

بسكرة في: 2025/06/28

جامعة محمد خيضر - بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الكيمياء الصناعية

إذن بإيداع مذكرة الماستر بعد التصحيحات

أنا الممضي أسفله الأستاذ: د. بغدش كلثوم

الرتبة: أستاذ محاضر (MCA)

أستاذ مشرف على مذكرة ماستر - للطالب (ة): شعبة ان رنا

الشعبة هندسة طرائق

التخصص: هندسة كيميائية

العنوان: Fabrication des dépôts composites

électrolytiques utilisant un biopolymère pour protéger les métaux contre la corrosion

أرخص بإيداع المذكرة المذكورة.

رئيس لجنة المناقشة

الأستاذ المشرف

د. بغدش كلثوم

ملحق القرار رقم: 933 المؤرخ في: 20 جويلية 2016

الذي يحدد القواعد المتعلقة بالوقاية من السرقة العلمية ومكافحتها

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

مؤسسة التطعيم العالي:

نموذج التصريح الشرفي

خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد: الله جبارنا..... الصفة: طالب، أستاذ باحث، باحث دائم... طالب.....

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم: ٨١٥٥٠٢٥٢٣٥٥٠٧٩٦
٤٦٥٥٠

٢٥٢٤...١٢...٥٢ بتاريخ والصادرة بتاريخ

المسجل بكلية العلوم والدراسات الإنسانية قسم الكيمياء - الرياض

و المكلف بإنجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج ، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير ، أطروحة

دكتوراه)، عنوانها: Fabrication des dépôts composites électrolytiques...

utilisant un biopolymère pour protéger les métaux contre la corrosion.

المهنية والنزاهة الأكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: ٢٠٢٥.٠٦.٠٨

إمضاء المعني





Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des sciences et de la technologie
Département de chimie industrielle

MEMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Génie chimique /Génie des procédés de l'environnement

Réf :

Présenté et soutenu par :

Toum Hasna _Chabane Rana

Le : Lundi 16 juin 2025

**Fabrication des dépôts composites
électrolytiques utilisant un bio polymère pour
protéger les métaux contre la corrosion**

Jury :

Dr. Hamdi Ines	MCA	Université de Biskra	Président
Dr. Sakri Adel	MCA	Université de Biskra	Examinateur
Dr. Digheche Kelthoum	MCA	Université de Biskra	Encadrant
Dr. Adaika Kaltoum	MCA	Université de Biskra	Encadrant

Remerciement

*Tout d'abord, je rends grâce à Allah Subhanahu Wa T'alla pour m'avoir donné la force et la détermination nécessaires pour mener à bien ce travail, qui représente une étape importante dans mon parcours académique. Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mes encadrantes et **Mme. Digheche Kelthoum** et **Mme. Adaiqa Kaltoum**, Pour leur accompagnement précieux, leurs conseils pertinents et leur soutien constant tout au long de ce projet. Leur encadrement bienveillant a grandement contribué à la réussite de ce travail.*

*Je remercie également les membres du jury, **Mme. Hamdi Iness**, et **M. Sakri Adel**, pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire, et pour leurs remarques et observations constructives qui ont enrichi notre réflexion.*

Enfin, je remercie profondément tous ceux qui m'ont aidée à surmonter les défis rencontrés au long de la réalisation de ce travail, que ce soit par leurs encouragements ou leur aide pratique dans les aspects académiques. Votre présence dans ma vie m'a donné la force de continuer et de poursuivre mon objectif.

Hasna L Rana



Dédicace

À Dieu Tout-Puissant, pour sa miséricorde infinie et son accompagnement tout au long de ce parcours.

À moi-même, pour la persévérance et les efforts déployés durant cette belle aventure.

À ma mère, pour son amour inconditionnel, sa tendresse et ses prières silencieuses, source de ma force et de ma stabilité.

À mon père, pour sa sagesse, son soutien constant et ses encouragements qui m'ont guidée à chaque étape

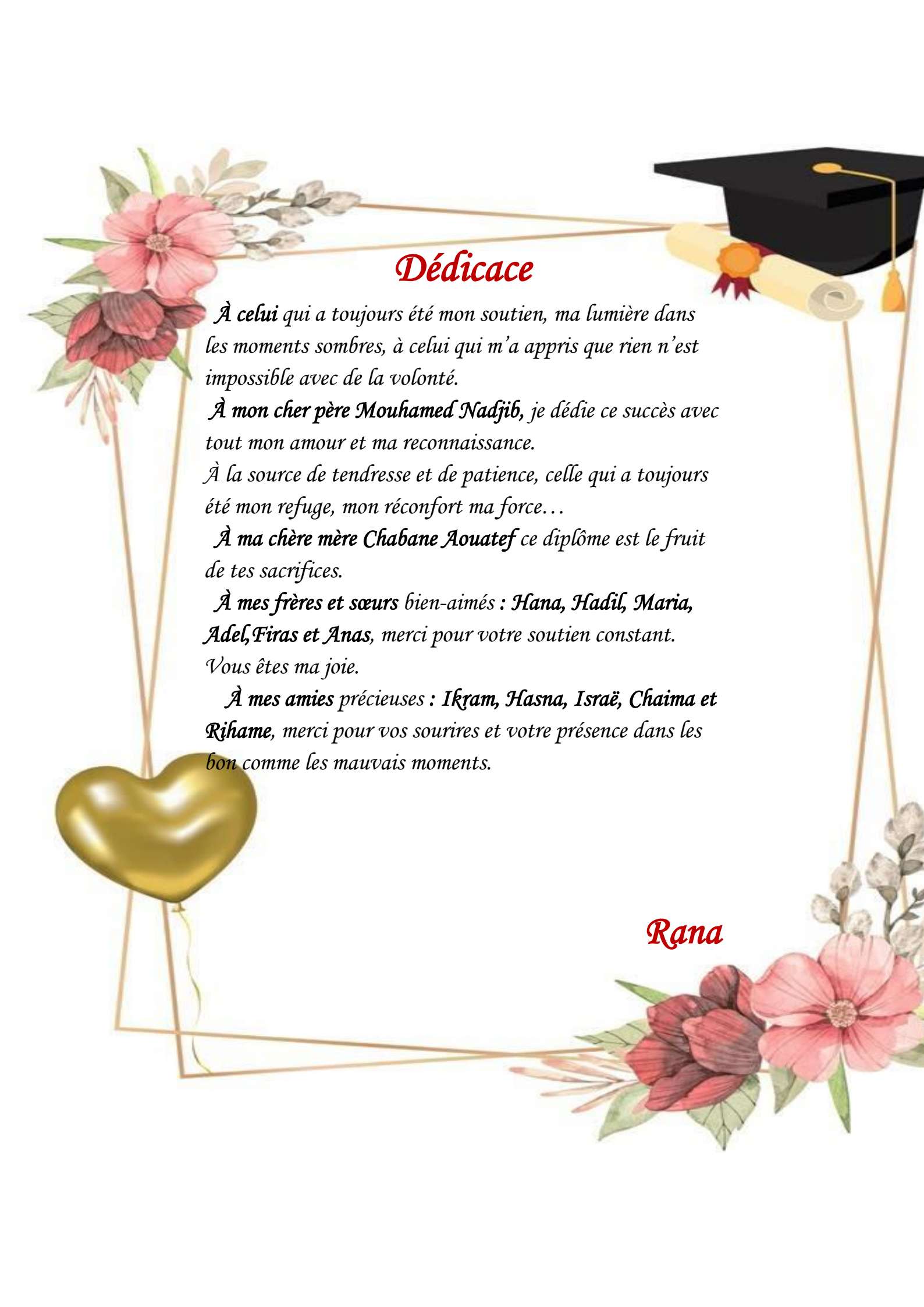
À mes frères et sœurs : Assia, Ahmed, Nour et Younes, pour leur affection, leur complicité et leur soutien précieux.

À mon grand-père Aïssa et ma grand-mère Bekhta, pour leur amour, leur foi en moi et leur sagesse inspirante.

À mes chères amies : Yasmine, Rana et Ikram, pour leur présence fidèle leur amitié sincère et les moments partagés.

Que Dieu vous protège, vous comble de bienfaits, et vous garde à mes côtés à chaque étape de ma vie.

Hasna



Dédicace

À celui qui a toujours été mon soutien, ma lumière dans les moments sombres, à celui qui m'a appris que rien n'est impossible avec de la volonté.

À mon cher père Mouhamed Nadjib, je dédie ce succès avec tout mon amour et ma reconnaissance.

À la source de tendresse et de patience, celle qui a toujours été mon refuge, mon réconfort ma force...

À ma chère mère Chabane Aouatef ce diplôme est le fruit de tes sacrifices.

À mes frères et sœurs bien-aimés : Hana, Hadil, Maria, Adel, Firas et Anas, merci pour votre soutien constant. Vous êtes ma joie.

À mes amies précieuses : Ikram, Hasna, Israë, Chaima et Rihame, merci pour vos sourires et votre présence dans les bon comme les mauvais moments.

Rana

Sommaire

Contents

Remerciement	
Sommaire.....	
Liste des figures.....	
Liste des tableaux.....	
Liste des abréviations.....	
INTRODUCTION GENERALE.....	1

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1.Etude de biopolymères :	4
I.1.1. INTRODUCTION :	4
I.1.2. Définition d'un biopolymère :	4
I.1.3. Source de biopolymère :	4
I.1.3.1. Sources d'origines végétales :	5
I.1.3.2. Sources animales protéines :.....	5
I.1.3.3. Provenance marines :	5
I.1.3.4. Origines microbiennes :	5
I.1.4. Variétés de biopolymères :	5
I.1.4.1. Polysaccharides (Glucides) :	5
I.1.4.2. Protéines (Peptides) :	5
I.1.4.3. Polymères issus des lipides :	5
I.1.4.4. Polymères issus de sources microbienne :	5
I.1.5. Catégorisation de biopolymère :	6
I.1.6. Les caractéristiques des biopolymères :	7
I.1.7. Les domaines d'application des biopolymères :	7
I.1.8. Avantages et inconvénients des biopolymères :	8
I.2. Etude de Cellulose :	8
I.2.1. Définition de cellulose :	9
I.2.2. Héli cellulose :	9

I.2.3. La lignine :	10
I.2.4. Structure de cellulose :	11
I.2.5. Les caractéristiques de cellulose :	12
I.2.6. Différentes sources de cellulose :	13
I.2.7. Mise en œuvre et utilisations de la cellulose :	13
I.2.7.1. Industrie du papier :	14
I.2.7.2. Secteur du textile :	14
I.2.7.3 Secteur pharmaceutique et médicale :	15
I.2.7.4. Secteur de l'alimentation :	15
I.2.7.5. Polymères et plastique dégradables :	15
I.2.7.6. Applications liées à l'environnement :	16
Références :	18

CHAPITRE II : Méthodes De Protection Contre La Corrosion

II.1. INTRODUCTION :	20
II.2. Quelque méthode de protection contre la corrosion :	20
II.2.1. La protection par revêtement :	20
II.2.2. Protection par inhibiteurs :	20-21
II.2.3. Le choix des matériaux :	21
II.3. Définition d'électrodéposition :	21
II.4. Principe général de l'électrodéposition :	22
II.5. Mécanismes d'électrodéposition :	23
II.5.1. Transfert de masse :	23
II.5.2. Le transfert de charge :	23
II.5.3. Cristallisation :	24
II.6. Facteurs et paramètres d'un dépôt électrolytique :	24
II.6.1. Métal de base :	24
II.6.2. Nature de l'électrolyte :	24
II.6.3. Concentration de l'électrolyte :	24
II.6.4. Conductibilité de l'électrolyte :	25
II.6.5. Température :	25
II.6.6. Agitation de l'électrolyse :	25

II.6.7. pH du bain :	25
II.6.8. La densité du courant :	25
II.7. Propriétés des dépôts électrolytiques de Ni-P-acétate de cellulose :	26
II.7.1. Propriétés et structure des dépôts :	26
II.7.2. Propriétés de Nickel :	26-27
II.7.3. Caractéristiques spécifiques de Phosphore :	28
Références :	30

CHAPITRE III : PARTIE PRATIQUE

III.1. INTRODUCTION :	32
III.2. Différentes sources de celluloses utilisées :	32
III.3. Extraction de cellulose :	32-33
III.3.1. Préparation des matières premières (prétraitements) :	34
III.3.2. Élimination de la cire :	34
III.3.2.1. Élimination de la lignine et l'hémicellulose :	35
III.3.2.2. Processus de blanchiment :	36-37
III.3.2.3. Séchage et stockage :	38
III.3.2.4. Calcul le rendement de cellulose extraite :	39
III.4. Techniques de caractérisation physico-chimiques de la cellulose :	39
III.4.1. Techniques de caractérisation physico-chimiques :	39
III.4.1.1. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) :	39
III.4.1.2. Diffraction des rayons X (DRX) :	39-40
III.4.1.3. Caractérisation morphologique par microscopie électronique à Balayage (MEB) :	40
III.5. Définition de partie 2 :	41
III.6. Description de montage expérimentale :	41
III.6.1. Matériaux :	41
III.6.1.1. Substrat utilisé :	41
III.6.1.2. Les principales caractéristiques de cuivre :	42
III.6.1.3. Anode utilisée :	42
III.6.2. Les produits chimiques :	43
III.7. Les étapes de travail :	44

III.7.1. Préparation des substrats :	44
III.7.1.1. Polissages mécaniques :	44
III.7.1.2. Dégraissage électrolytique :	45
III.7.1.3. Décapage chimique :	46
III.7.1.4. Rinçage :	47
III.7.2. Réalisation des dépôts :	47
III.7.2.1. L'électrodéposition Ni-P-acétate de cellulose :	47
III.7.2.2. Bain d'électrodéposition :	49
III.8. Variation des paramètres d'élaboration :	50
III.9. Techniques de caractérisation :	50
III.9.1. Analyse microstructurale :	50
III.9.2. Diffraction des rayons X (DRX) :	50
III.9.4. Analyse Electrochimie :	51
III.9.5. Caractérisation morphologique par microscopie électronique à Balayage MEB :	52
Références :	54

CHAPITRE IV : Résultats & discussions

IV.1. INTRODUCTION :	56
IV.2. Caractérisation de biopolymère :	56
IV.2.1. Rendement de cellulose extraite :	56
IV.3.2. Caractérisation par spectroscopie infrarouge (FTIR):	57
IV.4. Caractérisation par Diffraction des rayons X :	58
IV.5. Caractérisation par microscopie électronique à balayage (MEB) :	59
IV.6. Caractérisation des dépôts élaborés :	61
IV.6.1. Caractérisation par Diffraction des rayons X :	61
IV.6.1.1. Effet de densité de courant pour les dépôts à base de Nickel-phosphore-acétate de cellulose (NiPAC) :	61

IV.6.1.2. Effet de concentration de l'acétate de cellulose sur les caractéristiques des dépôts avec les densités du courant ($j=1 \text{ A.dm}^{-2}$, $j= 5 \text{ 1 A.dm}^{-2}$) :.....	64
IV.6.2. Comportement électrochimique des dépôts Ni-P-AC :	69
IV.6.2.1. Courbes de Polarisation (Voltamépotrométrie) :	69
IV.6.2.2. Caractérisation par MEB :	71
Références :	73
Conclusion générale :	75
Résumé :	76

Liste des figures et des photographies

Figure I.1 : Structure moléculaire de l'hémicellulose	10
Figure I.2 : Structure de la lignine	11
Figure I.3 : Structure de la cellulose	11
Figure I.4 : Structure de l'acétate de cellulose	12
Figure I.5: Uses of cellulose	16
Figure II.1: Schéma de principe du dépôt par voie électrolytique	21
Figure II.2: Le procédé de dépôt électrolytiques (Nickel pur)	28
Figure III.1 : Organigramme extraction d'acétate de cellulose	32
Figure III.2 : Prétraitements des fibres naturelles	33
Figure III.3 : Elimination de la cire	34
Figure III.4 : Méthode d'extraction de cellulose	35
Figure III.5 : Processus de Blanchiment	36
Figure III.6 : La cellulose obtenue à partir deux sources	37
Figure III.7 : Microscope électronique à Balayage	40
Figure III.8 : Plaques d'échantillons en cuivre	41
Figure III.9 : L'opération du polissage avec du papier Abrasif	44
Figure III.10 : Schéma de montage de dégraissage électrolytique	46

