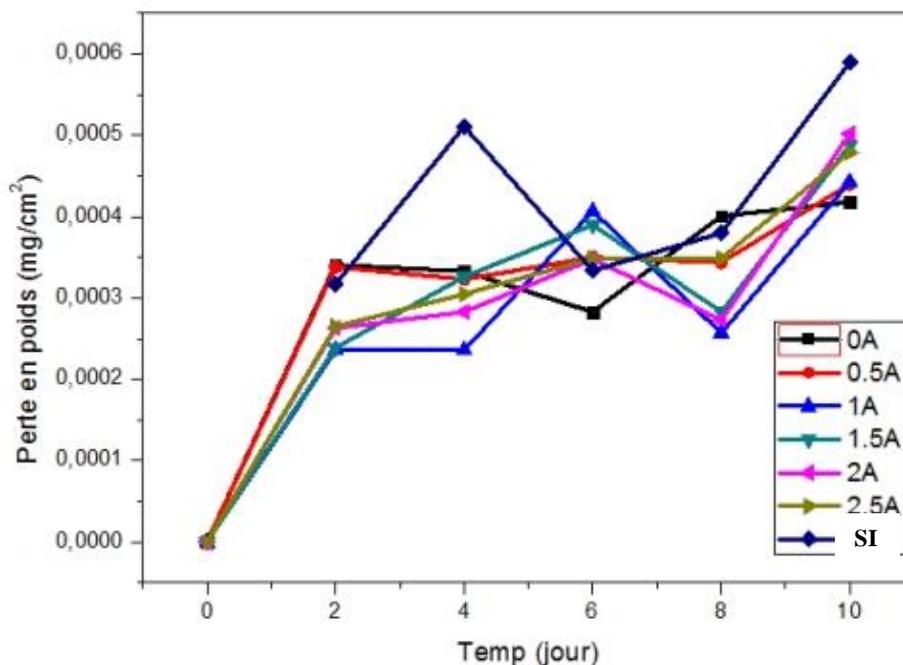


Figure III. 5: Variation de la perte de poids de l'acier en fonction de temps.

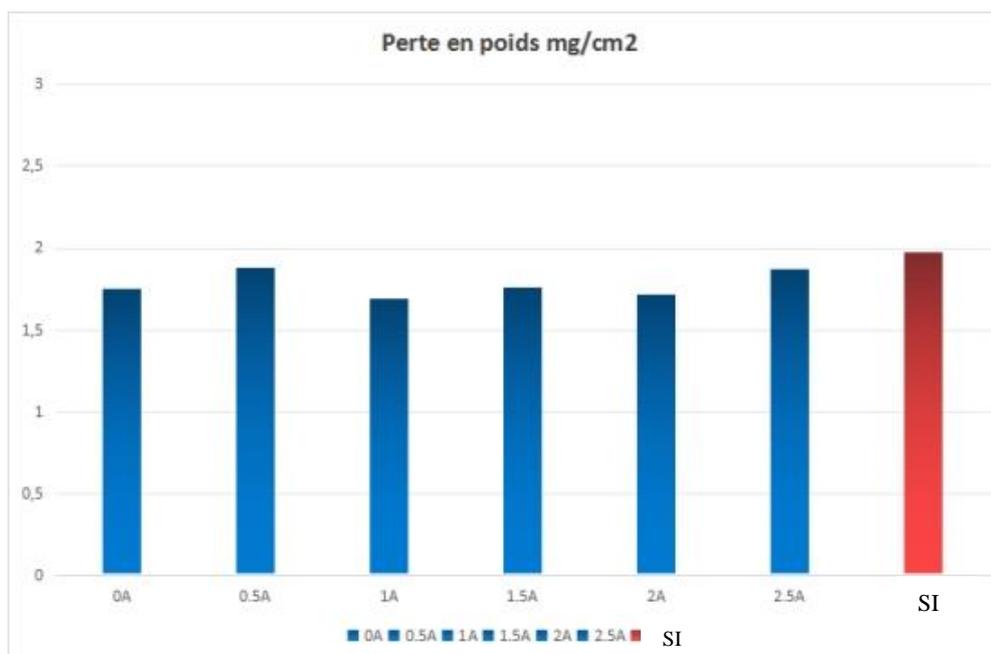


Figure III. 6: Perte en poids de l'acier en présence et l'absence de terpolymère.

L'analyse des résultats présentés dans les figures (III.5) et (III.6) démontre clairement l'effet inhibiteur du terpolymère sur la corrosion de l'acier dans le milieu NaCl 3%. Il est évident que la perte en poids des échantillons d'acier diminue en fonction des différents inhibiteurs de terpolymère synthétisé sous et sans champ magnétique. Cependant, on observe également que l'efficacité de l'inhibition n'est pas significative et tend à diminuer avec le temps d'immersion. Cette diminution de l'efficacité au fil du temps peut être attribuée à la faible concentration de terpolymère utilisée dans l'expérience, ainsi qu'à une adhésion insuffisante des particules de l'inhibiteur à la surface du métal. Ces facteurs limitent la capacité du terpolymère à protéger durablement l'acier contre la corrosion.

Partie B:

Le but de cette expérience est d'évaluer l'efficacité d'un inhibiteur de corrosion en présence de deux types de solutions corrosives : une solution saline (NaCl 3%) et une solution acide (HCl 1 M).

Cette mesure a été effectuée sur une période d'environ 7 jours, avec une concentration de 50 ppm d'inhibiteur.

Les objectifs principaux de cette expérience :

- Calculer le rendement d'inhibition : Le rendement d'efficacité de l'inhibiteur sera calculé pour déterminer combien la corrosion est réduite en présence de l'inhibiteur. Cette valeur est calculée en utilisant la formule suivante :

$$R(\%) = (1 - W_{inh} / W) * 100$$

Où W et W_{inh} sont respectivement les valeurs de la perte de poids de l'acier après immersion sans et avec inhibiteur.

Cette formule permet de quantifier l'efficacité de l'inhibiteur en pourcentage, montrant à quel point il réduit la corrosion par rapport à une condition sans inhibiteur.

- Étudier la corrosion dans différentes conditions : L'expérience examine la corrosion dans deux environnements chimiques différents (salin et acide), permettant de comprendre comment l'inhibiteur fonctionne dans des conditions variées et potentiellement agressives pour les métaux.