Figure III.11 : Schéma de décapage chimique	47
Figure III.12 : Dispositif expérimental de l'électrodéposition Ni-P-acétate de cellulose	49
Figure III.13 : Rayons X de type « BRUKER-AXS-D8 »	51
Figure III.14: CORRTEST Potentiostat / Galvanostat	52
Figure III.15: Microscope électronique à Balayage	53
Figure IV.1: Spectre infrarouge de l'acétate de cellulose	56
Figure IV.2: spectre DRX de l'acétate de cellulose en poudre	58
Figure IV.3 : Images obtenues par microscopie électroniques à balayage de l'acétate de cellulose (a) et spectre EDS(b)	59
Figure IV.4 : Profiles de DRX des dépôts Ni-P-cellulose en fonction de la densité de courant appliquée	61
Figure IV.5 : Profiles de DRX des dépôts Ni-P-cellulose en fonction de la concentration	65
Figure IV.6 : Profiles de DRX des dépôts Ni-P-acétate de cellulose en fonction de concentration de bio polymères avec $j= 5$	67
Figure IV.7 : Courbes de polarisation des revêtements Ni-P-électrodépôts pour différentes de concentrations	69
Figure IV.8 : Images obtenues par microscopie électroniques à balayage de revêtement homogène d'alliage Ni-P-AC(a) et spectre EDS(b)	72

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Domaines et applications des biopolymères	7
Tableau I.2 : Avantages et inconvénients des biopolymères	8
Tableau I.3 : Différentes sources 2de cellulose	13
Tableau II.1: Caractéristiques physiques et mécaniques du Nickel	25
Tableau II.2 : Propriétés physiques du Phosphore	27
Tableau III.1 : Différentes propriétés du cuivre	42
Tableau III.2 : Les produits chimiques	43
Tableau III.3 : Composition chimique du bain de dégraissage	45
Tableau III.4 : Composition du bain électrolytique	49
Tableau IV.1 : Caractéristiques cristallines des échantillons P1 à P4 (analyse DRX)	64
Tableau IV.2 : Caractéristiques cristallines des échantillons P1, P5 et P6 (analyse DRX)	67
Tableau IV.3 : Caractéristiques cristallines des échantillons P7 et P8 (analyse DRX)	69
Tableau IV.4 : Paramètres de la corrosion des alliages Ni-P dans le milieu agressif HCl,1M, obtenus à partir des droits de Tafel	70

Liste des abréviations

Le nom	Abréviations
PHA	Les polyhydroxyalcanoates
ADN	Acide désoxyribonucléique
ARN	Acide ribonucléique
PLA	Acide poly lactique
PHB	Poly hydroxybutyrate
EPS	Exo polysaccharides
PCL	Poly caprolactone
CMC	La carboxyméthylcellulose
DRX	Caractérisation par diffraction de rayon
FTIR	Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier
MEB	Microscope électronique à Balayage

INTRODUCTION GENERALE

I.1. Introduction générale

La corrosion désigne le mécanisme de décomposition et de détérioration des matières, en particulier des métaux, à la suite de leurs interactions avec l'environnement, tels que l'oxygène, l'eau ou encore les acides. La corrosion représente une préoccupation majeure pour de nombreux secteurs industriels, étant donné qu'elle provoque la dégradation des installations et des tuyaux, ce qui entraîne d'importantes pertes financières.

Ce phénomène peut se manifester de diverses façons, comme la corrosion chimique ou la réaction des métaux avec les éléments environnementaux, ou encore la corrosion électrochimique dans certaines circonstances. Pour remédier à cette situation, les chercheurs et spécialistes s'efforcent de trouver des moyens efficaces pour prévenir la corrosion des métaux. Une des solutions envisageables est de recourir à la cellulose et ses dérivées. La cellulose est une matière naturelle largement présente dans les végétaux comme le coton et la paille. La cellulose possède la faculté de créer des films de protection sur les surfaces métalliques, diminuant ainsi leur interaction avec les éléments environnementaux responsables de la corrosion.

La cellulose est obtenue à partir de sources végétales comme le coton et la paille grâce à des traitements chimiques précis destinés à en éliminer et à l'épurer des éléments non cellulosiques tels que la lignine et l'hémicellulose. Une fois extraite, la cellulose peut être employée dans une multitude d'applications, telles que les revêtements métalliques ou son incorporation avec d'autres matériaux pour renforcer sa capacité de protection contre la corrosion. On considère ces applications de cellulose comme des alternatives écologiques favorisant la sauvegarde de l'environnement. En effet, la cellulose est biodégradable et ne nuit pas à l'environnement, contrairement à d'autres composés chimiques employés pour lutter contre la corrosion.

Le but de notre est l'élaboration et la caractérisation des revêtements composites de type Ni-P-Acétate de cellulose sur des substrats en cuivre afin de le protéger contre la corrosion. En vue d'atteindre cet objectif, le travail présenté s'articule de la façon suivante : Le mémoire est structuré en quatre chapitres. Après une introduction générale, le Premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les bio polymères (origine, types et domaines d'application).

Le deuxième chapitre sera consacré aux différentes méthodes de protection contre la corrosion, ensuit l'électrodéposition d'une façon générale et les dépôts électrolytiques et leur condition d'élaboration.

Introduction générale

Pour le troisième chapitre, L'étude expérimentale sera décrite en présente le montage de la technique d'électrodéposition, et leurs différentes étapes, avec la description des méthodes et conditions expérimentales mises en œuvre au cours de la caractérisation de surface des dépôts.

Dans le chapitre quatre, on a affiché les différents résultats obtenus. Le plan s'achève par une conclusion générale résumant l'ensemble des résultats obtenus. Et en fin les références bibliographiques.

CHAPITRE I :

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Etude de Biopolymères [1,2]

I.1.1. Introduction [1,2]

Les biopolymères, qu'ils soient naturels ou synthétiques, suscitent de plus en plus d'intérêt grâce à leur capacité de biodégradabilité et leur adéquation avec l'environnement. À l'opposé des polymères d'origine pétrochimique, les biopolymères proviennent de ressources renouvelables comme les plantes, les micro-organismes et les animaux. La cellulose, l'amidon, la chitine et les poly hydroxy alcanates (PHA) figurent parmi les biopolymères largement employés, appréciés pour leurs caractéristiques notables dans les secteurs biomédical et de l'emballage écologique. Par exemple, la cellulose, largement disponible dans la biomasse végétale, est exploitée pour produire des films biodégradables et des membranes destinées à la purification de l'eau. Les polyhydroxyalcanates (PHA), générés par certaines bactéries en réaction à des conditions de stress, proposent une solution alternative intéressante aux plastiques traditionnels en raison de leur capacité à se biodégrader dans différents environnements. Ces matériaux sont également essentiels pour la protection contre la corrosion, notamment lorsqu'ils sont incorporés dans des revêtements composites, augmentant ainsi la capacité des métaux à résister aux agents corrosifs. Grâce à leurs caractéristiques écologiques et fonctionnelles, les biopolymères occupent aujourd'hui une place centrale dans les travaux de recherche visant à élaborer des matériaux durables et efficaces dans divers domaines industriels.

I.1.2. Définition d'un biopolymère [3,4]

Un biopolymère est un polymère de nature organique, fabriqué par des êtres vivants qui l'ont synthétisé à partir de matières premières renouvelables. Il peut être de nature protéinique (par exemple : collagène, soie, etc.). Polysaccharide (par exemple : cellulose, alginate...). Ou encore, acide nucléique (par exemple : ADN, ARN). Ces polymères ont généralement une propriété de biodégradabilité, leur offrant une multitude d'applications dans des secteurs tels que l'emballage, la biomédecine et la protection des métaux contre la rouille.

I.1.3. Sources de biopolymère

Les biopolymères sont des polymères d'origine naturelle composés d'unités récurrentes. Organisés en diverses catégories en fonction de leur provenance :

I.1.3.1. Sources d'origine végétale :

Polysaccharides : Amidon, cellulose, lignine, pectine. Protéines : Gluten, Soie de plante. Lipides : Cires naturelles.

I.1.3.2. Sources d'origine animale Protéines :

Gélatine, collagène. Polysaccharides : La chitine et ses dérivés.

I.1.3.3. Provenance marine :

Polysaccharides : Alginates (provenant des algues), Carraghénanes. Protéines : Spongine (protéine provenant des éponges).

I.1.3.4. Origines microbiennes :

Polyhydroxyalcanoates (PHA) : Générés par des bactéries grâce à la fermentation. Acide poly lactique (PLA) : Élaboré à partir de la fermentation de sucres d'origine végétale (comme le maïs ou la betterave).

Ces biopolymères sont produits par :

- * L'extraction à partir de matières naturelles.
- * La fermentation microbienne.
- * Des techniques de conversion chimique de ressources renouvelables.

I.1.4. Variétés de biopolymères :

Selon leur structure chimique et leur source d'origine, les biopolymères sont répartis en diverses catégories [5].

I.1.4.1. Polysaccharides (Glucides)

Ces polymères se composent de monosaccharides et sont essentiellement Provenant de plantes et d'organismes marins. Training sur des données jusqu'à octobre 2023. Cellulose : constituant majeur des parois cellulaires des végétaux. Amidon : source d'énergie pour les plantes, se trouve dans le maïs et les pommes de terre. Chitine : On la trouve dans l'exosquelette des insectes et crustacés. Agar, Alginate, Carraghénane : dérivés d'algues exploités dans les secteurs alimentaire et pharmaceutique [5].

I.1.4.2. Protéines (peptides)

Les biopolymères protéiques, constitués d'acides aminés, jouent un rôle aussi bien structurel que fonctionnel. Exemples : le collagène, la gélatine, la kératine, la soie, etc.

I.1.4.3. Polymères issus des lipides

Ces biopolymères renferment des chaînes hydrophobes et sont fréquemment employés pour des usages biodégradables. Exemples : PHA, cires naturelles.

I.1.4.4. Polymères issus de sources microbiennes

Des micro-organismes les produisent par 2des processus de fermentation.

Illustrations : PLA, PHB, EPS [5].

I.1.5. Catégorisation de biopolymère

* En fonction de leur provenance

* Biopolymères naturels : issus directement d'organismes vivants (plantes, animaux, micro-organismes). Par exemple : Protéines (collagène, kératine), Polysaccharides (cellulose, amidon), Acides nucléiques (ADN, ARN).

* **Biopolymères fabriqués à partir de ressources durables** : produits par transformation chimique de biopolymères naturels ou via la synthèse à partir de monomères dérivés de la biomasse. Par exemple : Acide poly lactique (PLA).

* **Biopolymères issus de micro-organismes** : produits par des bactéries ou d'autres micro-organismes. Formé à partir de données jusqu'en octobre 2023.

*) Basé sur la structure chimique

***Polysaccharides**

*) Exemples : cellulose, amidon, alginate.

* Applications : packaging écologique, secteur de l'alimentation, biomédecine.

***Protéines :**

*) Illustrations : collagène, gélatine, fibroïne de soie.

*) Application : biomatériaux, films écologiques, médecine régénérative.

***Polyesters biologiques**

*) Cas d'étude : polyhydroxyalcanoates (PHA), acide poly lactique (PLA).

*) Application : plastiques dégradables, biomédecine.

***)Acides nucléiques**

*) Exemples : ADN, ARN.

*) Applications : biotechnologie, domaine médical.

* En fonction de la biodégradabilité

* Biopolymères dégradables

*) Illustrations : PLA, PHB, amidon transformé.

*) Décomposés en CO₂, eau et biomasse par des micro-organismes. Des biopolymères biosourcés qui ne sont pas biodégradables.

*) Exemples : bio-polyéthylène (Bio-PE), bio-polypropylène (Bio-PP).

*) Produits dérivés de ressources renouvelables, mais ayant une composition chimique comparable aux plastiques pétroliers.

I.1.6. Les caractéristiques des biopolymères

Les biopolymères ont des caractéristiques distinctives qui les rendent appropriés pour une variété d'applications. Ces derniers sont à la fois biodégradables, minimisant ainsi leur empreinte écologique, et biocompatibles, ce qui autorise leur emploi dans des domaines médicaux comme l'ingénierie des tissus et la délivrance de médicaments. Quelques biopolymères possèdent des caractéristiques mécaniques remarquables, alliant flexibilité et rigidité, ce qui les rend bénéfiques tant pour l'emballage que pour l'ingénierie biomédicale. Certains matériaux, tels que la chitine et la gélatine, montrent une forte affinité pour l'eau, tandis que d'autres, comme la lignine, démontrent une grande résistance à celle-ci. En outre, certains biopolymères présentent d'excellentes propriétés thermiques, ce qui favorise leur emploi dans des domaines industriels tels que la fabrication de bioplastiques [6].

I.1.7. Les domaines d'applications des biopolymères

Le tableau suivant présente les principaux domaines d'application des biopolymères :

Tableau I.1 : Domaines et applications des biopolymères

Domaine	Applications
Emballages	Films biodégradables, emballages alimentaires et industriels durables.
Médicales	Sutures, implantés, pansements, capsules médicamenteuses.
Cosmétiques	Epaississants, films hydratants, agents de soin de la peau.
Agricultures	Films de paillage biodégradables, engrais à libération contrôlée.
Environnements	Dépollution du sol et de l'eau, matériaux filtrants.

I.1.8. Avantages et inconvénients des Biopolymères

Le tableau suivant met en évidence les principaux avantages et inconvénients des biopolymères :

Tableau I.2 : Avantages et inconvénients des bios polymères

Avantages	Inconvénients
1. Biodégradabilité : Se décomposent naturellement sous l'effet des micro-organismes, réduisant ainsi la pollution.	1. Cout élevé : Plus chers à produire que les polymères synthétiques issus du pétrole.
2. Renouvelable : Fabriqués à partir de ressources naturelles (amidon, cellulose...) réduisant la dépendance aux ressources fossiles.	2. Propriétés mécaniques limitées : Moins résistants et plus fragiles que certains plastiques conventionnels.
3. Biocompatibilité : Utilisés dans le domaine médical (sutures, implants...) en raison de leur comptabilité avec le corps humain.	3. Dégradation incontrôlée : Leur biodégradabilité peut être un inconvénient si elle se produit trop rapidement ou dans des conditions non souhaitées.
4. Réduction des émissions de CO₂ : Leur production génère moins de gaz effet de serre comparé aux plastiques traditionnelles.	4. Difficulté de production à grande échelle : Nécessaire des infrastructures spécifiques et des procédés plus complexes.
5. Moins de toxicité : Ne libèrent pas de produits chimiques nocifs lors de leur décomposition.	5. Sensibilité à l'humidité et à la température : Certains bios polymères absorbant l'eau, ce qui altère leurs propriétés.

I.2. Etude de Cellulose

La cellulose est le polymère organique le plus présent sur notre planète, représentant la composante majeure des parois cellulaires de certains micro-organismes et des plantes. Elle est couramment déployée dans plusieurs secteurs, tels que la production de papier, de textile, de bioplastiques et de composites écologiques, grâce à ses caractéristiques mécaniques, thermiques et chimiques exceptionnelles.

L'obtention de la cellulose implique la séparation de ce bio polymère à partir de matières premières naturelles comme le bois, les fibres végétales (coton, lin, chanvre) ou encore les déchets agricoles (paille, bagasse, coquilles de noix de coco). Ce processus comporte plusieurs phases clés, y compris le prétraitement, l'extraction de la lignine et des hémicelluloses, ainsi que la purification de la cellulose en fonction de la matière première et de l'application prévue, différentes techniques d'extraction peuvent être utilisées:

1. L'extraction chimique, qui fait appel à des solutions alcalines (comme l'hydroxyde de sodium) ou acides (tels que l'acide sulfurique ou l'acide oxalique), sert à retirer les éléments non désirés.

2. L'extraction enzymatique utilise des enzymes spécifiques (comme les cellulases et les lignines) pour décomposer sélectivement les éléments non cellulosiques.

3. La libération de cellulose sous forme de nano fibres est obtenue par l'extraction mécanique, utilisant des procédés thermiques comme le broyage, l'ultrasonication et la micro-fluidisation.

L'amélioration de ces processus permet d'obtenir des celluloses aux caractéristiques diversifiées, appropriées à des utilisations précises, comme la production de nano cellulose, de films biodégradables et de matériaux composites renforcés [7].

I.2.1. Définition de la cellulose

La cellulose est un polysaccharide linéaire constitué d'unités de D-glucose Liées par des liaisons B-1,4-glucosidiques. C'est le principal composant structural des parois cellulaires des plantes et l'un des biopolymères les plus abondants sur terre. Grâce à sa structure cristalline et sa résistances mécaniques, la cellulose joue un rôle essentiel dans la rigidité des végétaux et est largement utilisée dans les industries du papier, des textiles et des bioplastiques. La cellulose est insoluble dans l'eau et dans la plupart des solvants organiques en raison de ses liaisons hydrogène intermoléculaires. Cependant, elle peut être modifiée chimiquement pour produire des dérivés tels que la cellulose acétylée, utilisée dans la fabrication de films et de fibres synthétiques [7].

I.2.2.Hémicellulose

L'hémicellulose est un polymère polysaccharidique hétérogène présent dans les parois cellulaires des végétaux, jouant un rôle crucial dans la robustesse des structures végétales. Galactoseérence de la cellulose qui est constituée uniquement de glucose,

l'hémicellulose est faite de divers monomères sucrés comme la xylose, le mannose, le galactose et l'arabinose. Elle possède une structure plus ramifiée et moins uniforme, ce qui la rend moins cristalline et plus sujette à l'hydrolyse par des enzymes ou des acides dilués. L'hémicellulose est utilisée dans plusieurs secteurs, y compris la fabrication de bioéthanol, l'industrie du papier, l'alimentation et la production de matériaux biodégradables. Elle est aussi envisagée comme une source potentielle de produits chimiques d'origine biologique et de composés pharmaceutiques, grâce à sa biodégradabilité et à sa capacité de modification chimique aisée.

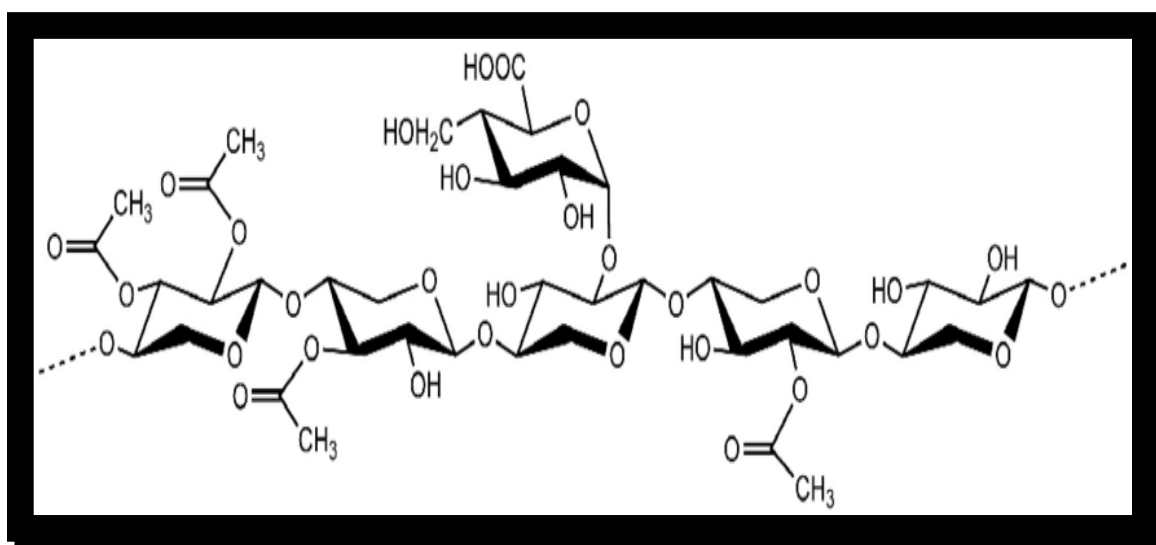


Figure I.1 : Structure moléculaire de l'hémicellulose [8]

I.2.3. La lignine

La lignine est un polymère organique complexe qui se trouve dans les parois cellulaires des plantes et qui y joue un rôle crucial en assurant leur rigidité et leur résistance mécanique. Elle est composée de monomères phényl propanoïdes, principalement l'alcool coumarinique et l'alcool sinapique, qui se réunissent de manière aléatoire pour créer une structure tridimensionnelle robuste. Grâce à ses caractéristiques hydrophobes et sa résistance aux agents biologiques, la lignine défend les plantes contre les agressions microbiennes et les conditions environnementales hostiles. Elle est générée en grande mesure durant la biosynthèse des parois cellulaires secondaires chez les plantes vasculaires et représente, après la cellulose, un composant majeur. Le second polymère naturel le plus répandu sur notre planète. Dans le domaine industriel, la lignine est un dérivé important des méthodes de production de la pâte à papier, en particulier lors des processus kraft et sulfite. Sa

richesse en composés aromatiques génère un intérêt grandissant pour la production de produits chimiques renouvelables, de biocarburants et de matériaux composites.

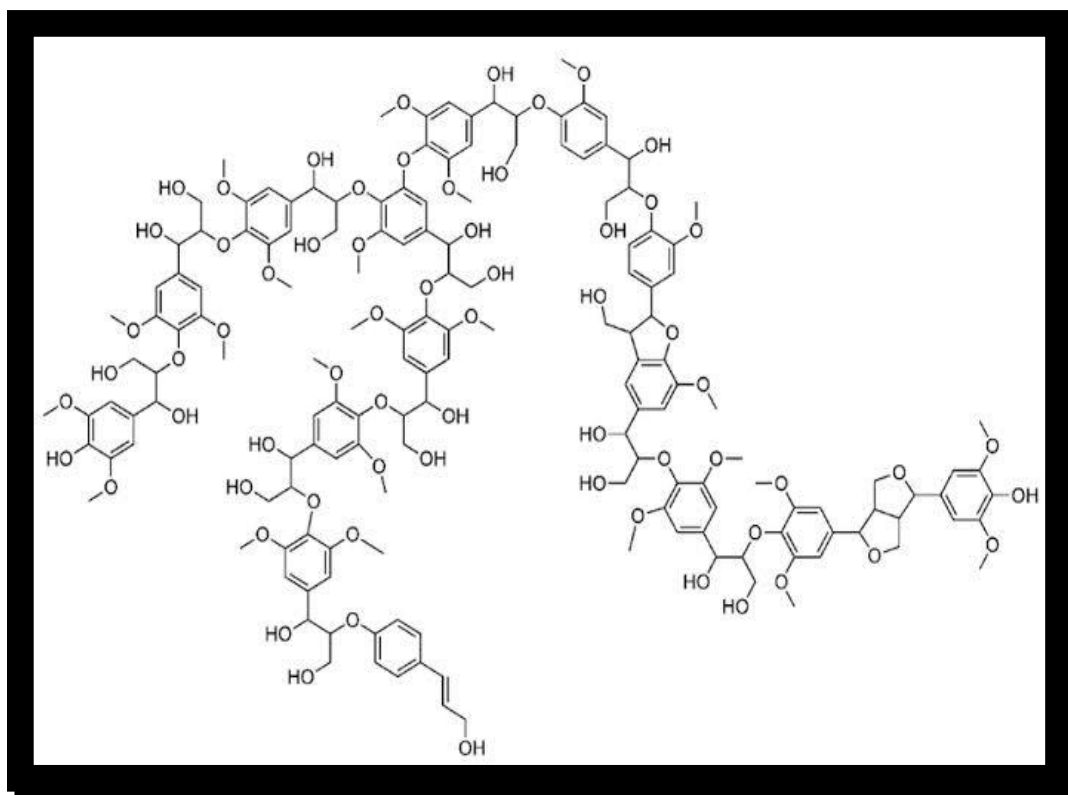


Figure I.2 : Structure de la lignine [9]

I.2.4. Structure de la cellulose

La formule chimique de la cellulose ($C_6H_{10}O_5$) a été établie en 1913. La cellulose, d'un point de vue chimique, est un homopolysaccharide linéaire constitué par la répétition d'unités D-anhydroglucopyranose (AGU) reliées entre elles par des liaisons glycosidiques de type B (1→4). La cellobiose est l'unité répétitive formée par l'association de deux monomères de glucose (l'un dans un sens, l'autre dans le sens inverse) [10].

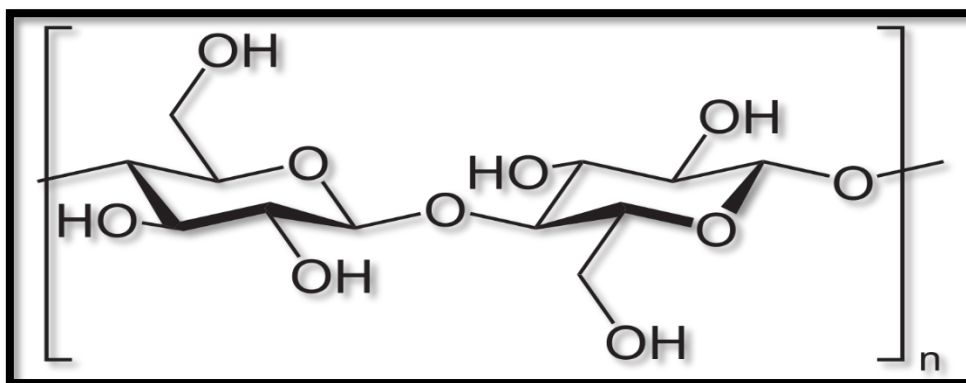
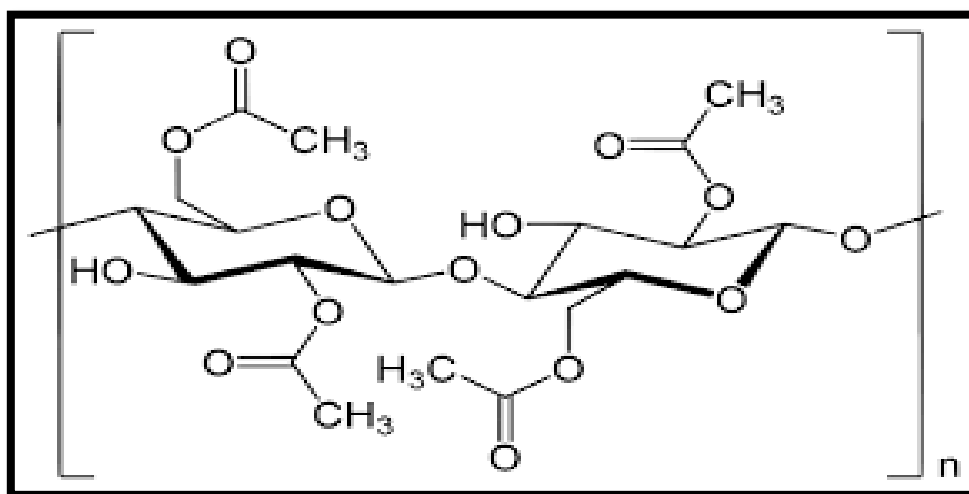


Figure I.3 : Structure de la cellulose [11]**Figure I.4 : Structure de l'acétate de cellulose [12]****I.2.5. Les caractéristiques de la cellulose**

La cellulose est un biopolymère naturel, qui constitue principalement les parois cellulaires des plantes. Il s'agit d'un polymère linéaire de glucose (B-D-glucopyranose). Enchaîné par des liaisons B₁→4), voici les propriétés majeures :

Caractéristiques physiques :

- Caractéristique : texture robuste et fibreuse, de couleur blanche à translucide.
- Densité : approximativement 1,5 g/cm³
- Insouciance : ne se dissout pas dans l'eau et les solvants organiques habituels.
- Résistance mécanique : offre une rigidité supérieure et une résistance à la traction remarquable.
- Porosité : peut fluctuer en fonction de la provenance et du procédé.

Caractéristiques chimiques :

- Hydrophilie : aptitude à absorber l'eau par l'intermédiaire des groupes hydroxyles (OH).
- Résistance chimique : résiste à plusieurs solvants, mais est altérée par des acides puissants.
- Décomposition thermique : commence à se décomposer au-delà de 300 °C.
- Changements chimiques : pourrait être estérifiée (par exemple, le nitrate 2^{de} cellulose) ou éthérifiée (par exemple, la carboxyméthylcellulose).

Caractéristiques biologiques

- Biodégradabilité : capable d'être décomposé par des enzymes telles que la cellulose.
- Absence de toxicité : écologique et sans danger pour l'environnement.

I.2.6. Différentes sources de cellulose [13]

Le tableau ci-dessous illustre les principales origines naturelles de la cellulose :

Tableau I.3 : différentes sources de cellulose

Catégories	Description	Exemples	Cellulose %
Fibres de graines	Fibres collectées à partir de graines de caisses semences	Coton, d'olive	90
Fibres de feuilles	Fibres collectées à partir des feuilles	Feuilles de palmier Agave	33
Fibres libériennes	Les fibres sont Collectées à partir de la peau ou bas entourant la tige de Leurs plants	Lin, jute, chanvre Et les fibres vigne	33
Fibres de fruits	Les fibres sont Collectées à partir de fruit de la plante	Fibre de noix de coco	30_50
Fibres de fruits	Les fibres sont En fait les tiges de la plante	Riz, orge, blé, Pailles, bambou	40_50

I.2.7. Mise en œuvre et utilisation de la cellulose

La cellulose, qui constitue principalement les parois cellulaires des plantes, est un polymère naturel aux nombreuses utilisations industrielles. Dans l'industrie du papier et du carton, elle constitue le matériau de base indispensable pour la production de différents articles d'emballage et d'impression. En tant qu'additif alimentaire (E460), elle est employée en tant qu'agent de remplissage et stabilisateur dans une

variété de produits alimentaires. L'industrie pharmaceutique l'utilise pour la fabrication d'excipients et de capsules végétales biodégradables.

En outre, la cellulose modifiée, telle que la carboxyméthylcellulose (CMC), est utilisée dans les domaines des cosmétiques, des peintures et des produits d'hygiène. Notamment les nano celluloses, ses dérivés suscitent un intérêt grandissant pour des applications de pointe en biomédecine, en ingénierie des matériaux et dans les composites renforcés [7].

I.2.8.1. Industrie du papier

La cellulose constitue l'élément prédominant dans la fabrication du papier. Elle est dérivée de matériaux végétaux tels que le bois, la paille et le lin. La production de papier implique la conversion de ces matières en une masse riche en fibres de cellulose, qui est par la suite manipulée pour obtenir divers genres de papier et carton. En outre, des dérivés de la cellulose tels que la carboxyméthylcellulose (CMC) sont employés comme adjuvants pour optimiser les caractéristiques du papier. Ces dérivés favorisent l'accumulation d'eau pendant la fabrication du papier, garantissant ainsi une distribution plus homogène des fibres et des charges, ce qui optimise la qualité du papier fabriqué. En outre, La cellulose est employée dans la production du papier isolant électrique. Elle est utilisée pour l'isolation des transformateurs, des câbles et d'autres dispositifs électriques grâce à ses remarquables capacités d'isolation. Dans un cadre différent, la cellulose favorise l'élaboration d'emballages durables et respectueux de l'environnement. Elle est utilisée dans la fabrication de matériaux d'emballage biodégradables, diminuant ainsi la dépendance aux plastiques traditionnels. Finalement, la cellulose est employée dans le processus de traitement des eaux résiduaires provenant de l'industrie du papier. L'ajout de matériaux contenant de la cellulose est effectué afin d'accélérer le processus de sédimentation des impuretés et d'améliorer la qualité de l'eau traitée.

I.2.8.2. Secteur du textile

La cellulose et ses dérivés sont d'une importance cruciale pour l'industrie du textile. On les emploie comme des agents de collage pour consolider les fils et limiter leur rupture pendant le tissage. En outre, ils sont utilisés comme agents épaississants dans les pâtes d'impression pour garantir une distribution uniforme des colorants sur

les textiles. Les dérivés de la cellulose contribuent aussi à améliorer l'aspect des textiles en leur fournissant des caractéristiques spécifiques telles que la douceur et la capacité à résister aux plis.