Pour le milieu HCl:

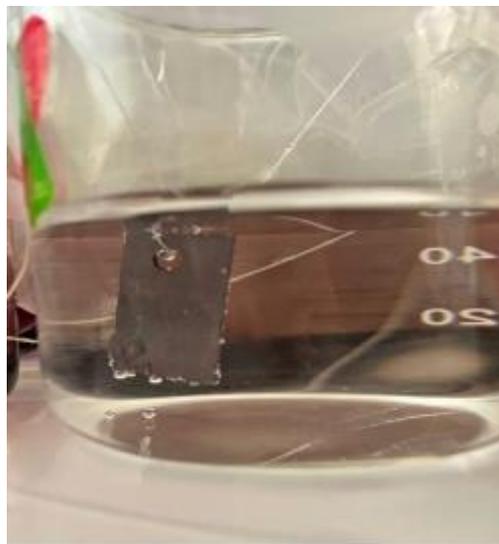


Figure III. 7:Acier immergé dans HCl sans inhibiteur après corrosion.

- Les bulles d'air observées à la surface de l'acier immergé dans la solution de HCl (acide chlorhydrique) sont très probablement dues à la libération de gaz hydrogène (H_2) résultant de la réaction de corrosion de l'acier en présence de HCl.



Figure III. 8: Acier immergé dans HCl avec inhibiteur après corrosion.

- Dans les béchers contenant des inhibiteurs synthétisés sous différentes intensités de courant, l'efficacité inhibitrice peut réduire le taux de corrosion. Les inhibiteurs agissent en formant une couche protectrice sur la surface de l'acier, empêchant le contact direct entre le métal et les ions hydrogène (H^+). Cela diminue la formation de H_2 et donc la production de bulles.

Tableau III. 2: Masse de l'acier avant et après corrosion dans le milieu HCl.

| Echantillon | Sans inhibiteur | Avec Inhibiteur 0A | Avec inhibiteur 1A | Avec inhibiteur 2A |
|---|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Masse avant corrosion (g) | 1.1671 | 1.1613 | 1.1868 | 1.1200 |
| Masse après corrosion (g) | 1.0238 | 1.1439 | 1.1679 | 1.1026 |
| Perte en poids (mg/cm²) | 31,3 | 3,7 | 4,1 | 3,8 |

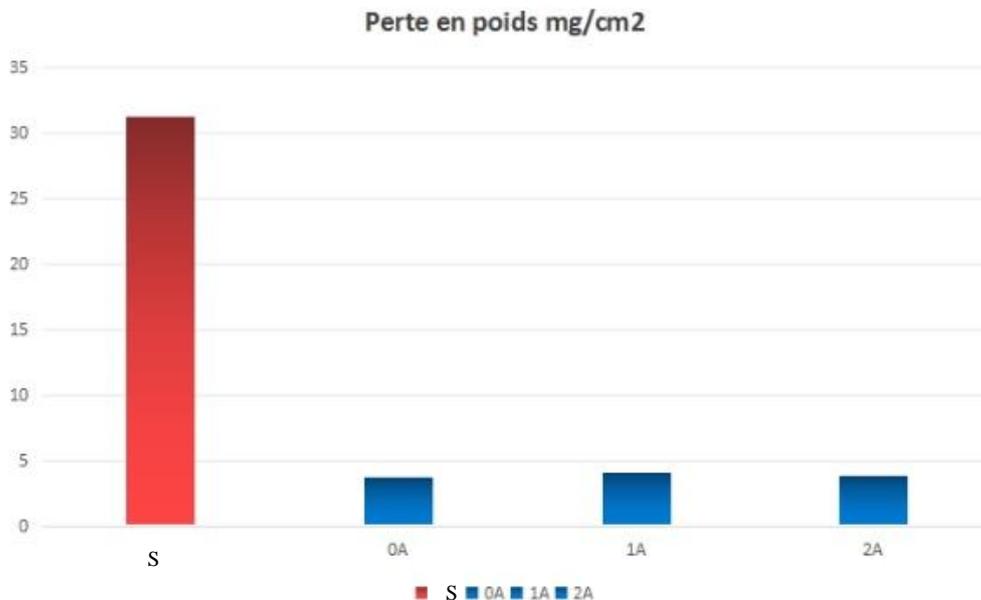


Figure III. 9: Variation de la perte de poids de l'acier avec et sans inhibiteur dans le milieu HCl.

Avec S : Sans inhibiteur

Commentaires :

- **Efficacité des inhibiteurs :** Les pertes en poids montrent que les inhibiteurs ont considérablement réduit la corrosion dans le milieu HCl. L'inhibiteur synthétisé sans courant (0 A) présente une perte en poids la plus faible (3,7 mg/cm²), ce qui indique une efficacité élevée.
- **Impact du magnétisme :** Les inhibiteurs synthétisés sous courant (1 A et 2 A) montrent également une bonne performance, avec des pertes en poids légèrement supérieures à celles sans courant mais toujours bien inférieures à celle sans inhibiteur.
- **Comparaison avec l'absence d'inhibiteur :** La perte en poids sans inhibiteur est de 31,3 mg/cm², indiquant une corrosion beaucoup plus élevée. Cela confirme l'efficacité substantielle des inhibiteurs.

Pour le milieu NaCl:

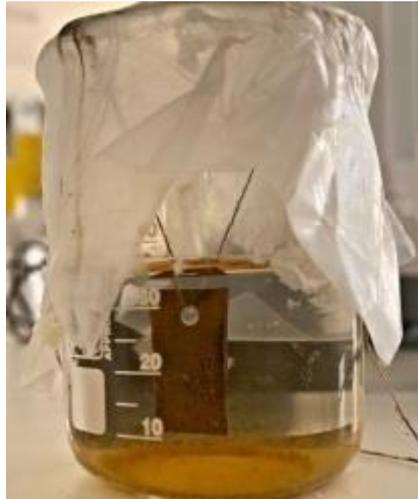


Figure III. 10: Acier immergé dans NaCl avec inhibiteur après corrosion.

- La couche marron observée dans les solutions de NaCl, tant sans inhibiteur qu'avec inhibiteur, Est due à la formation de produits de corrosion, principalement des oxydes et hydroxydes de fer, communément appelés rouille.



Figure III. 11: Acier immergé dans NaCl avec inhibiteur après corrosion.