Finalement, ils assurent la stabilité des émulsions employées dans les processus textiles, garantissant par conséquent une efficacité accrue des produits utilisés.

I.2.8.3. Secteur pharmaceutique et médical

L'industrie pharmaceutique et médicale accorde une grande importance à la cellulose et ses dérivés. On utilise le carboxyméthylcellulose (CMC) comme épaississant dans les formulations pharmaceutiques, ce qui améliore la viscosité et la tenue des émulsions et des suspensions. En outre, la nano cellulose est utilisée dans l'élaboration de biomatériaux novateurs grâce à ses caractéristiques qui la rendent appropriée pour de nombreuses applications médicales. De plus, l'hydroxyéthylcellulose, associée au chlorure de sodium, est employée dans la production de gouttes oculaires destinées à hydrater et apaiser la sécheresse et l'irritation.

I.2.8.4. Secteur de l'alimentation

1) Agent de renforcement et de stabilisation

On utilise le carboxy méthyl cellulose (CMC) pour rehausser la viscosité et la stabilité des denrées alimentaires telles que les sauces, les soupes et les crèmes glacées.

2) Stabilisateur à base de mousse

Les produits aérés tels que la crème chantilly et les mousses utilisent des éthers de cellulose afin d'accroître leur volume et de préserver leur forme.

3) Alternative aux matières grasses

Les dérivés de cellulose servent à substituer les graisses dans l'alimentation légère, procurant une consistance crémeuse sans l'ajout de calories superflues.

4) Perfectionnement des produits boulangers

Ils contribuent à la rétention d'humidité, amplifient le volume du pain et prolongent la longévité des produits de boulangerie.

I.2.8.5. Polymères et plastiques dégradables

La cellulose, en tant que polymère naturel biodégradable, est couramment employée.

Dans le cadre de matériaux respectueux de l'environnement

- 1) Emballages biodégradables : substituent les plastiques à usage unique dans les films d'emballage.
- 2) Amélioration des polymères : optimise les caractéristiques mécaniques et thermiques des plastiques biodégradables en utilisant des monocristaux de cellulose.
- 3) Films transparents et souples : employés dans le conditionnement des aliments comme une option écologique.
- 4) Appareils médicaux : utilisée dans les bandages et l'ingénierie tissulaire en raison de sa biocompatibilité.

I.2.8.6. Applications liées à l'environnement

La cellulose est une matière écologique avec de nombreuses utilisations dans le domaine environnemental. Elle est employée comme isolant thermique écologique, confectionné à partir de papier recyclé, pour augmenter l'efficacité énergétique des édifices. Elle substitue aussi les plastiques dans les emballages biodégradables, contribuant par conséquent à la diminution de la pollution plastique. Elle est utilisée pour la purification de l'eau, en retirant les contaminants industriels, grâce à ses capacités d'adsorption. Pour finir, les aérogels de cellulose sont élaborés en tant que matériaux innovants pour l'isolation thermique, contribuant à une architecture plus durable. Grâce à ces progrès, la cellulose s'affirme comme un pilier du développement durable [14].

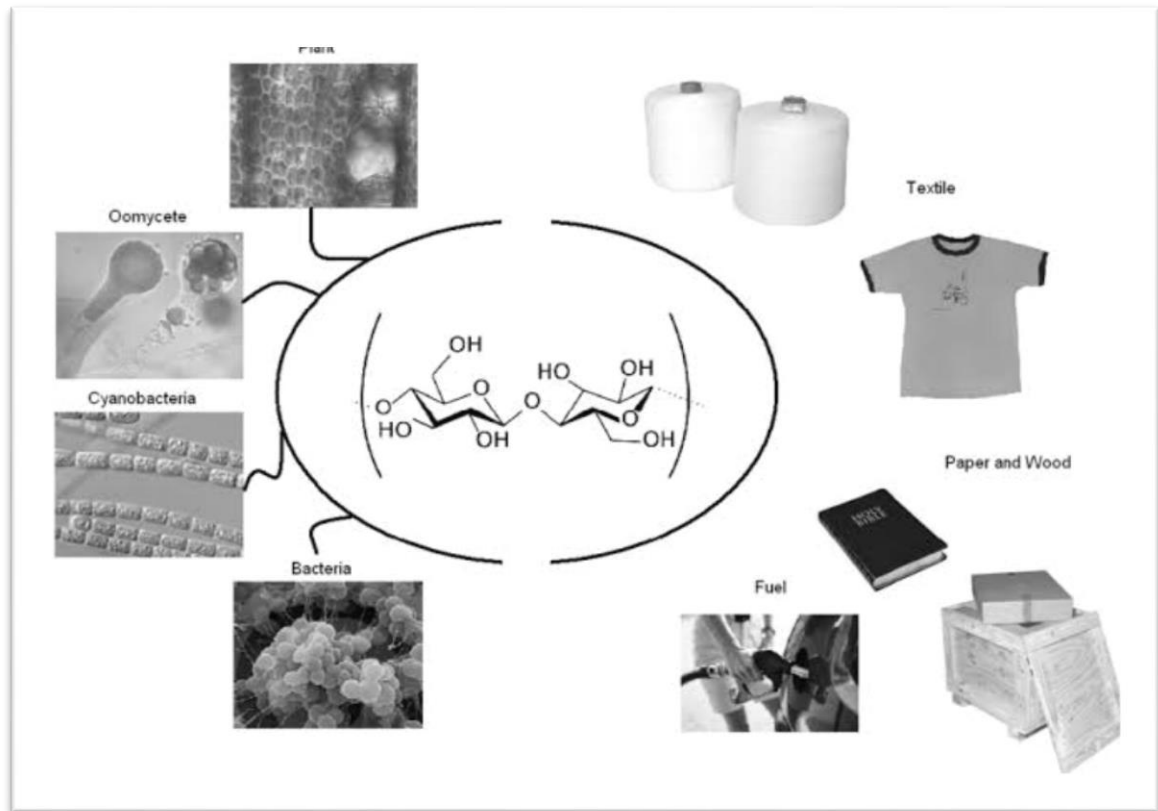


Figure.I.5: Uses of Cellulose [15]

Références

- [1] Rinaudo, M. (2006). Chitin and Chitosan: properties and applications. Progress in polymer science, 312(7), 603_632.
- [2] Van de Velde, K., & Kiekens, P. (2002). Biopolymers: overview of several properties and consequences on their applications. Polymer testing, 21(4),433_442.
- [3] Kalia, S., et al. (2011). "Polysaccharide based Graft copolymers" springer science & Business Media.
- [4] Pillai, C.K.S, et al. (2009). « Chitin and chitosan polymers »: Chemistry, solubility, and fiber formation" Progress in polymer science, 34(7), 641_678.
- [5] Renard, J., (2007). Polysaccharides et biopolymères. Lavoisier.
- [6] Heinze., T., Libert, T., & Koschella, A. (2006). Polysaccharides: Molecular and structural Biology. Springer.
- [7] Klemm, D., Heublein, B., Fink, H. P., & Bohn, A. (2005). Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw materials. Angewandte chemie international Edition, 44(22),3358_3393.
- [8] Disponible en ligne sur le site: <https://ملف: Xylan hardwood.svg - ویکیپیڈیا>
- [9] Devabaktuni lavanya, * P. K. Kulkarni, Mudit Dixit, Prudhvikanth Raavi, L.Naga Vamsi Krishna. Departement of pharmaceutics, J.S.S College of pharmacy J.S.S University,S.S Negar, Mysore_570015, India. Receive es : 14 sep.2011 ; Revised: 22
- [10] Camille DECROIX (2019). Développement d'un matériau à base d'acétate de cellulose par plastification réactive en extrusion. Thèse de doctorat de l'université de Lyon.
- [11] Disponible en ligne sur le site
https://heathjade.net/microcrystalline_cellulose
- [12] Disponible en ligne sur le site :<https://www.plasticsnews.com/>
- [13] Disponible en ligne sur le site :
https://www.researchgate.net/figure/Lignine_organosolv-24-fig7_324683605
- [14] Isoproc. (2025). La cellulose : un matériau isolant polyvalent
- [15] Disponible en ligne sur le site :
https://www.researchgate.net/figure/Examples-of-some-sources-and-uses-of-cellulose-Pictures-showing-representative-species_fig1_265408673?tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6Ii9kaXJlY3QiLCJwYWdlIjoieX2RpcmVjdCJ9f

CHAPITRE II :
Méthodes de Protection contre la
corrosion

II.1. Introduction

Les techniques de protection anticorrosion sont indispensables pour réduire les impacts négatifs de la corrosion sur les matériaux, notamment dans les secteurs comme le pétrole et le gaz. Ces approches peuvent considérablement atténuer l'effet économique de la corrosion, qui représente approximativement 2,2 billions de dollars chaque année à l'échelle mondiale.

Dans ce segment, nous allons examiner les méthodes principales pour se protéger contre la corrosion.

Il est primordial de protéger contre la corrosion pour assurer la longévité des matériaux, notamment dans des domaines clés tels que l'industrie pétrolière et gazière, où les dommages économiques causés par la corrosion sont significatifs. Les techniques les plus couramment employées comprennent la protection cathodique, les revêtements de protection et les inhibiteurs chimiques, chacune ayant ses propres atouts et contraintes. Bien qu'efficaces, ces méthodes requièrent des modifications constantes pour répondre aux changements des contextes industriels. Il demeure donc essentiel de poursuivre l'innovation pour augmenter l'efficacité de ces systèmes de protection [1].

II.2. Quelque méthode de protection contre la corrosion

II.2.1 La protection par revêtement [2,3,4]

Cette technique implique l'application d'une barrière protectrice sur la surface du métal afin de le protéger contre l'environnement corrosif (humidité, oxygène, substances chimiques, etc.).

Les revêtements les plus fréquemment utilisés sont :

L'art de la peinture : L'application de couches successives (de base, intermédiaire, de finition) permet d'assurer une excellente adhésion et une protection durable.

Le processus de galvanisation : Mise en application d'une couche de zinc sur l'acier ou le fer, procurant une protection sacrificielle.

Les couches polymères ou plastiques : Employés en particulier pour les conduites ou les équipements soumis à des milieux chimiques hostiles.

II.2.2. Protection par inhibiteurs

L'utilisation d'inhibiteurs pour la protection contre la corrosion est une technique chimique performante, fréquemment mise en œuvre dans les systèmes clos comme les circuits de refroidissement, les chaudières ou encore dans des environnements salins

ou acides. Un inhibiteur de corrosion est un agent chimique, habituellement incorporé en petite quantité, qui diminue le taux de corrosion en altérant l'environnement du métal ou en créant une barrière de protection sur son exosquelette [3].

Il existe plusieurs types d'inhibiteurs, classés selon leur mécanisme d'action :

- **Les inhibiteurs anodiques** : Ils ralentissent la réaction d'oxydation du métal en favorisant la formation d'un film passif sur l'anode. Exemple : les chromates et les nitrates.

- **Les inhibiteurs cathodiques** : Ils ralentissent la réaction de réduction, souvent en précipitant des composés sur les zones cathodiques (comme les ions zinc ou calcium).

- **Les inhibiteurs mixtes** : Ils agissent à la fois sur les réactions anodiques et cathodiques.

- **Les inhibiteurs par adsorption** : Surtout utilisés dans les milieux acides, ces composés organiques (amines, thiols, imidazolines, etc.) s'adsorbent à la surface métallique pour créer une barrière physique contre les agents corrosifs.

II.2.3. Le choix des matériaux [2,5]

Le choix des matériaux joue un rôle fondamental dans la lutte contre la corrosion. Il est préférable d'utiliser :

- Des alliages résistants à la corrosion, comme l'acier inoxydable contenant du chrome.

II.3. Définition d'électrodéposition

L'électrodéposition est un procédé électrochimique qui consiste à déposer une fine couche métallique sur une surface conductrice à l'aide d'un courant électrique continu. Cette technique repose sur la réduction des ions métalliques dissous dans une solution électrolytique, qui se déposent sous forme de métal solide à la surface de la cathode. Le substrat à recouvrir est immergé dans une solution contenant les ions du métal à déposer, et joue le rôle de cathode, tandis qu'une anode (active ou inerte) complète le circuit. Sous l'effet du courant, les ions métalliques migrent vers la cathode, où ils sont réduits et forment un revêtement métallique.

Ce procédé est largement utilisé dans de nombreux domaines industriels pour améliorer les propriétés de surface des matériaux, notamment la résistance à la corrosion, l'apparence esthétique ou encore la conductivité électrique [5].

II.4. Principe général de l'électrodéposition

L'électrodéposition repose sur des principes électrochimiques fondamentaux mettant en œuvre une réaction d'oxydoréduction dans une cellule électrolytique. Le processus implique généralement deux électrodes (une cathode et une anode) immergées dans une solution contenant des ions métalliques. Lorsqu'un courant électrique continu est appliqué, les ions métalliques présents dans l'électrolyte migrent vers la cathode, où ils subissent une réduction et se déposent sous forme métallique. Le schéma général de ce procédé est présenté à (la figure II.1) qui illustre les différentes composantes : anode, cathode, électrolyte, et le mouvement des ions métalliques vers la surface du substrat.

Ce procédé est largement utilisé dans de nombreux domaines industriels pour améliorer les propriétés de surface des matériaux, notamment la résistance à la corrosion, l'apparence esthétique ou encore la conductivité électrique [6].

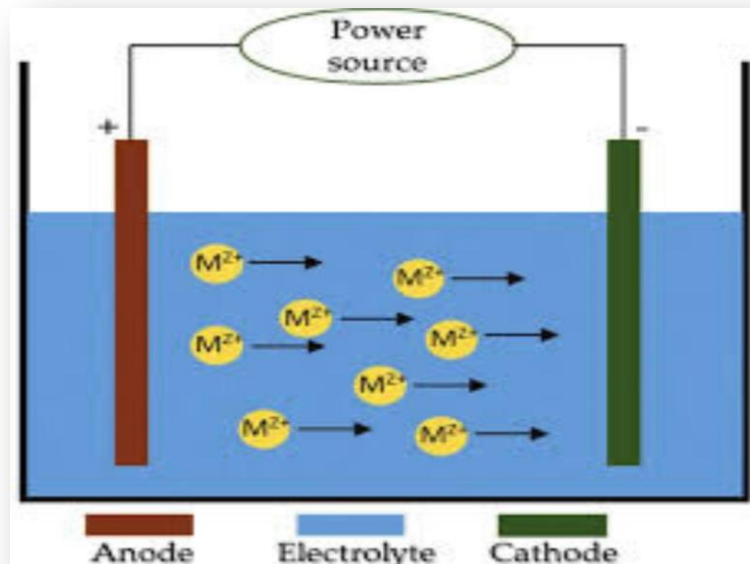


Figure II.1 : Schéma de principe du dépôt par voie électrolytique [7]

II.5. Mécanismes D'électrodéposition

Si un électrolyte contient un sel de l'électrode métallique, il est alors envisageable, à un potentiel donné, de déposer ce métal. Le processus d'électro-cristallisation peut être décrit de manière simplifiée par trois étapes principales :

II.5.1. Transfert de masse

Ce transfert correspond à l'apport des ions hydratés depuis le sein de la solution jusqu'à l'interface métal/solution. Trois phénomènes principaux déterminent ce processus :

a) La migration

Le déplacement des ions sous l'effet du champ électrique résultant de la différence de potentiel entre l'anode et la cathode.

b) La diffusion

Le mouvement des espèces ioniques dû au gradient de concentration au voisinage de l'interface électrode-solution, visant à compenser la consommation de matière à l'électrode.

c) La convection

Le transport des ions par les mouvements du liquide, provoqués par des agitations mécaniques, thermiques ou d'autres sources externes.

II.5.2. Le transfert de charge

Est un mécanisme complexe impliquant plusieurs étapes. Les ions dans la double couche, proche de l'électrode, subissent des interactions de type Van Der Waals (de longue portée), entraînant une physisorption, ou des interactions de courte portée menant à une chimisorption. Ces ions solvates, situés près de l'interface électrode-électrolyte, sont alors adsorbés. Ce processus appelé ad ionisation, se décompose en plusieurs étapes :

- Adsorption de l'ion solvate sur le substrat.
- Désolvatation, où l'on perd sa gaine de solvation.
- Diffusion et fixation de l'ion adsorbé sur un centre actif de la cathode, suivie par l'agrégation de ces atomes pour former un germe de cristallisation, également appelé centre de nucléation.