- Dans les solutions contenant des inhibiteurs, la quantité de produits de corrosion marron est réduite. Les inhibiteurs agissent en formant une couche protectrice sur la surface de

l'acier, empêchant ou ralentissant les réactions de corrosion. Cela réduit la formation de Fe^{2+} et par conséquent la quantité de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ et $\text{Fe}(\text{OH})_3$ formés.

Tableau III. 3: Masse de l'acier avant et après corrosion dans le milieu NaCl.

| Echantillon | Sans inhibiteur | Avec Inhibiteur 0A | Avec inhibiteur 1A | Avec inhibiteur 2A |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Masse avant corrosion (g) | 1.1801 | 1.1337 | 1.1554 | 1.1311 |
| Masse après corrosion (g) | 1.1736 | 1.1295 | 1.1518 | 1.1264 |
| Perte en poids (mg/cm ²) | 6,5 | 4,2 | 3,6 | 4,7 |

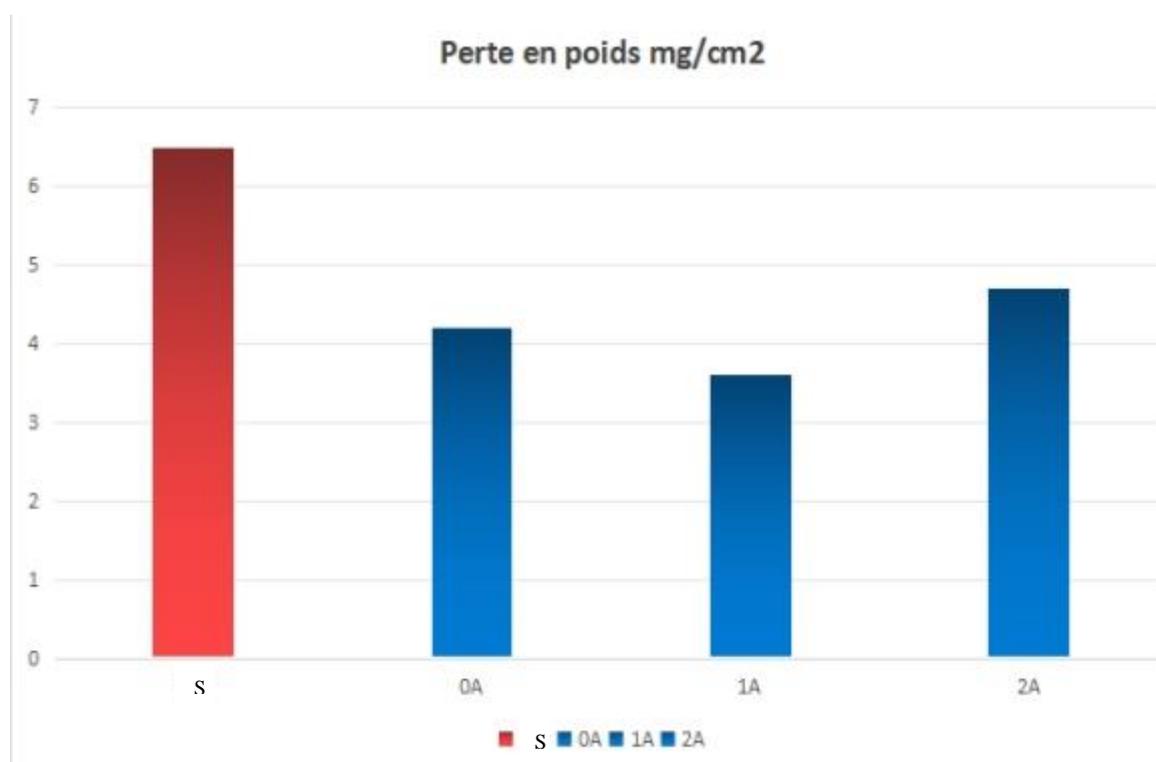


Figure III. 12: Variation de la perte de poids de l'acier avec et sans inhibiteur dans le milieu NaCl.

Avec S : Sans inhibiteur.

Commentaires :

- Efficacité des inhibiteurs : Les pertes en poids montrent que les inhibiteurs réduisent également la corrosion dans le milieu NaCl, bien que l'effet soit moins prononcé que

dans le milieu HCl. L'inhibiteur synthétisé sous 1 A présente la perte en poids la plus faible (3,6 mg/cm²).

- Impact du magnétisme : Dans le milieu NaCl, l'inhibiteur synthétisé sous 1 A est légèrement plus efficace que celui synthétisé sous 0 A et 2 A.
- Comparaison avec l'absence d'inhibiteur : La perte en poids sans inhibiteur est de 6,5 mg/cm², ce qui est plus élevé que les pertes observées avec les inhibiteurs, confirmant encore une fois leur efficacité.

Commentaires Comparatifs :

- Efficacité Générale des Inhibiteurs :

Dans les deux milieux (HCl et NaCl), les inhibiteurs de corrosion ont démontré une efficacité significative en réduisant la perte de poids des échantillons d'acier comparé aux échantillons sans inhibiteur.

L'efficacité des inhibiteurs semble être plus prononcée dans le milieu HCl, où la perte en poids sans inhibiteur est beaucoup plus élevée (31,3 mg/cm²) comparée au milieu NaCl (6,5 mg/cm²). Cela indique que les conditions acides sont plus corrosives pour l'acier que les conditions salines, et que les inhibiteurs sont capables de fournir une protection substantielle dans un environnement plus agressif.

- **Rendement d'efficacité de l'inhibiteur:**

Milieu NaCl:

Tableau III. 4: Masse de l'acier avant et après corrosion dans le milieu NaCl

| Intensité | 0A | 1A | 2A |
|-----------|-------|-------|-------|
| R (%) | 35,38 | 44,61 | 27,69 |

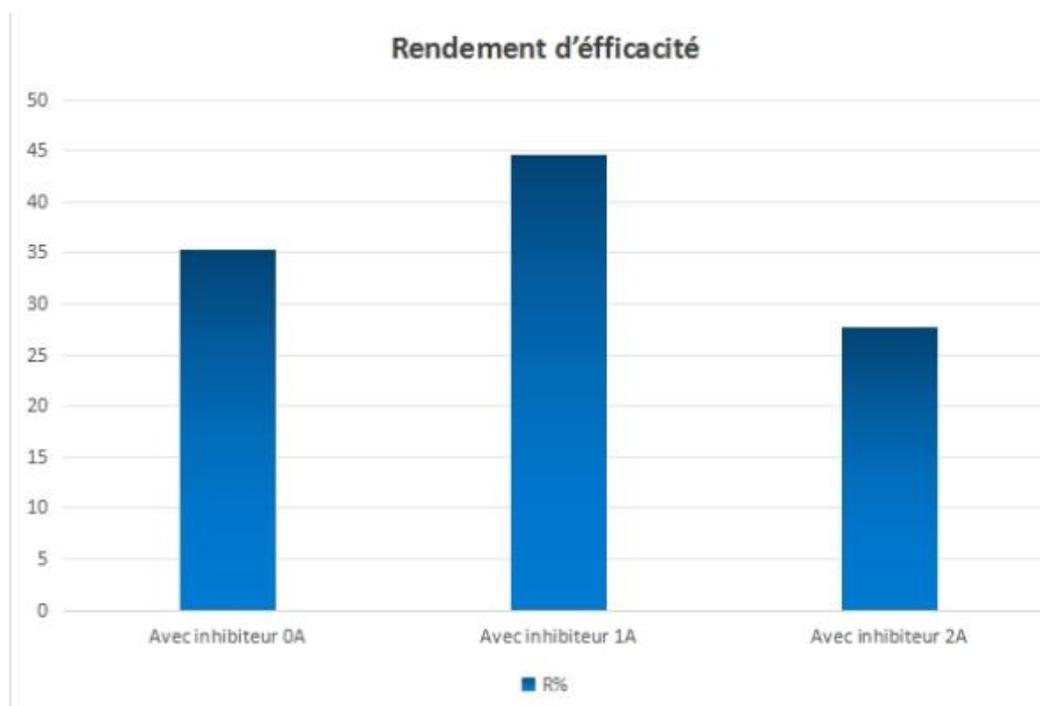


Figure III. 13: Rendement d'efficacité de l'inhibiteur dans le milieu NaCl.

Commentaires :

Les rendements d'efficacité obtenus montrent que tous les inhibiteurs testés réduisent la corrosion par rapport à l'échantillon sans inhibiteur, mais à des degrés divers. L'échantillon sans inhibiteur représente la situation de corrosion maximale, et tout rendement positif indique une réduction de cette corrosion :

➤ Échantillon sans inhibiteur :

L'échantillon sans inhibiteur sert de référence de base pour la comparaison. Dans ce cas, l'acier subit la pleine intensité de la corrosion induite par la solution de NaCl à 3%, ce qui entraîne une perte de poids significative due à la corrosion.

➤ Inhibiteur synthétisé sous 0 A :

Le rendement d'efficacité de 35,38% montre que l'inhibiteur synthétisé sans courant (0 A) est capable de réduire la corrosion de 35,38% par rapport à l'échantillon sans inhibiteur.

➤ Inhibiteur synthétisé sous 1 A :

Avec un rendement d'efficacité de 44,61%, l'inhibiteur synthétisé sous 1 A est le plus performant parmi les trois conditions testées. Cela signifie qu'il réduit la corrosion de 44,61% par rapport à l'échantillon sans inhibiteur.

➤ Inhibiteur synthétisé sous 2 A :

Le rendement d'efficacité de 27,69% pour l'inhibiteur synthétisé sous 2 A est le plus faible des trois.

Milieu HCl:

Tableau III. 5: Masse de l'acier avant et après corrosion dans le milieu NaCl.

| | 0A | 1A | 2A |
|--------------|-----------|-----------|-----------|
| R (%) | 87,85 | 86,81 | 87,85 |

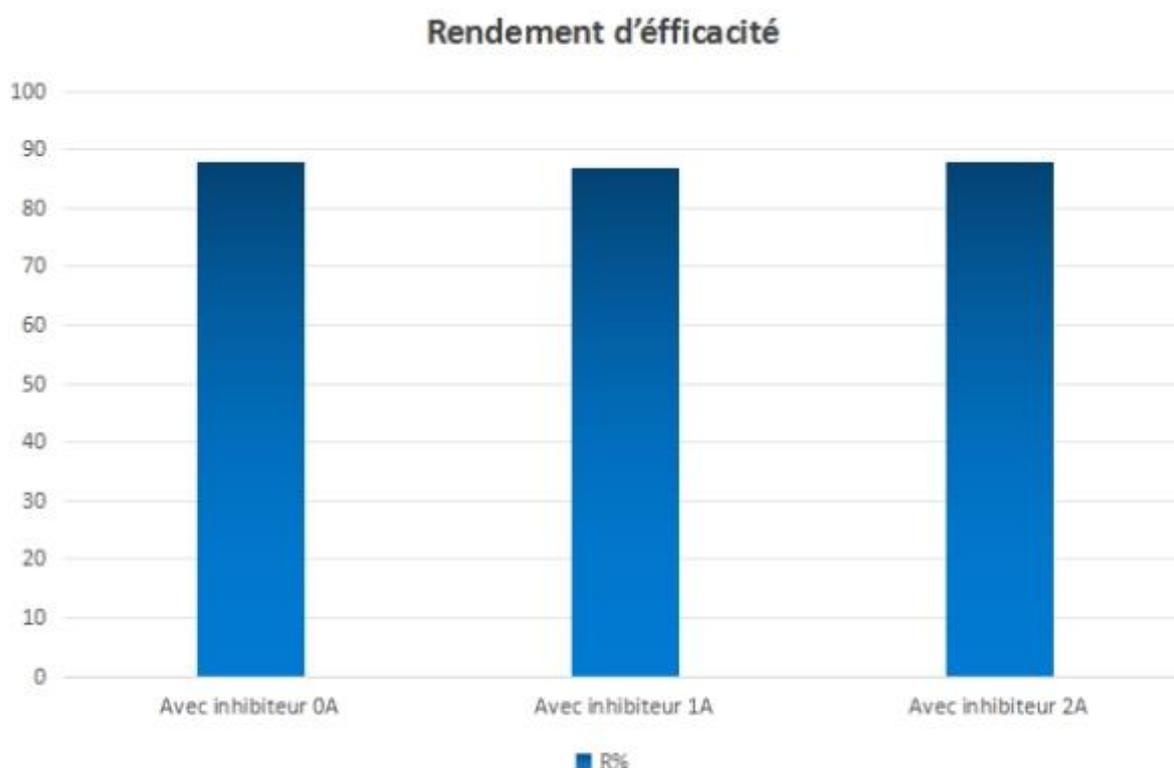


Figure III. 14: Rendement d'efficacité de l'inhibiteur dans le milieu HCl.