II.5.3. Cristallisation

La cristallisation lors d'un processus électrochimique, comme

l'électrodéposition, correspond à la formation d'un dépôt solide à partir d'ions métalliques présents en solution. Ce processus débute par la nucléation, où des amas d'atomes appelés germes se forment sur la surface de l'électrode, Ces germes croissent ensuite par l'ajout successif d'ions réduits, aboutissant à un dépôt cristallin organisé.

II.6. Facteurs et paramètres d'un dépôt électrolytique

Le dépôt électrolytique est influencé par divers facteurs et paramètres qui déterminent la qualité et les caractéristiques du matériau déposé. Les principaux aspects incluent la composition du bain électrolytique, la densité du courant, la température, le pH et le temps de dépôt. La compréhension de ces paramètres est cruciale pour optimiser le processus de dépôt et obtenir les propriétés souhaitées du matériau [8].

II.6.1. Métal de base

La structure du dépôt est souvent semblable à la structure de la surface métallique à recouvrir (effet épistatiques). Les propriétés de la couche dépendent beaucoup de celles de la surface métallique qui doit être très propre et parfaitement polie.

II.6.2. Nature de l'électrolyte

L'utilisation de sels complexes donne des dépôts très cohérents et qui adhèrent bien au métal. L'expérience a montré que l'électrolyse de sels complexes donne des dépôts de meilleure qualité que ceux obtenus à partir des sels simples. Ainsi, le dépôt d'argent réalisé en électrolysant une solution d'un sel simple (par exemple, nitrate d'argent AgNO_3) est formé de longues aiguilles et est peu consistant alors qu'avec des solutions cyanurées, le dépôt est très compact et très adhérent. Les cristaux sont alors petits.

II.6.3. Concentration de l'électrolyte

En général, une augmentation de concentration conduit à une meilleure micro-cristallisation, tandis qu'une diminution de celle-ci donne des dépôts incohérents. En effet, si la concentration augmente, le nombre des ions devient plus grand, la vitesse de leur décharge croît et cela favorise le dépôt des grains fins. Par exemple, il est possible d'obtenir des dépôts compacts d'étain en utilisant des solutions très concentrées de chlorure stanneux, bien que ce métal donne en général des dépôts à

gros grains. Néanmoins, lorsque la concentration dépasse une limite déterminée, les germes ne peuvent grossir et le dépôt devient pulvérulent.

II.6.4. Conductibilité de l'électrolyte

L'addition d'électrolytes indifférents, c'est-à-dire qui ne prennent pas part au processus électrolytique mais permettant de diminuer la résistance de l'électrolyte, est souvent intéressante. La tension appliquée à la cellule peut être plus petite dans ce cas et, de ce fait, l'énergie consommée est plus faible.

II.6.5. Température

Deux effets opposés peuvent être prévus. Si la température du bain augmente, la vitesse de diffusion des ions et la conductibilité du bain croît aussi ; cela accélère le processus de micro-cristallisation. Cependant, dans le même temps, les surtensions diminuent et cela favorise la croissance des grains. En effet, la température augmente la mobilité latérale des atomes métalliques dans la couche de croissance et les atomes peuvent atteindre plus facilement les centres actifs de croissance, ils favorisent une croissance de petits cristaux.

II.6.6. Agitation de l'électrolyse

Au cours de l'électrolyse, la concentration de l'électrolyte au niveau de la cathode diminue. Il est nécessaire de maintenir une certaine agitation pour uniformiser les concentrations afin d'obtenir un dépôt continu et régulier. En outre, cela facilite la diffusion des ions et s'oppose à l'épuisement de la couche de diffusion.

II.6.7. pH du bain

Il joue également un rôle important. Dans des bains de nickelage, un pH trop grand donne un dépôt mat. Pour éviter ces inconvénients, les solutions d'électrolytes sont maintenues à un pH constant par addition d'une substance tampons. Cela permet d'éviter les modifications de qualité du dépôt qui résulteraient des variations de l'acidité.

II.6.8. La densité de courant

Si la densité de courant croît, un effet favorable peut être constaté au début : la vitesse de formation des germes augmente sans que la vitesse de croissance de ceux-ci soit modifiée.

En effet, par une accélération de l'électrolyse, il est possible d'obtenir une augmentation de la vitesse de diffusion des ions. Cependant, si la densité de courant devient trop grande, la croissance des cristaux est irrégulière. Au-delà d'un seuil, il se forme un dépôt pulvérulent qui ne tarde pas à se désagréger.

II.7. Propriétés des dépôts électrolytiques de Ni-P-acétate de cellulose

II.7.1. Propriétés et structure des dépôts

Ces caractéristiques dépendent de très nombreux paramètres, composition d'électrolyte, présence d'additifs spécifiques ou d'impuretés, conditions d'électrolyte (agitation, et parfois post traitement : Thermiques, usinages, autres dépôts.). La qualité et la stabilité d'un bain de dépôt chimique ne peuvent être obtenues que par un ajustage précis d'un certain nombre de paramètres [9].

II.7.2. Propriétés de Nickel

a. Les propriétés physiques

Le nickel est un métal de transition reconnaissable à son éclat blanc argenté et à sa dureté. Il cristallise selon un système cubique à faces centrées (CFC), ce qui lui confère une bonne aptitude à la déformation plastique, tant par laminage que par étirage. Il possède une excellente résistance à l'oxydation et à la corrosion, ce qui en fait un matériau de choix dans de nombreuses applications industrielles, notamment les alliages et les revêtements protecteurs. En plus de sa bonne conductivité thermique et électrique, le nickel est ferromagnétique jusqu'à environ 345 °C. Cinq isotopes stables du nickel sont naturellement présents dans l'environnement. Les principales constantes physiques de ce métal sont résumées dans le tableau suivant

Tableau II.1 : Caractéristiques physiques et mécaniques du Nickel [10].

Propriété	Valeur / Description
Aspect	Métal brillant, blanc argenté
Densité (à 20 °C)	8,90 g/cm ³
Point de fusion	1455 °C
Point d'ébullition	2913 °C
Dureté (échelle de Mohs)	Environ 4
Conductivité électrique	14,3 x 10 ⁶ S/m
Conductivité thermique	90,9 W/m-K
Propriétés magnétiques	Ferromagnétique à température ambiante
Malléabilité et ductilité	Facile à laminier et à étirer
Structure cristalline	Cubique à faces centrées (CFC)

b. Propriétés chimiques et électrochimiques

Le nickel présente le degré d'oxydation +II et exceptionnellement IV. Métal légèrement noble, il se ternit à l'air par formation d'oxyde NiO qui le passive, alors que l'eau pure est sans action sur lui.

Le potentiel standard du couple Ni/Ni⁺⁺ (-0,25 V/EHN) le rend plus noble que le fer (-0,44 V), juste au-dessus du cobalt (-0,28 V). Mais du fait de la forte irréversibilité de

La réaction $\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^-$

et une forte surtension de dégagement d'hydrogène sur le nickel (-1), le nickel ne se corrode pratiquement pas dans une très large étendue de pH (milieux Alcalin, neutre ou même légèrement acide) en absence d'oxydant et de complexant Sur le domaine pH 2 à pH 5, domaine de travail des électrolytes de nickelage et aux concentrations généralement utilisées, ces deux réactions se produisent quasiment simultanément (en théorie jusqu'à pH voisin de 4, le dégagement d'hydrogène se produit avant le dépôt de nickel).

Les acides sulfurique et chlorhydrique dilués ne corrodent que lentement le nickel au Contraire des acides phosphorique et nitrique où l'attaque est accentuée Toute fois la Passivation est aisée en phase anodique (solution non chlorurée) ou en présence de certains

Oxydants. Le nickel peut former de nombreux complexes, par ordre de stabilité croissante

Chlorurés, aminés, oxaliques, cyanurés.

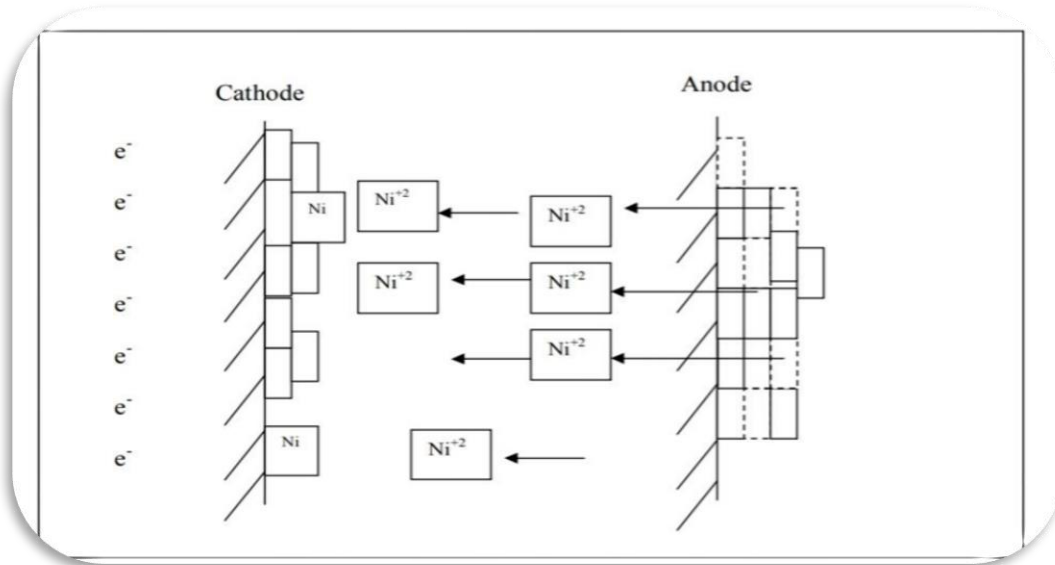


Figure II.2 : Le procédé de dépôt électrolytique (Nickel pur) [11]

II.7.3. Caractéristiques spécifiques de Phosphore

a. Propriétés physiques

Les propriétés physiques de phosphore sont regroupées dans (**le tableau II.3**)

Tableau II.2 : Propriétés physiques de phosphores [12].

Propriété	Valeur	Unité
Densité (phosphate de zinc)	2,7-3,0	G/cm ³
Température de fusion	>900	°C
Solubilité dans l'eau (faible)	0,001-0,01	G/100 ml à 25 °C
Couleur	Blanc à gris	
Dureté (selon le type)	Moyenne à élevée	
Conductivité thermique	Faible (isolant thermique)	W/m-K
Résistance à la corrosion	Bonne (en présence d'un liant organique)	
Adhérence sur substrat métallique	Bonne (surtout sur acier ou acier galvanisé)	

b. Propriétés Thermochimiques

Le Phosphore possède plusieurs formes allotropiques (blanc, rouge, noir), dont les propriétés physiques et chimiques varient selon la structure atomique.

- Le phosphore blanc est hautement réactif et s'enflamme spontanément au contact de l'air à des températures basses, comprises entre 34 et 44 °C.
- La chaleur spécifique de fusion du phosphore blanc est d'environ 44,1 kJ/mol.
- La chaleur spécifique de vaporisation est estimée à 12,4 kJ/mol.
- La température de sublimation du phosphore blanc est d'environ 280 °C.
- Le phosphore rouge, plus stable thermiquement, présente une température de fusion avoisinant 590 °C.
- L'enthalpie standard de formation du phosphore élémentaire (P) est nulle (0 kJ/mol), car il s'agit d'un élément pur dans son état standard.
- L'enthalpie standard de combustion du phosphore ($P \rightarrow P_2O_5$) est d'environ - 2984 kJ/mol, indiquant une réaction fortement exothermique.

Grâce à sa stabilité thermique et chimique, le phosphore rouge est particulièrement adapté pour des applications de revêtements protecteurs dans le domaine de la protection contre la corrosion.

Références

- [1] Technique de l'ingénieur (2022) Corrosion dans le secteur de la production de pétrole et de gaz / Disponible en ligne sur le site : <https://www.techniques-ingenieur.fr/...>
- [2] Fontana, M. G. (1986). Ingénierie de la corrosion (3^e éd.). McGraw-Hill.
(Traduit de: Corrosion Engineering)
- [3] Uhlig, H. H., & Revie, R. W. (2008). Corrosion et contrôle de la corrosion (4^e éd.). Wiley-Interscience.
(Traduit de : Corrosion and Corrosion Control)
- [4] Roberge, P. R. (2012). Manuel d'ingénierie de la corrosion (2^e éd.). Mc Graw-Hill.
- [5] Schlesinger, M., & Paunovic, M. (2010).
Modern Electroplating (5th ed.). John Wiley & Sons.
- [6] Zhao, W., Li, J., Jin, Y., & Chen, M. (2021). Preparation and corrosion resistance of superhydrophobic film by one-step électrodéposition. Matériels Research Express, 8(9), 096501.
- [7] Electro-deposited nanocomposite coatings and their behaviours against aqueous and high-temperature corrosion: A review - ScienceDirect
- [8] Paunovic, M., & Schlesinger, M. (2006).
Fundamentals of electrochemical deposition (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- [9] Y. Bade, Revêtement Métalliques per la voie Electrolytique Nickelage, technique de l'ingénieur, 4-1989, M 1610.
- [10] CRC Handbook of Chemistry and Physics, 103^e édition, CRC Press, 2022.
- [11] Disponible en ligne sur le site : https://www.researchgate.net/figure/Schema-electrique-de-lamplificateur-du-desequilibre-entre-les-LDR_fig1_2286479
- [12] Davis, J. R. (Ed.). (2000). Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance. ASM International.

CHAPITRE III :

PARTIE PRATIQUE

III.1. INTRODUCTION

Dans ce segment de recherche, nous examinerons deux sources de cellulose et décrirons leurs procédés d'extraction, à savoir la paille et le déchet de coton (TR) . Nous allons décrire en détail les produits, les matériels et les procédures expérimentales employés, ainsi que les techniques de caractérisation des échantillons réalisés. En ce qui concerne l'analyse de la paille, diverses méthodes seront utilisées, telles que (MEB/XRD/FTIR). En ce qui concerne le déchet de coton (TR), l'extraction se fera grâce à un mélange de trois acides : l'acide sulfurique, l'acide acétique et l'anhydride acétique

III.2. Différentes sources de celluloses utilisées

L'analyse a porté sur divers échantillons de fibres naturelles qui ont été fragmentés pour réduire la taille des particules, à savoir :

- ❖ La paille
- ❖ Le déchet de coton (TR)

III.3. Extraction de cellulose

L'obtention de cellulose à partir de la fibre naturelle se fait en trois phases majeures : les prétraitements, l'extraction et le blanchiment. En dernier lieu, le séchage et le stockage sont exécutés comme illustré à la figure (III.1).

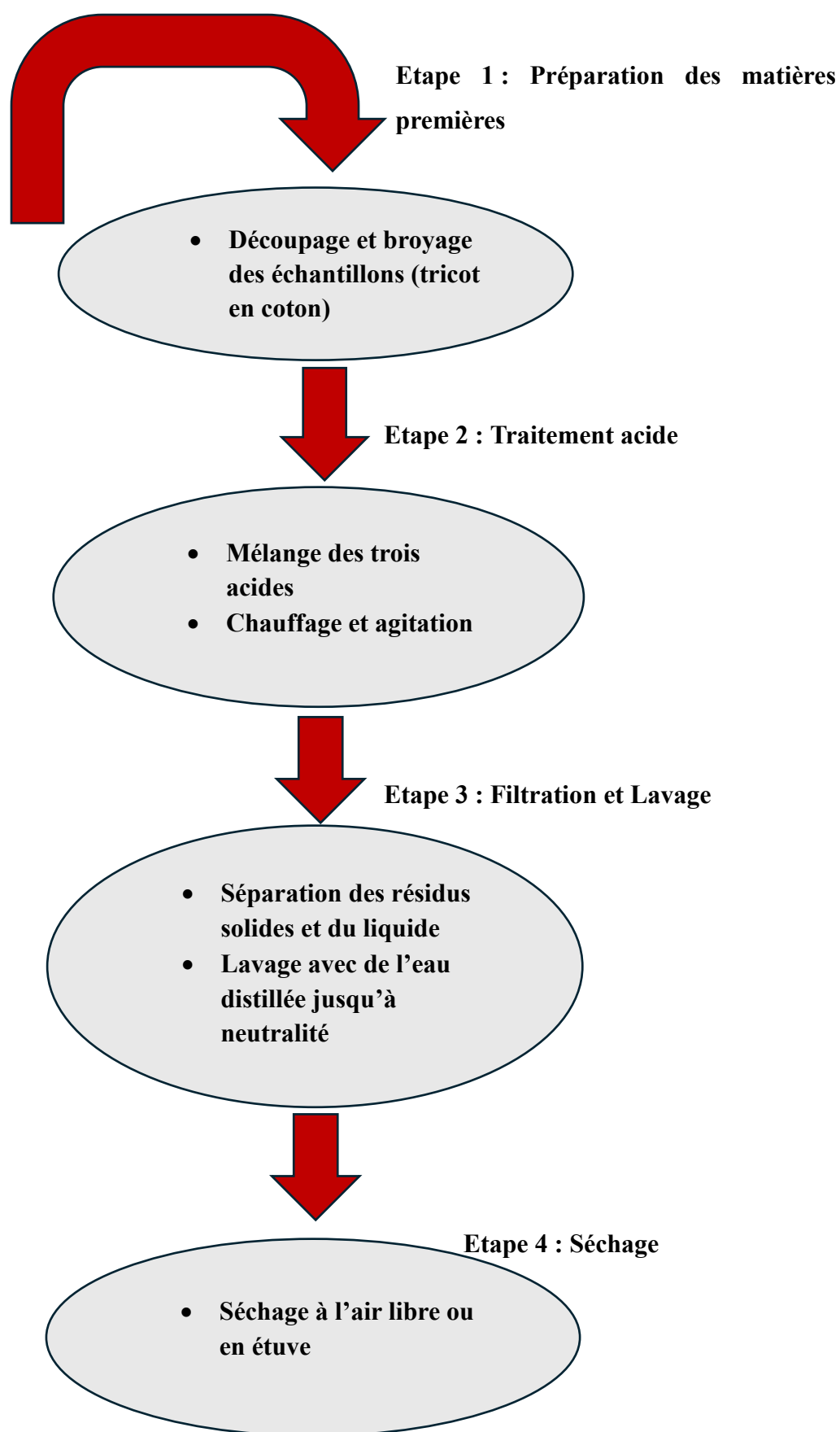


Figure III.1 : Organigramme d'extraction d'acétate de cellulose

III.3.1. Préparation des matières premières (prétraitements)

La première phase consiste à retirer toutes ces impuretés et/ou éléments étrangers afin de ne conserver que des fibres pures et exploitables :

Les biomasses ont été épurées à l'aide d'eau distillée, séchées dans un four à 60 °C pendant une durée de 24 heures, puis finement broyées et passées au crible à travers un tamis de $D = 1 \text{ mm}$



Figure III.2 : Prétraitements des fibres naturelles

III.3.2. Elimination de la Cire

En recourant à des solvants organiques tels que l'acétone et l'éthanol pour la dissolution et l'élimination des cires présentes dans les fibres.

Pour se débarrasser de la graisse (**Figure III.3**). Suivre le protocole ci-dessous :

- 1) Un mélange de 200 ml d'acétone et de 200 ml d'éthanol a été réalisé dans un bécher.
- 2) Incorporez-y 10 g de matière première traitée.
- 3) Réchauffez le mélange à 60 °C en utilisant un appareil de reflux pendant quatre heures tout en maintenant une agitation constante.
- 4) Le solide est par la suite isolé par filtration et rincé plusieurs fois avec de l'eau distillée.

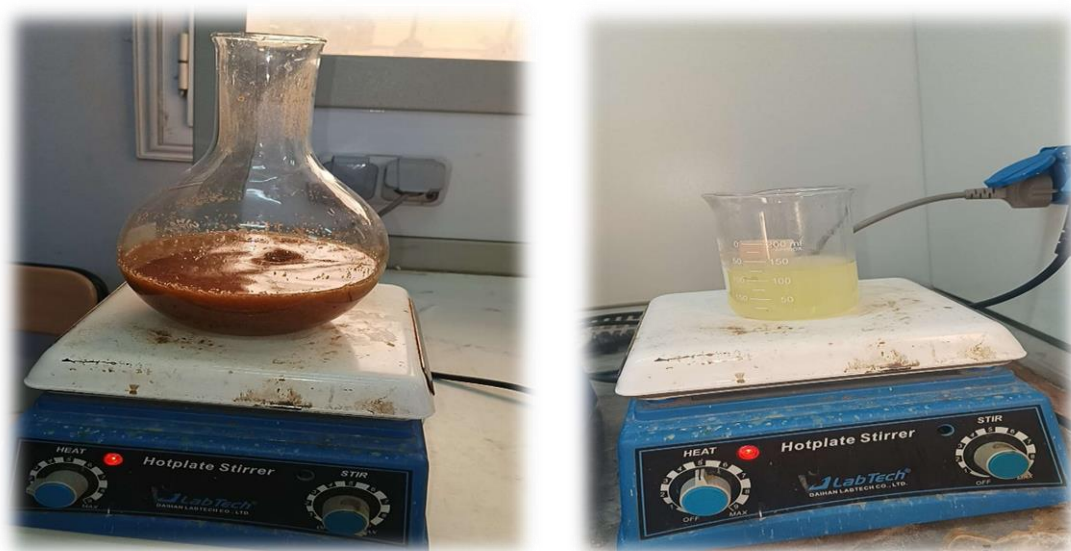


Figure III.3 : Elimination de la Cire.

III.3.2.1. Elimination de la lignine et de l'hémicellulose

L'extraction de la cellulose nécessite l'élimination préalable de la lignine et de l'hémicellulose. On élimine ces éléments afin d'obtenir une cellulose pure.

L'élimination est représentée dans (la **Figure III.4.**)

- Prenez 5 g du résidu de fibre traité et incorporez-y 150 ml d'hydroxyde de sodium à une concentration de 3,6%. Le mélange est porté à une température de 60 °C grâce à un dispositif de reflux pendant quatre heures tout en maintenant une agitation constante. À la suite de cela, l'échantillon est filtré et rincé plusieurs fois avec de l'eau distillée.

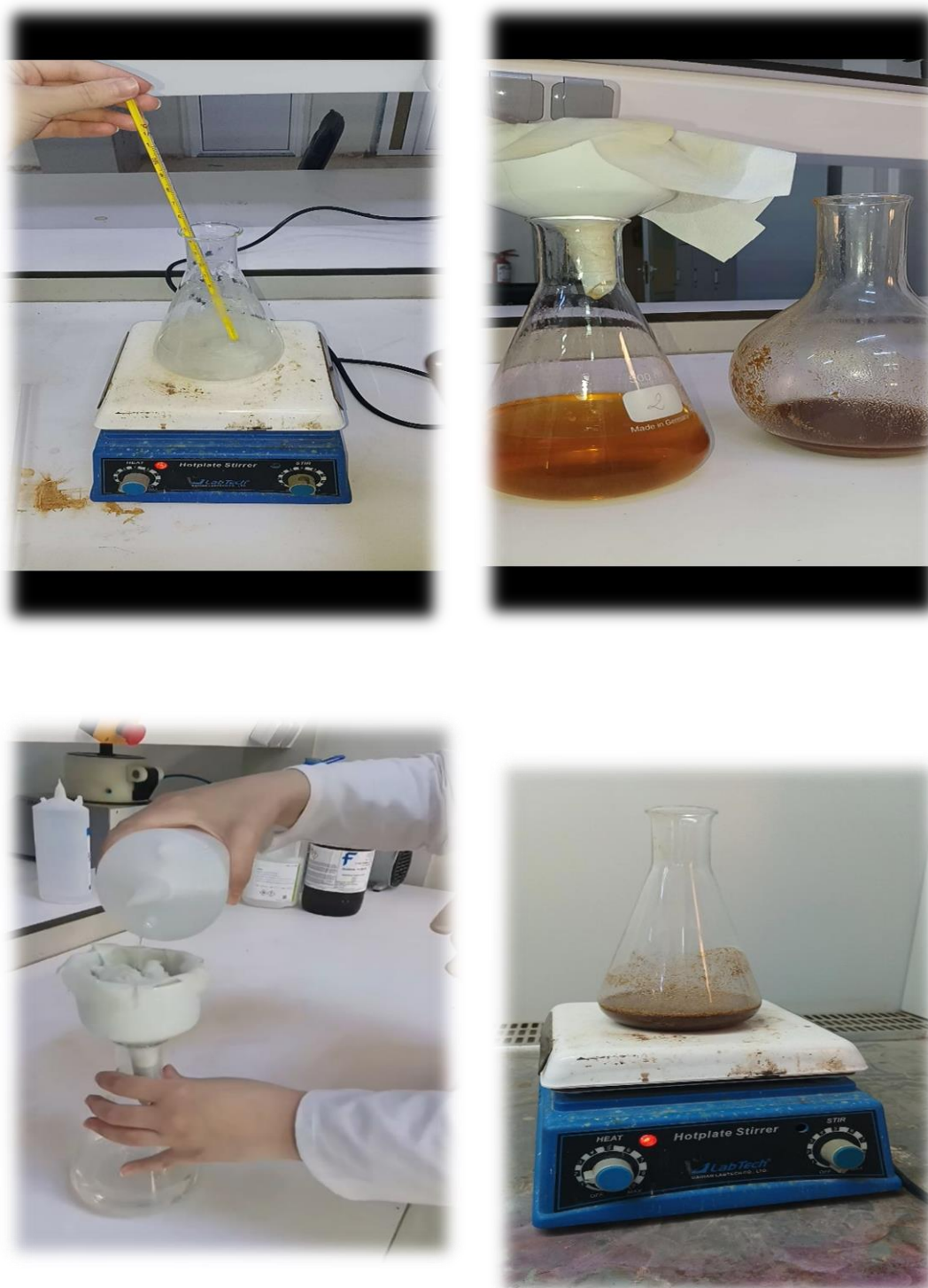


Figure III.4 : Méthode d'extraction de Cellulose.

III.3.2.2. Processus de Blanchiment

Le processus de blanchissement de la cellulose représente une phase essentielle dans la fabrication de cellulose de qualité supérieure, spécialement pour les utilisations demandant une pureté et une blancheur élevées. L'objectif du blanchiment

est de supprimer les restes de lignine et d'autres impuretés responsables de la teinte brune de la cellulose.

L'illustration détaillée des étapes du processus de blanchiment (**Figure III.5**), compris les produits chimiques fréquemment employés :

- Versez 5 g de l'échantillon préalablement préparé dans un bécher d'une capacité de 250 ml.
- Incorporez 100 ml d'eau oxygénée et 100 ml d'acide acétique, puis portez le mélange à ébullition à 90 °C en utilisant un réacteur à reflux, pendant une durée de quatre heures tout en maintenant une agitation constante.
- Nettoyez le produit avec de l'eau distillée pour retirer l'eau oxygénée et l'acide acétique afin d'obtenir une cellulose blanche.



Figure III.5 : Processus de Blanchiment.**III.3.2.3. Séchage et Stockage**

Chaque résidu après le processus de blanchiment a été séché dans une étuve à 60 °C pendant une durée de 24 heures. À la suite du procédé, la pâte de cellulose se transforme en une substance semblable à du coton et devient plus blanche (Figure III.6). Préparé pour la caractérisation à l'aide de diverses techniques d'analyse. Finalement, on la garde dans le dessiccateur pour la protéger de l'humidité.



Figure III.6 : La cellulose obtenue à partir deux sources : Cellulose 1 (la paille) / Cellulose 2 (déchet de coton (TR)).

On pèse cette pâte afin d'évaluer le rendement de l'extraction selon la méthode décrite ci-après :

III.3.2.4. Calcul le rendement de cellulose extraite

Le rendement calculé illustre la performance totale de toutes les phases d'extraction, du découpage des fibres jusqu'à leur séchage et entreposage. Il faut noter que la masse brute a toujours été considérée comme étant celle des fibres découpées utilisées depuis le début. Voici comment se présente le rendement r :

Calculez le taux de rendement à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{Rendement (\%)} : \frac{\text{masse de cellulose (g)}}{\text{masse des échantillons (g)}} \times 100 \text{ (III.1)}$$

III.4. Techniques de caractérisation physico-chimiques de la cellulose

Cette section se focalise sur la méthode de caractérisation physico-chimique et mécanique employée dans le cadre de cette étude, accompagnée d'une description minutieuse afin de favoriser l'interprétation des résultats.

III.4.1. Techniques de caractérisation physico-chimiques

III.4.1.1. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

Cette méthode nous offre un accès direct à l'information moléculaire, à la nature chimique ainsi qu'à la structure conformationnelle et structurale des matériaux examinés. En raison du rayonnement infrarouge, les molécules de l'échantillon examiné vont connaître des modifications de leur état vibratoire, à des fréquences de vibration spécifiques à chaque groupement moléculaire.

Le spectre FTIR est capturé dans l'intervalle de 4000 à 400 cm⁻¹. Les gammes d'absorption dans ce spectre offrent des renseignements sur les diverses vibrations des liaisons chimiques qui existent dans la cellulose [1].

1. Analyse quantitative des fibres de cellulose

▪ Détermination du taux d'humidité

Un échantillon de 2 g (m₀) est placé dans une étuve à 105 °C et pesé toutes les trois heures, après avoir été laissé à refroidir dans un dessiccateur. Le processus est réitéré jusqu'à ce que le poids atteigne une stabilité (m₁) [1].

L'équation suivante est utilisée pour déterminer le taux d'humidité.

$$\text{Th}\% = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100 \text{ (III.2)}$$

▪ Détermination du taux de matière sèche

Le taux de matière sèche (MS) est déterminé en se basant sur la mesure du niveau d'humidité, selon l'équation suivante [1] :

$$\text{MS}\% = 100 - (\text{Th}\%) \text{ (III.3)}$$

III.4.1.2. Diffraction des rayons X (DRX)

L'analyse par diffraction des rayons X offre la possibilité de définir la structure cristalline des composés organiques ou minéraux. Quand un faisceau de photons X entre en interaction avec un échantillon cristallin, une portion du rayonnement est diffractée à des angles θ i précisément déterminés, dont les valeurs sont directement

liées aux intervalles entre les plans atomiques ou moléculaires. La structure des échantillons est représentée par les distributions radiales et angulaires de leurs réflexions ainsi que par les intensités correspondantes.

Le dispositif employé est un Bruker D8 Advance. Cet équipement dispose d'un tube à anticathode en cuivre qui produit une onde lumineuse ($K\alpha$). L'angle 2θ varie de 10 à 90° avec un incrément de 0.01/s [1].

▪ Calcul du degré de cristallinité

Il est possible de déterminer le taux de cristallinité (Cr) à partir des données DRX en employant différentes techniques, parmi lesquelles la méthode de Segal figure parmi les plus répandues :

$$\text{Cr (\%)} = \frac{I_{002} - I_{am}}{I_{002}} \times 100 \text{ (III.4)}$$

- **I002** : Intensité maximale du pic de diffraction de la cellulose cristalline (généralement autour de $2\theta = 22-23^\circ$ pour la cellulose I).
- **I_{am}** : Intensité minimale entre les pics amorphe et cristallin (généralement autour de $2\theta = 18-20^\circ$) [2].
- **Détermination de la taille cristallites** :
On peut évaluer la dimension des cristallites (D) en se basant sur la méthode de Scherrer.

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \text{ (III.5)}$$

K : Facteur de forme (généralement pris comme 0.9).

λ : Longueur d'onde des rayons X.

β : largeur à mi-hauteur du pic de diffraction (en radians) [3].

III.4.1.3. Caractérisation morphologique par microscopie électronique à balayage (MEB)

Un Microscope Électronique à Balayage a été utilisé pour effectuer les caractérisations morphologiques de divers mélanges ainsi que des surfaces des fibres.

On réalise des images MEB à différentes échelles pour examiner les détails de la surface de la cellulose.