Commentaires :

Les inhibiteurs de corrosion testés dans le milieu HCl montrent une efficacité exceptionnelle, réduisant la corrosion de plus de 86% dans toutes les conditions de synthèse (0 A, 1 A, 2 A). Cela indique que les inhibiteurs sont particulièrement bien adaptés pour des environnements acides et que leur performance est relativement stable malgré les variations des conditions de synthèse. Comparé à l'absence d'inhibiteur, ces résultats démontrent une protection substantielle. Cela souligne l'importance et l'efficacité des inhibiteurs dans les environnements corrosifs acides, où ils peuvent protéger significativement les matériaux en acier.

➤ Échantillon sans inhibiteur :

Comme pour le milieu NaCl, l'échantillon sans inhibiteur dans le milieu HCl sert de référence de base. Dans ce cas, l'acier subit la pleine intensité de la corrosion induite par la solution acide, ce qui entraîne une perte de poids significative due à la corrosion.

➤ Inhibiteur synthétisé sous 0 A :

Le rendement d'efficacité de 87,85% indique que l'inhibiteur synthétisé sans courant (0 A) est très efficace pour réduire la corrosion, diminuant celle-ci de 87,85% par rapport à l'échantillon sans inhibiteur. Cela montre que l'inhibiteur est particulièrement efficace dans un milieu acide même sans l'application de courant pendant sa synthèse.

➤ Inhibiteur synthétisé sous 1 A :

Avec un rendement d'efficacité de 86,81%, Cela signifie qu'il réduit la corrosion de 86,81% par rapport à l'échantillon sans inhibiteur. Cette petite différence pourrait être due à des variations mineures dans la structure ou la composition de l'inhibiteur causées par l'application du courant.

➤ Inhibiteur synthétisé sous 2 A :

Le rendement d'efficacité de 87,85% pour l'inhibiteur synthétisé sous 2 A est identique à celui de l'inhibiteur synthétisé sans courant. Cela signifie qu'il réduit la corrosion de 87,85% par rapport à l'échantillon sans inhibiteur. Cela suggère que l'application d'un courant de 2 A n'altère pas les propriétés de l'inhibiteur de manière significative dans un milieu acide.

Les résultats de notre expérience montrent que l'application d'un champ magnétique (via l'application de courant) pendant la synthèse de l'inhibiteur n'a pas d'impact significatif sur son efficacité dans les milieux HCl et NaCl. En effet, dans le milieu HCl, les rendements d'efficacité sont très similaires pour les inhibiteurs synthétisés sans courant (0 A), sous 1 A, et sous 2 A, avec des valeurs respectivement de 87,85%, 86,81%, et 87,85%. De même, dans le milieu NaCl, bien que l'inhibiteur synthétisé sous 1 A présente une légère amélioration avec un rendement d'efficacité de 44,61% comparé à 35,38% sous 0 A et 27,69% sous 2 A, ces variations ne sont pas suffisamment marquées pour établir une relation proportionnelle ou inverse claire entre l'application de courant et l'efficacité de l'inhibiteur. Ces résultats indiquent que le champ magnétique n'améliore ni ne diminue notablement l'efficacité de l'inhibiteur dans ces environnements corrosifs.

III.4.2. Analyse par diffraction des rayons X (DRX) et caractérisation des produits de corrosion:

L'analyse par diffraction des rayons X (DRX) a été utilisée pour caractériser les échantillons d'acier exposés à différents milieux corrosifs, notamment l'acide chlorhydrique (HCl) et le chlorure de sodium (NaCl). Cette méthode permet d'identifier les phases cristallines présentes dans l'acier et de surveiller les changements induits par la corrosion, ainsi que d'évaluer l'efficacité des inhibiteurs de corrosion synthétisés.

III.4.2.1. Analyse par DRX pour le milieu NaCl:

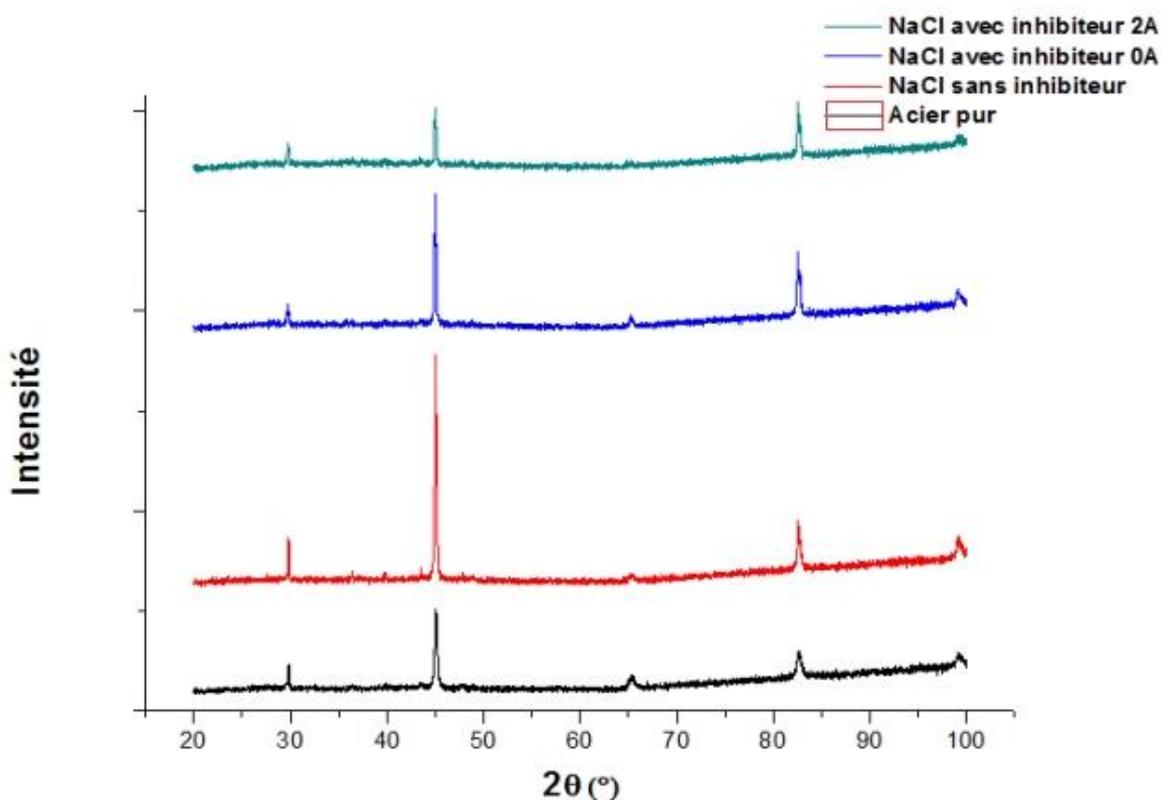


Figure III. 15: Spectres DRX de l'acier avant et après corrosion dans le milieu NaCl.