Figure III.7 : Microscope électronique à Balayage

III.5. Définition de partie 2

Dans cette étude, nous avons mis au point des dépôts composites Ni-P-biopolymère par électrodéposition continue, en ajustant l'intensité du courant électrique pour examiner son impact sur les caractéristiques du dépôt. L'un des éléments fondamentaux de notre activité est l'exploitation de la cellulose, un biopolymère naturel, pléthorique, biodégradable et inoffensif, qui occupe une place centrale dans l'élaboration de revêtements composites destinés à la défense contre la corrosion. Intégrée dans le processus d'électrodéposition sous sa forme pure ou altérée (telle que la carboxyméthylcellulose), la cellulose joue le rôle de matrice polymérique assurant l'uniformité du dépôt et l'intégration efficace des particules actives. Par sa structure hydrophile et sa faculté de créer des couches denses et adhérentes, elle favorise l'accroissement de l'adhérence du revêtement au support métallique et joue le rôle de barrière physique face aux éléments corrosifs, aidant ainsi à améliorer la résistance à la corrosion tout en étant compatible avec une démarche écologique. Ce travail inclut aussi la présentation des phases de préparation, des conditions d'expérimentation et des méthodes de caractérisation employées, comme la microscopie électronique à balayage (MEB), la diffraction des rayons X (DRX) et l'analyse électrochimique.

III.6. Description de montage expérimental

III.6.1. Matériaux

III.6.1.1. Substrat utilisé (métal de base)

Dans notre recherche, le substrat employé en tant que cathode est formé de petits échantillons rectangulaires de cuivre qui ont été utilisés comme support pour l'application des revêtements Ni-P-biopolymère

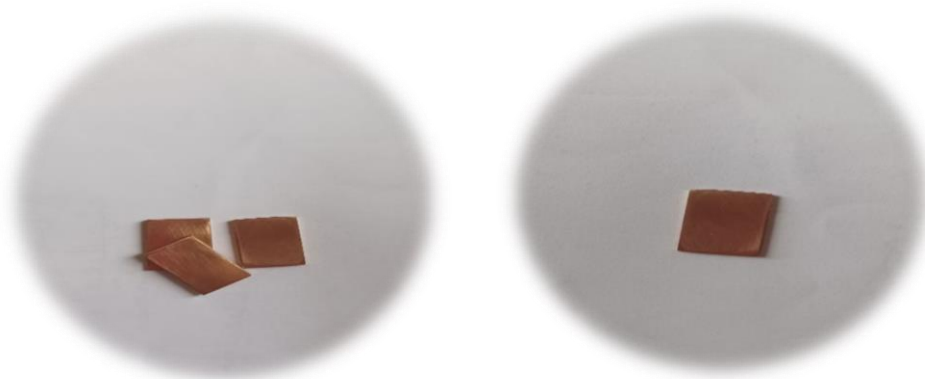


Figure III.8 : Plaques d'échantillons en cuivre

III.6.1.2. Les principales caractéristiques de Cuivre

Le tableau suivant présente les principales caractéristiques de cuivre :

Tableau III.1 : Différentes propriétés du Cuivre [4]

Numéro atomique	29
Masse atomique	63,54
Isotopes stables	63 et 65
Radio-isotopes	52 à 62, 64 à 80
Densité	8,9 g/cm ³
Température de fusion	1083,0 °c
Température d'ébullition	2570°C
Structure électronique	1s ² ,2s ² p ⁶ ,3s ² p ⁶ d ¹⁰ ,4s
Valence	1 ou 2
Premier potentiel d'ionisation	7,72 Ev
Deuxième potentiel d'ionisation	20,2 eV
Potentiels électrochimiques	
Cu/Cu ⁺⁸	0,552 V
Cu/Cu ²⁺	0,345 V
Résistivité électrique	1,73×10 ⁻⁸ Ω.m
Conductivité thermique	De 400 à 412 W.m ⁻¹ . K ⁻¹

III.6.1.3. Anode utilisé (plaque de Nickel)

Nous avons utilisé comme anode deux pièces de Nickel rectangulaire pour garantir l'enrichissement des bains électrolytiques par des ions de Nickel.

III.6.2. Les produits chimiques

Le tableau suivant présente quelques produits chimiques couramment utilisés :

Tableau III.2 : Les produits chimiques

Les produits	Leur composition chimique
Sulfate de nickel hydraté	$\text{Ni SO}_4, 6 \text{ H}_2\text{O}$
Citrate de sodium	$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$
Chlorure d'ammonium	$\text{NH}_4 \text{ Cl}$
Hypophosphite de sodium hydraté	$\text{NaPO}_2\text{H}_2 \text{ H}_2\text{O}$
Nickel chlorier	Ni Cl_2
Chlorure de sodium	Na Cl
Acétate de cellulose	$\text{C}_6\text{H}_7\text{O}_2(\text{OAc})_3_n$
Acide chlorhydrique	HCl
Carbonate de sodium	$\text{Na}_2 \text{ CO}_3$
Hydroxyde de sodium	Na OH

III.7. Les étapes de travail

III.7.1. Préparation des substrats

L'étape de préparation des surfaces est cruciale, elle sert à préparer la couche externe du matériau solide avant toute procédure d'application. L'objectif principal de cette étape est d'éliminer toutes les impuretés ou corps étrangers, qu'ils soient sous forme solide ou liquide, qui pourraient être présents sur la surface. Elle vise également à dissoudre ou détacher les composés chimiques existants (tels que les couches d'oxydes ou autres composés métalliques).

Par conséquent, les substrats reçoivent un traitement de surface avant toute opération d'application.

III.7.1.1. Polissages mécaniques

L'objectif de cette procédure est d'obtenir une surface lustrée et brillante, en utilisant des mouvements relatifs et une pression appliquée entre la pièce et l'instrument. Le polissage du cuivre a été effectué à l'aide d'une polisseuse tournante

et de papier abrasif, en employant des disques de diverses granulations (120, 240, 400, 600, 800, 2000). Dans le but d'ôter les irrégularités, les aspérités et toutes sortes d'impuretés. Après chaque phase, l'électrode est nettoyée soit à l'aide d'acétone, soit avec de l'eau distillée.

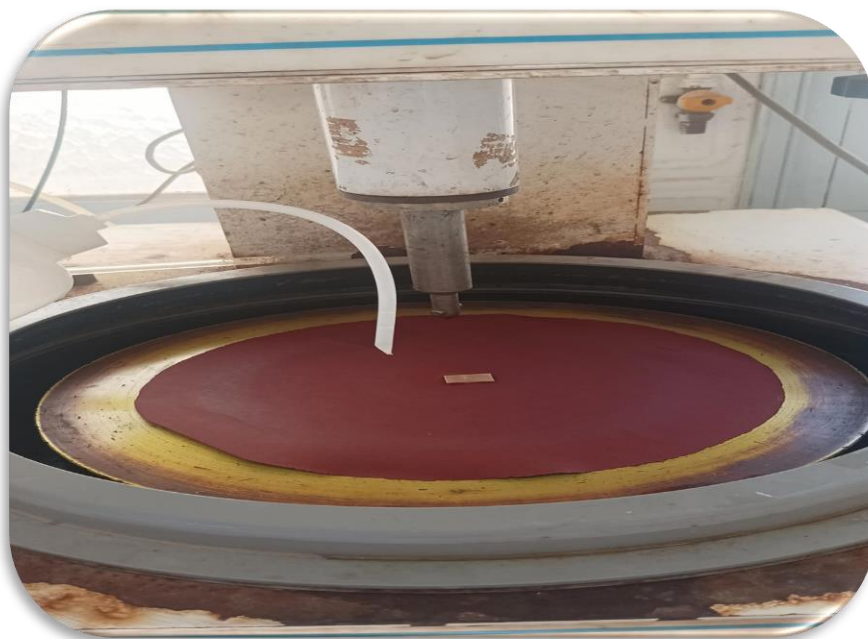


Figure III.9 : L'opération du polissage avec du papier abrasif

III.7.1.2. Dégraissage électrolytique

À la suite du processus de polissage mécanique, nous avons employé l'électrolyse d'une solution alcaline comprenant un mélange de carbonate de sodium (Na_2CO_3) et d'hydroxyde de sodium (NaOH) pour les opérations de dégraissage. Le **tableau (III.4)** présente la composition du bain de dégraissage. La procédure se déroule pendant 3 minutes avec une densité de courant approximative de 0.03 A/dm^2 et à une température avoisinant les 35°C , tout en étant agité grâce à un barreau magnétique. On laisse le courant circuler pendant 2 à 3 minutes, l'hydrogène qui se libère au niveau de la pièce facilite le détachement des molécules grasses.

La composition chimique du bain de dégraissage, essentielle pour assurer un nettoyage efficace des surfaces métalliques, est détaillée dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.3 : Composition chimique du bain de dégraissage

Composants		Formule chimique	Concentration	Le rôle
Hydroxyde de sodium		Na OH	03 (g/l)	Décomposer l'ensemble des graisses saponifiables à chaud
Carbonate de sodium		Na_2CO_3	10 (g/l)	Abaissier la tension interracciale de la pièce, assurer son mouillage et faciliter le découlement des salissures (tensioactif)

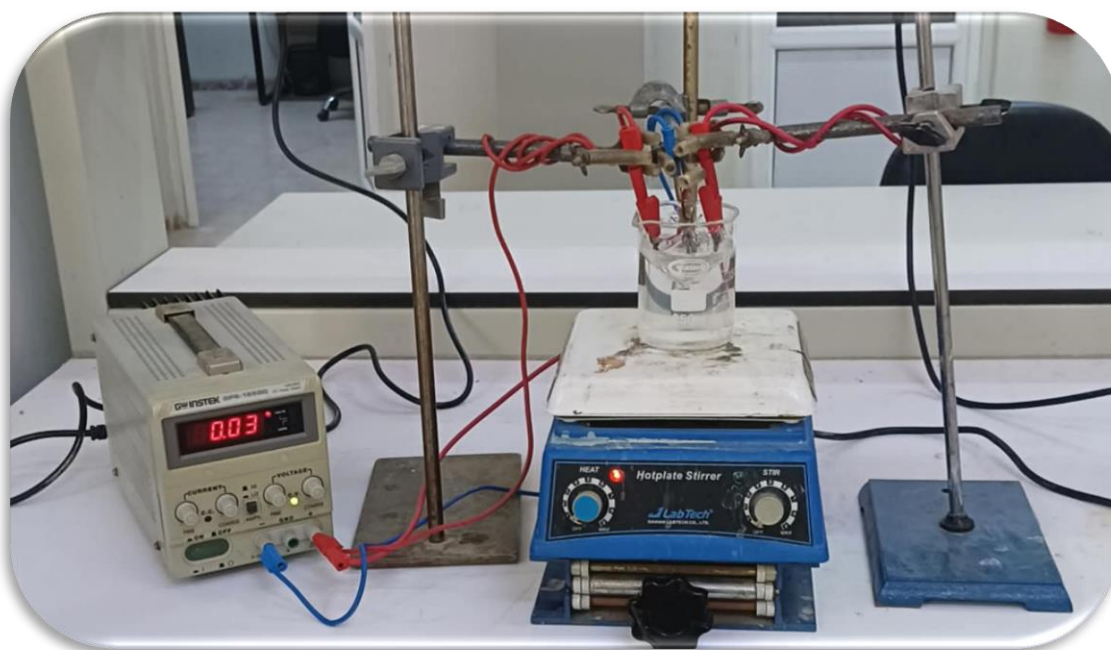


Figure III.10 : Schéma de montage de dégraissage électrolytique

III.7.1.3. Décapage chimique

Il s'agit d'une procédure conçue pour supprimer les couches d'oxyde qui recouvrent une surface métallique. Ces dernières n'offrent pas une bonne adhérence au métal à couvrir, ce qui exige leur totale suppression par un décapage chimique avant d'entamer le processus de galvanisation. L'acide chlorhydrique (10% en volume), préparé à partir d'un acide chlorhydrique plus concentré, a été utilisé pour effectuer le décapage chimique.

Les échantillons ont été entièrement plongés dans la solution acide pour une durée de 2 minutes à température ambiante [5].



Figure III.11 : Schéma de décapage chimique.

III.7.1.4. Rinçage

À la suite de l'exécution d'un décapage chimique sur des échantillons, nous les avons rincés sans délai dans de l'eau distillée, de l'acétone et enfin dans la solution de notre bain.

Après avoir achevé la préparation des surfaces des pièces, nous appliquons leur revêtement anticorrosif en Nickel.

III.7.2. Réalisation des dépôts

III.7.2.1. L'électrodéposition Ni-P-acétate de cellulose

Dans le but de confectionner des alliages anti-corrosion, nous employons des échantillons rectangulaires de cuivre comme cathode, tandis que deux plaques de nickel de forme rectangulaire sont utilisées comme anode. Ces électrodes sont

immergées dans une solution d'électrolyse accompagnée d'un thermomètre et d'un pH-mètre. Cette solution contient des sels métalliques de l'alliage à déposer (**voir Tableau III.5**).

Le bain est soumis à une agitation magnétique tout au long de toutes les opérations d'électrodéposition. Le dépôt est réalisé par la réduction des cations métalliques présentes en solution. Les éléments du montage expérimental sont représentés sur l'illustration (**III.12**).

Cela implique l'application de diverses densités de courant (de 1 à 7 A/dm²) entre la cathode et l'anode. Et à une température approximative de (70-75) °C, avec un pH avoisinant les 3.

Pour établir les courants à appliquer, on se réfère à la formule ci-après :

$$J = \frac{I}{S} \dots \dots \dots \text{(Équation III.1)}$$

➤ Alors :

$$I = J \times S \dots \dots \dots \text{(Équation III.2)}$$

8

Avec :

J : densités de courant [A/dm²].

I : le courant [A].

S : la surface de l'échantillon [dm²].

❖ Chaque dépôt est réalisé via l'électrodéposition pendant une durée d'une heure.



Figure III.12 : Dispositif expérimental de l'électrodéposition Ni-P-acétate de cellulose

III.7.2.2. Bain d'électrodéposition

Le bain électrolytique employé est un mélange d'espèces solubles du métal à déposer, qui est remué par un agitateur magnétique. Sa composition est spécifiée dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.4 : Composition du bain électrolytique.

Les produits	Leur composition chimique	Masse (g)
Nickel chlorier	Ni Cl_2	01
Sulfate de nickel hydraté	$\text{Ni SO}_4, 6\text{H}_2\text{O}$	5,6
Hypophosphite de sodium hydraté	$\text{NaPO}_2\text{H}_2\text{H}_2\text{O}_2$	3,1
Citrate de sodium	$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$	4,52
Chlorure d'ammonium	NH_4Cl	01
Chlorure de sodium	NaCl	5,7

Acétate de cellulose	$C_6H_7O_2(OAc)_3_n$	02
----------------------	----------------------	----

III.8. Variation des paramètres d'élaboration

L'électrodéposition des alliages Ni-P-acétate de cellulose en continu a été réalisée en modulant les densités de courant entre 1 et 7 A/dm².

La discussion sur l'impact de la modification du paramètre d'élaboration sur les propriétés des dépôts sera ensuite basée sur les analyses morphologiques, microstructurales, etc.

III.9. Techniques de caractérisation

III.9.1. Analyse microstructurale

Les paramètres de fabrication, comme la densité du courant appliqué, ont un impact sur la microstructure des alliages. Afin d'examiner l'impact de ce paramètre sur la microstructure, les divers dépôts réalisés par le biais de l'électrodéposition sont caractérisés en utilisant diverses techniques comme la diffraction des rayons X (DRX), la Microscopie Électronique à Balayage (MEB) et/ou la microscopie optique. Certaines études ont été réalisées sur des alliages spécifiques. Nous présentons ici un résumé de la définition de chacune de ces méthodes [6].

III.9.2. Diffraction des rayons X (DRX) [7,8]

Une fois élaborés, les échantillons sont analysés par diffraction des rayons X. Cette méthode facilite l'identification des phases cristallines présentes dans la substance et la détermination de leurs propriétés cristallographiques.

La méthode de caractérisation par diffraction des rayons X (DRX) est désormais largement reconnue et couramment utilisée. Cette technique est généralement appliquée à deux types d'échantillons : les monocristaux et les échantillons en poudre polycristallins.