La Figure III.14 montre les spectres DRX de l'acier avant et après immersion dans une solution NaCl. Ces analyses permettent d'identifier les produits de corrosion formés et de comparer l'efficacité des inhibiteurs de corrosion utilisés dans différentes conditions:

- Pic à 30° :

- Solution NaCl pure : Le pic augmente légèrement, ce qui suggère une production de produits de corrosion.
 - Solution NaCl avec inhibiteur sans champ magnétique : Le pic est similaire à celui de l'acier pur, indiquant une protection efficace par l'inhibiteur (pas d'augmentation de produits de corrosion).
 - Solution NaCl avec inhibiteur sous champ magnétique (2 A) : Le pic reste similaire à celui de l'acier pur, montrant une protection comparable ou même meilleure par l'inhibiteur.
- Pic à 45° :
 - Solution NaCl pure : Pic plus intense, ce qui indique une augmentation des produits de corrosion.
 - Solution NaCl avec inhibiteur sans champ magnétique : Le pic est plus intense par rapport à l'acier pur mais inférieur à celui de la solution NaCl pure, montrant une certaine protection par l'inhibiteur.
 - Solution NaCl avec inhibiteur sous champ magnétique (2 A) : Le pic reste similaire à celui de l'acier pur, indiquant une protection efficace par l'inhibiteur.
- Pic à 66° :
 - Acier pur : Très petit pic, indiquant la présence de fer métallique.
 - Solution NaCl pure : Pas de pic, indiquant une corrosion du fer.
 - Solution NaCl avec inhibiteur sans champ magnétique : Le pic est inférieur à celui de l'acier pur mais supérieur à celui de la solution NaCl pure, montrant une certaine protection par l'inhibiteur.
 - Solution NaCl avec inhibiteur sous champ magnétique (2 A) : Pas de pic, indiquant une corrosion complète du fer dans cette condition.
- Pic à 83° :
 - Solution NaCl pure : Le pic augmente, indiquant une augmentation des produits de corrosion.

- Solution NaCl avec inhibiteur sans champ magnétique : Le pic est plus intense que celui de la solution NaCl pure, montrant que l'inhibiteur n'offre pas une protection complète.
- Solution NaCl avec inhibiteur sous champ magnétique (2 A) : Le pic est comparable à celui de la solution NaCl pure, pas de protection.

- Pic à 99° :
 - Solution NaCl pure : Le pic est légèrement supérieur à celui de l'acier pur, indiquant une production accrue de produits de corrosion.
 - Solution NaCl avec inhibiteur sans champ magnétique : Le pic reste similaire à celui de l'acier pur, montrant une protection efficace par l'inhibiteur.
 - Solution NaCl avec inhibiteur sous champ magnétique (2 A) : Le pic reste similaire à celui de l'acier pur, confirmant une protection efficace par l'inhibiteur.

- Formation des produits de corrosion :

Les pics à 30°, 45°, et 83° montrent une augmentation dans la solution NaCl pure, indiquant une production accrue de produits de corrosion en absence d'inhibiteur.

Les inhibiteurs montrent une réduction significative des produits de corrosion, comme indiqué par des pics moins intenses.

- Protection par l'inhibiteur :

La présence de pics moins intenses que dans la solution NaCl pure à 45°, 66°, et 99° pour les échantillons avec inhibiteurs indique une protection efficace.

III.4.2.2. Analyse par DRX pour le milieu HCl:

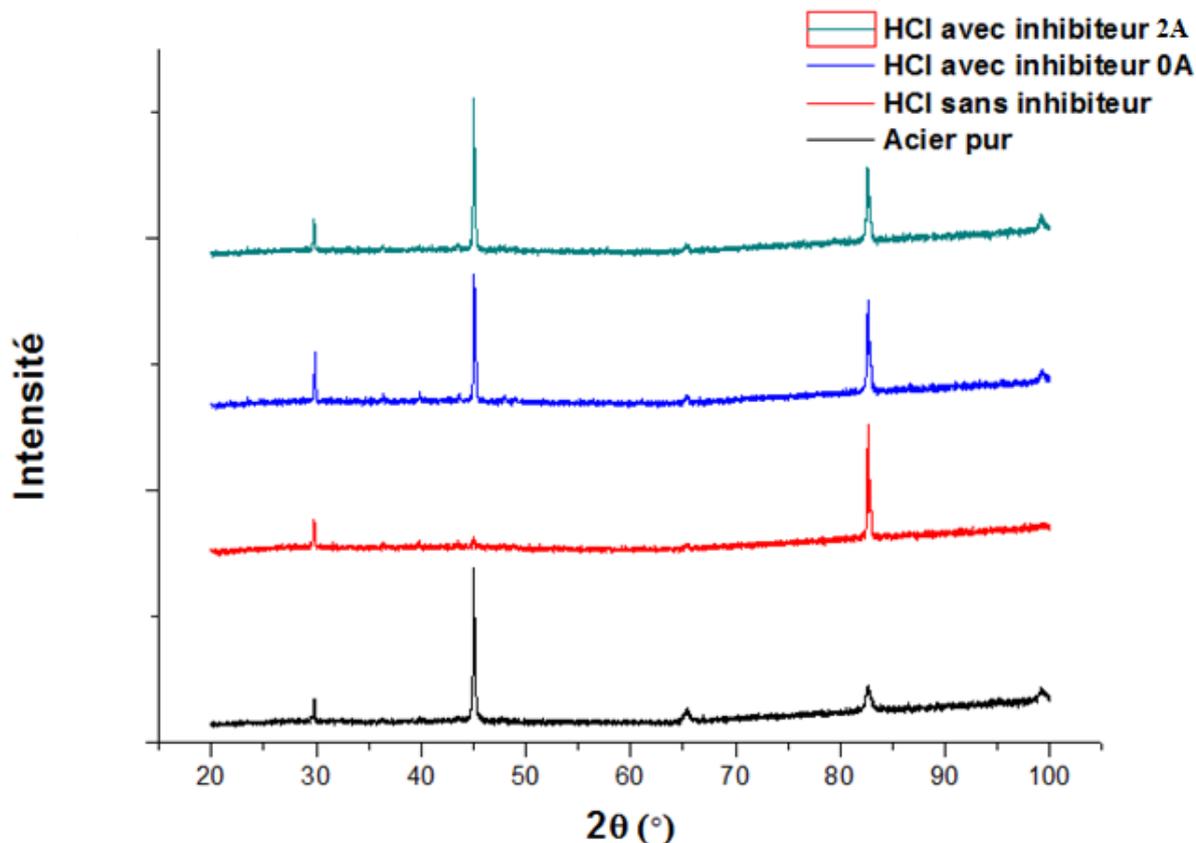


Figure III. 16: Spectres DRX de l'acier avant et après corrosion dans le milieu NaCl.

La Figure III.15 montre les spectres DRX de l'acier avant et après immersion dans une solution HCl. Ces analyses permettent d'identifier les produits de corrosion formés et de comparer l'efficacité des inhibiteurs de corrosion utilisés dans différentes conditions :

- Pic à 30° :
 - Solution HCl pure : Augmentation légère du pic, suggérant la formation de produits de corrosion.
 - Solution HCl avec inhibiteur sans champ magnétique : Pic plus intense que dans HCl pur, indiquant une formation plus de produits de corrosion.
 - Solution HCl avec inhibiteur sous champ magnétique (2 A) : Pic similaire à celui de HCl pur mais toujours supérieur à l'acier pur, montrant une formation de produits de corrosion comparable à la solution HCl pure.
- Pic à 45° :

- Acier pur : Pic intense, caractéristique du fer métallique.
- Solution HCl pure : Pas de pic, indiquant une corrosion complète du fer.
- Solution HCl avec inhibiteur sans champ magnétique : Pic presque aussi intense que l'acier pur, mais légèrement inférieur, montrant que l'inhibiteur protège partiellement le fer.
- Solution HCl avec inhibiteur sous champ magnétique (2 A) : Pic similaire à celui de l'acier pur, indiquant une bonne protection du fer par l'inhibiteur.

- Pic à 66° :
 - Acier pur : Très petit pic, caractéristique du fer métallique.
 - Solution HCl pure : Pas de pic, indiquant une corrosion complète du fer.
 - Solution HCl avec inhibiteur sans champ magnétique : Pic presque aussi intense que l'acier pur, mais légèrement inférieur, montrant que l'inhibiteur protège partiellement le fer.
 - Solution HCl avec inhibiteur sous champ magnétique (2 A) : Pic similaire à celui avec inhibiteur sans champ magnétique, légèrement inférieur par rapport au acier pur montrant une protection partiellement du fer.

- Pic à 83° :
 - Solution HCl pure : Augmentation du pic, montrant une augmentation des produits de corrosion.
 - Solution HCl avec inhibiteur sans champ magnétique : Pic intense, mais inférieur à celui de HCl pur, indiquant que l'inhibiteur réduit la formation de produits de corrosion.
 - Solution HCl avec inhibiteur sous champ magnétique (2 A) : Pic inférieur à celui avec inhibiteur sans champ magnétique mais toujours supérieur à l'acier pur, montrant une réduction plus importante des produits de corrosion.

- Pic à 99° :
 - Acier pur : Très petit pic, caractéristique du fer métallique.
 - Solution HCl pure : Pas de pic, indiquant une corrosion complète du fer.

- Solution HCl avec inhibiteur sans champ magnétique : Pic similaire à celui de l'acier pur, indiquant que l'inhibiteur protège bien le fer.
- Solution HCl avec inhibiteur sous champ magnétique (2 A) : Pic similaire à celui de l'acier pur, confirmant une bonne protection du fer par l'inhibiteur.
- Formation des produits de corrosion :

L'augmentation des pics à 30° et 83° dans les solutions HCl pures indique une formation accrue de produits de corrosion en l'absence d'inhibiteurs.

Les inhibiteurs, particulièrement ceux synthétisés sous champ magnétique, réduisent la formation des produits de corrosion, comme indiqué par les pics moins intenses à 30° et 83° par rapport à la solution HCl pure.

- Protection du fer :

La présence de pics intenses à 45°, 66°, et 99° pour les échantillons avec inhibiteurs indique une protection effective du fer, car ces pics sont caractéristiques du fer métallique non corrodé.

Les inhibiteurs synthétisés avec champ magnétique (2 A) montrent une efficacité légèrement supérieure à ceux sans champ magnétique, comme indiqué par les pics DRX.

Références bibliographiques

- [1] Mouna, C. (s.d.). "Matériaux pour le traitement des eaux".
- [2] Poumirol, J.M. (2011). "Étude des propriétés électroniques du graphène et des matériaux à base de graphène sous champs magnétiques intenses". Thèse de doctorat, Toulouse, INSA.
- [3] Kausch, H. H., Heymans, N., Plummer, C. J., & Decroly, P. (2001). "Matériaux polymères: propriétés mécaniques et physiques" (Vol. 14). PPUR presses polytechniques.
- [4] Bolteau, B. (2018). "La magnétisante histoire de la goutte fakir ou étude des propriétés de mouillage de surfaces super hydrophobes à géométrie magnétiquement modulable". Doctoral dissertation, Sorbonne université.
- [5] Bassene, S. (2016). "Diffusion de la lumière dans les milieux complexes à base de cristaux liquides".
- [6] Rodriguez, F. (2022). "Nanoarchitectures magnétiques photostructurables". Doctoral dissertation, Nantes Université.
- [7] Babot, D., & Massardier-Jourdan, V. (2016). "La physique autour de nous : De l'observation à l'innovation". PPUR Presses polytechniques.
- [8] Milton, A. J., & Monkman, A. P. (1993). "J. Phys. D, Appl. Phys., 26", 1468

Conclusion générale

CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons mis au point la synthèse chimique d'un terpolymère poly (aniline-co-anisidine-co-o-toluidine) (noté (PA-co-POA-co-POT)) en milieu aqueux d'acide chlorhydrique En présence d'un oxydant fort (persulfate d'ammonium) sous différentes intensités de champ magnétique.

Ce terpolymère a été appliqué comme inhibiteur de corrosion de l'acier dans le milieu NaCl 3% et le milieu HCl (1M).

L'utilisation des différentes techniques d'analyse et de caractérisation, à savoir la spectroscopie IR et UV-Visible ont confirmé la synthèse du terpolymère poly (aniline-co-o-anisidine-co-otoluidine) et ont permis de déterminer les différentes liaisons chimiques présentes dans le terpolymère, tandis que la diffraction des rayons X a confirmé son caractère amorphe. La combinaison de ces techniques a fourni une vue d'ensemble complète de la structure et des propriétés du PA-co-POA-co-POT, assurant ainsi la fiabilité des résultats obtenus.

L'étude gravimétrique a fourni des informations significatives quant à l'efficacité de notre inhibiteur pour la protection de l'acier. Les résultats ont démontré une remarquable efficacité, avec un taux d'inhibition atteignant 86% dans un milieu HCl 1M et 35% dans un milieu NaCl 3%. Cette performance remarquable souligne le fort potentiel de notre inhibiteur dans la prévention de la corrosion de l'acier dans des environnements corrosifs variés. Cette découverte revêt une importance capitale dans le domaine de la protection contre la corrosion, offrant des perspectives prometteuses pour des applications pratiques où la résistance à la corrosion de l'acier est cruciale. Ces résultats mettent en lumière la robustesse de notre inhibiteur et ouvrent la voie à des recherches futures visant à optimiser encore davantage son efficacité et sa polyvalence dans diverses conditions environnementales et industrielles.

Notre étude a révélé des résultats intéressants concernant l'impact du champ magnétique sur la synthèse des polymères et leurs propriétés inhibitrices de corrosion. Les expériences ont démontré que l'augmentation de l'intensité du champ magnétique conduit à une augmentation de la masse de synthèse des polymères. Comme indiqué dans le tableau III.1, ce qui met en évidence une corrélation positive entre l'intensité du champ magnétique et la masse de synthèse.

Cependant, lorsqu'il s'agit de l'efficacité de l'inhibition de la corrosion, les résultats ont montré une tendance différente. Les échantillons avec différents niveaux de champ magnétique appliqué aux inhibiteurs n'ont pas montré une relation proportionnelle entre l'augmentation de l'intensité du champ magnétique et l'efficacité de l'inhibition de la corrosion. Ces résultats suggèrent que l'effet du champ magnétique sur l'inhibition de la corrosion n'est pas linéaire et peut dépendre de plusieurs facteurs complexes.

De plus, l'application du champ magnétique a également influencé les propriétés spectroscopiques des polymères, affectant les spectres infrarouges et UV-visible, ce qui indique des changements structuraux et des transitions électroniques. Ces modifications spectroscopiques pourraient offrir de nouvelles avenues pour l'optimisation des propriétés fonctionnelles des polymères.

En conclusion, cette étude a non seulement atteint ses objectifs initiaux de synthèse et de caractérisation d'un nouveau terpolymère, mais elle a également montré l'efficacité potentielle de ce dernier en tant qu'inhibiteur de corrosion.

Les résultats obtenus ouvrent la voie à de nouvelles recherches et applications industrielles, soulignant l'importance de l'innovation dans le domaine des matériaux polymères. Dans la perspective d'approfondir les avancées obtenues, il est primordial d'explorer la synthèse à des intensités de champ magnétique plus élevées pour optimiser la différenciation structurale et l'efficacité inhibitrice déjà démontrées à faibles intensités. De plus, l'accent devrait être mis sur l'approfondissement des analyses complémentaires afin d'identifier de manière plus précise les propriétés des polymères synthétisés. En parallèle, il est crucial d'explorer de nouvelles applications prometteuses dans les domaines de l'électronique et de l'électrochimie, où les propriétés uniques du terpolymère pourraient être exploitées pour des technologies innovantes. Ces démarches permettront de maximiser l'impact de notre recherche et d'ouvrir de nouvelles avenues pour son application pratique et industrielle.

Résumé

Dans les années 70, la découverte des polymères conducteurs a marqué un tournant dans la recherche fondamentale, élargissant considérablement les applications de ces matériaux. Cette avancée a particulièrement stimulé l'intérêt pour leur utilisation dans la lutte contre la corrosion. Dans notre étude, Dans ce travail, nous avons mis au point la synthèse chimique d'un terpolymère conducteur soluble : poly (aniline-co-o-méthoxyaniline-co-o-toluidine), utilisant un milieu aqueux d'acide chlorhydrique et un oxydant puissant (persulfate d'ammonium). Le terpolymère ainsi obtenu a été caractérisé par diverses techniques analytiques, révélant ses propriétés distinctes.

Pour mettre en lumière les capacités de ce terpolymère conducteur, nous l'avons évalué comme inhibiteur de corrosion pour l'acier dans des milieux tels que NaCl 3% et HCl (1M). Ces expérimentations visent à démontrer son efficacité dans la protection contre la corrosion, soulignant ainsi son potentiel dans des applications pratiques.

Mots-clés : polymères conducteurs, terpolymère, inhibiteur de corrosion, corrosion de l'acier

Abstrat

In the 1970s, the discovery of conductive polymers marked a turning point in fundamental research, significantly expanding the applications of these materials. This breakthrough notably heightened interest in their potential use for corrosion control. In our study, we developed the chemical synthesis of a soluble conductive terpolymer: poly(aniline-co-o-methoxyaniline-co-o-toluidine), utilizing an aqueous medium of hydrochloric acid and a potent oxidant (ammonium persulfate). The terpolymer thus obtained was characterized using various analytical techniques, revealing its distinctive properties.

To highlight the capabilities of this conductive terpolymer, we evaluated it as a corrosion inhibitor for steel in environments such as 3% NaCl and 1M HCl. These experiments aimed to demonstrate its effectiveness in corrosion protection, thereby emphasizing its potential in practical applications.

Keywords: conductive polymers, terpolymer, corrosion inhibitor, steel corrosion