Figure 13 : Rayons X de type « Bruker-AXS-D8 »

III.9.4. Analyse Électrochimie

Les études électrochimiques ont une importance capitale dans l'appréciation des performances des dépôts composites électrolytiques. Ces méthodes facilitent la caractérisation des propriétés électrochimiques des dépôts, en particulier leur résistance à la corrosion, leur stabilité et leur adhésion au substrat métallique. Deux des techniques fréquemment employées sont la voltamétrie cyclique (VC), qui permet d'observer les réactions d'oxydation et de réduction sur la surface des dépôts, et la polarisation linéaire (PL), qui fournit une approximation de la résistance à la corrosion par le biais du calcul de la Résistance de Polarisation (R_p).



Figure.III.14 : CORRTEST Potentiostat / Galvanostat

III.9.5. Caractérisation morphologique par microscopie électronique à Balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage (MEB) constitue un outil puissant pour analyser les propriétés morphologiques des dépôts composites. Elle offre la possibilité d'obtenir des images de haute définition de la surface des dépôts, mettant en lumière leur structure, leur répartition de particules et les éventuels défauts observés.



Figure III.15 : Microscope électronique à Balayage

Références

- [1] K. Borchani, « développement d'un composite à base d'un polymère biodégradable et des fibres extraites de la plante d'Alfa », Thèse de doctorat Ecole Nationale d'ingénieurs de SFAX, Tunisie, 130 P, 2018.
- [2] O. Djebbari ; « Influence des éléments mineurs et majeurs sur la réactivité du Clinker », Mémoire de Master université Mohamed khaidr Biskra, Algérie (2020).
- [3] Brown, R.M; Jr. (1996, The biosynthesis of cellulose, Macromol, Pure and Applied chemistry, A33: 1345-1373.
- [4] Jeans – Louis VINGES : Professeur d'université à l'L.U.F.M. de Créteil, chercheur au centre d'études de chimie métallurgique, (C.N.R.S).
- [5] L. Ghelani. « Tenue à la corrosion des revêtements de Nickel et de ses composites Ni/Sic électrodéposés sur le substrat en acier ». Thèse de Doctorat ; université Mostefa Ben Boulaid-Batna 2, (2018).
- [6] F. Lekmine. « Etude de l'efficacité inhibitrice des composés cycliques soufrés dans des milieux acides sur des dépôts composites élaborés par voie électrolytique », Thèse de Doctorat ; université Mohamed khaidr-Biskra, (2021).
- [7] N, Bouchaala. « Etude des propriétés structurale et physico-chimique des systèmes Nd-Fe-Co », Thèse de Doctorat ; université de Sfax Tunisie, (2017).
- [8] Joannie Martin. « Développement d'une méthode d'analyse quantitative du quartz dans différents matériaux par diffraction des rayons X associée à la méthode RIETVELD », Mémoire de Magister ; Université du Québec à Montréal, (2012).

CHAPITRE IV :

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

IV.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous présentons les résultats expérimentaux qui est divisé en deux parties :

- Partie 1 relatif à l'extraction de notre bio polymère qui est l'acétate de cellulose
- Partie 2 relatif à l'effet de variation de concentration de bio polymère et de l'oxyde d'alumine sur des revêtements à base de Nickel – Phosphore élaborés par voie électrochimique sur des substrats en cuivre afin d'étudier leur effet sur la protection des métaux contre la corrosion.

Dans cette étude nous avons étudiés la structure, la morphologie, les phases cristallines. Par les techniques d'analyses suivantes : La diffraction des rayons X, FTIR et microscopie électronique à balayage, EDS. Et nous avons étudiés le comportement électrochimique des dépôts élaborés par voltampérométrie (Courbes de polarisation)

IV.2. Caractérisation de bio polymère

IV.2.1. Rendement d'acétate de cellulose extraite

Pour les extraits de chaque étape, nous avons observé un changement de couleur, ce changement montre l'efficacité des traitements pour purifier la cellulose et d'éliminer la lignine et l'hémicellulose.

Le rendement de d'acétate de cellulose **obtenue** à partir de différentes source est calculé à partir de la relation notée précédemment.

Le rendement de là l'acétate de cellulose extraite à partir du déchet de coton est de **71.47%**. Celui obtenu à partir de la paille est de 39.80 %. Ainsi, nous avons choisi la source offrant le rendement le plus élevé, à savoir le déchet de coton.

Pour expliquer ces différences de rendement, on note qu'une proportion également été éliminée lors de l'étape de déprotéinisations, en raison de la formation d'un système Triphasique (phase lipidique/ phase aqueuse/phase insoluble dans l'eau) dans ces conditions d'extraction. Ces estimations sont en bon accord avec des données de la littérature sur l'extraction de la cellulose

❖ Déterminer du taux d'humidité :

Le taux d'humidité est obtenu à partir de l'équation III.2.

Le taux d'humidité de la cellulose extraite à partir du déchet de coton a été déterminé à **28.52%**.

- Le taux d'humidité peut affecter les propriétés physico-chimiques de la cellulose

Ceci a été confirmé par les résultats d'application de cellulose extraite.

❖ Détermination du taux de matières sèche :

A partir de la quantification du taux d'humidité, le taux de la matière sèche (MS) est calculé à partir de l'équation III.3.

Le taux de la matière sèche de la cellulose extraite à partir du déchet de coton est de **71.48%**.

- Le taux de matières sèches de la cellulose est le complément du taux d'humidité. Représente la proportion de la masse de l'échantillon qui est constitué de matière sèche.

IV. 3.2. Caractérisation par spectroscopie infrarouge (FTIR)

L'analyse par spectroscopie infrarouge est très importante pour savoir le groupement fonctionnel existant dans les échantillons étudiés. La figure IV.1 présente le spectre infrarouge de notre bio polymère qui est l'acétate de cellulose.

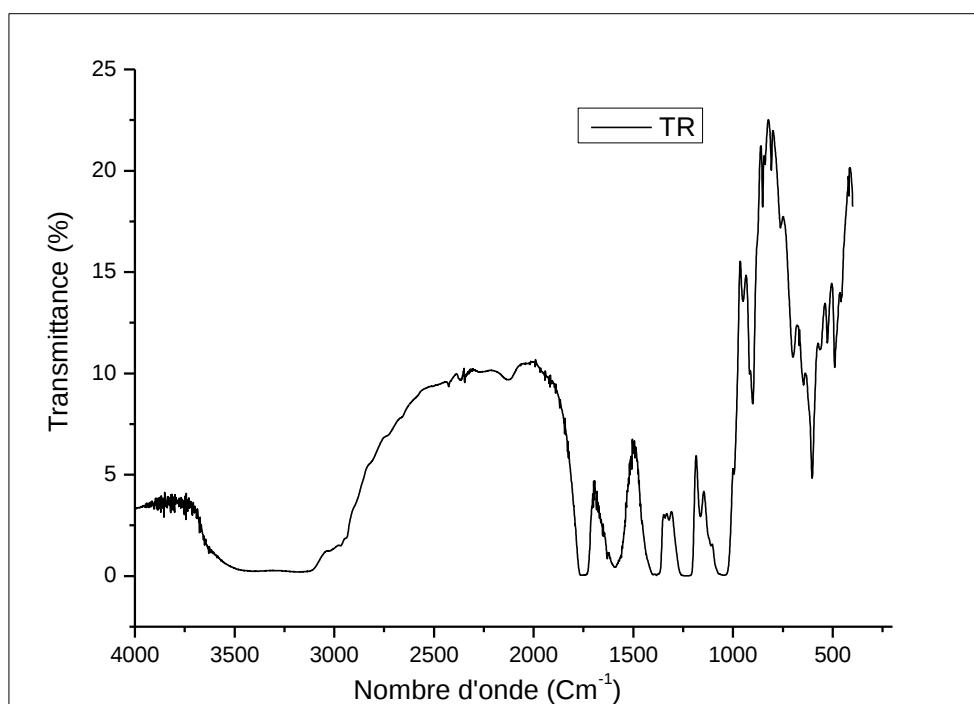


Figure IV.1 : Spectre infrarouge de l'acétate de cellulose

A partir de spectre infrarouge de coton on peut observer que :

- **Une large bande d'absorption autour de 3300-3500 cm⁻¹**

Il s'agit d'une bande très forte et large attribuée aux vibrations d'élongation O-H des groupes hydroxyles de l'acétate de cellulose [1]

De cellulose une densité élevée de groupes hydroxyles, qui s'engagent dans une liaison hydrogène intermoléculaire et intramoléculaire étendue. Cette liaison hydrogène est à l'origine de la largeur du pic.

- **Une bande autour 2900cm⁻¹**

Cette bande correspondent aux vibrations d'élongation C-H (asymétrique) des groupes CH₂ et CH des unités de glucose de la cellulose [2]

- **Une bande autour 1640 cm⁻¹**

Cette bande est souvent associée à la vibration de flexion O-H de l'eau adsorbée dans la structure de cellulose. Le coton est hygroscopique et absorbe l'humidité [3]

- **Une bande autour 1420 cm⁻¹**

Cette bande correspondent aux déformation CH₂ des groupes méthylène dans la chaîne de cellulose [4]

- **Une bande autour 1370 cm⁻¹**

Cette bande correspondent aux déformation symétrique CH₃ ou CH₂ présente dans les chaînes latérales glycosuriques [5]

- **Environ 1160-1050 Cm⁻¹**

Une bande de vibration d'élongation asymétrique du pont glycosidique (C-O-C) de la cellulose et des hémicelluloses [6]

- **Une bande vers 900 Cm⁻¹**

Cette bande est caractéristique de la vibration d'élongation des liaisons β -glycosidiques de la cellulose et est souvent associée aux régions amorphes de la cellulose [7]

IV.4. Caractérisations par diffraction des rayons X

L'acétate de cellulose est principalement amorphe, surtout à des degrés de substitution élevés. Dans ce cas :

- Le spectre DRX montre une large bande diffuse (souvent autour de $2\theta \approx 15-25^\circ$)
- Aucun pic net de diffraction n'est observé, sauf des pics de diffraction discrets, superposés à la bande amorphe.
- Typiquement, des pics faibles peuvent apparaître vers $2\theta \approx 10^\circ, 17^\circ, 23^\circ$ et 24° (valeurs indicatives qui peuvent légèrement varier selon l'équipement et la préparation de l'échantillon) [8]

- Cela indique la présence de domaines cristallins, en général petits et désordonnés.

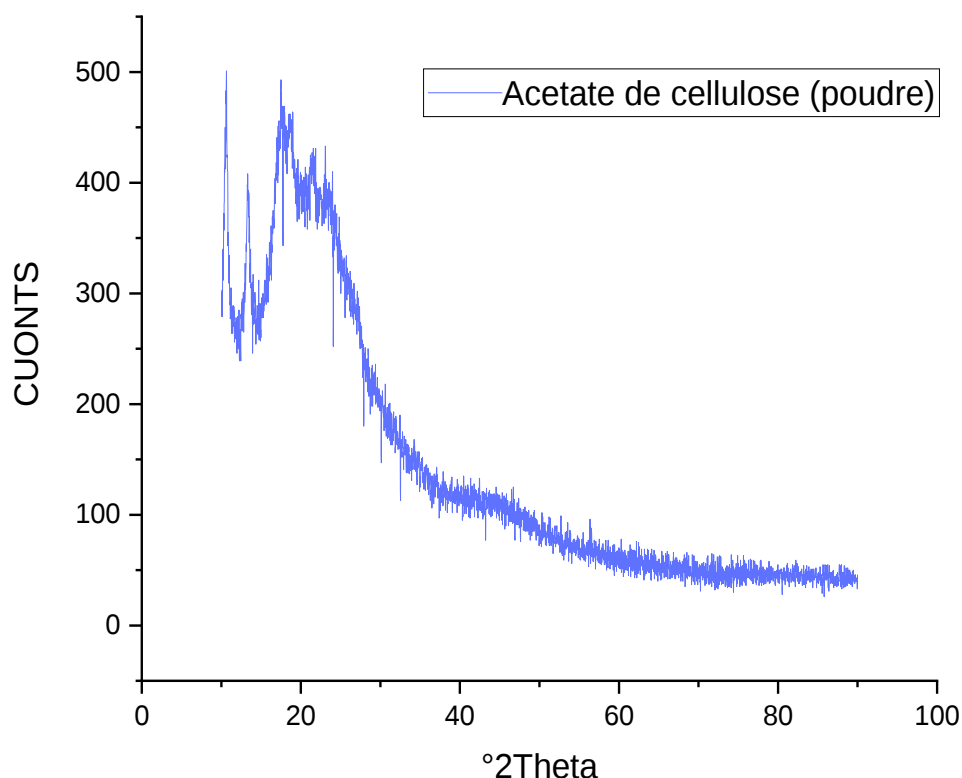


Figure IV.2 : Spectre DRX de l'acétate de cellulose en poudre

IV.5. Caractérisation par Microscopie électronique à balayage (MEB)

L'analyse de la morphologie et l'analyse chimique de bio polymère extrait à partir d'un tricot en coton a été réalisée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (**Figure IV.3a et b**). Cette figure présente différente zone avec différentes couleurs :

- La zone majoritaire avec une couleur blanche qui est l'acétate de cellulose parce que c'est un poly saccharide compose de glucose.
- Une zone grise qui est de l'acétate de cellulose aussi mais avec une degré de blanchiment relativement faible.
- Une zone noire destinée aux présences des impuretés.

Un résultat similaire a été obtenu par Yan-Fei Pan, et al [9]

Le spectre EDS confirme la nature organique pur de l'acétate de cellulose et donne le pourcentage des éléments chimiques existants qui sont le carbone et d'oxygène.

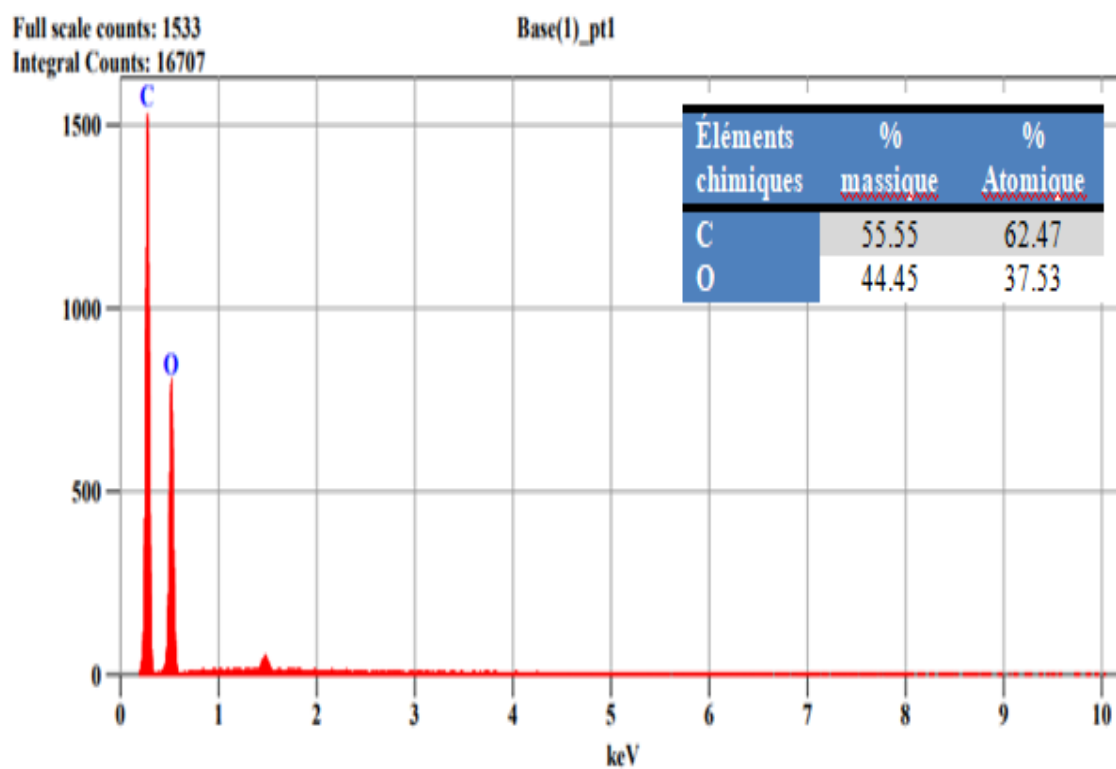
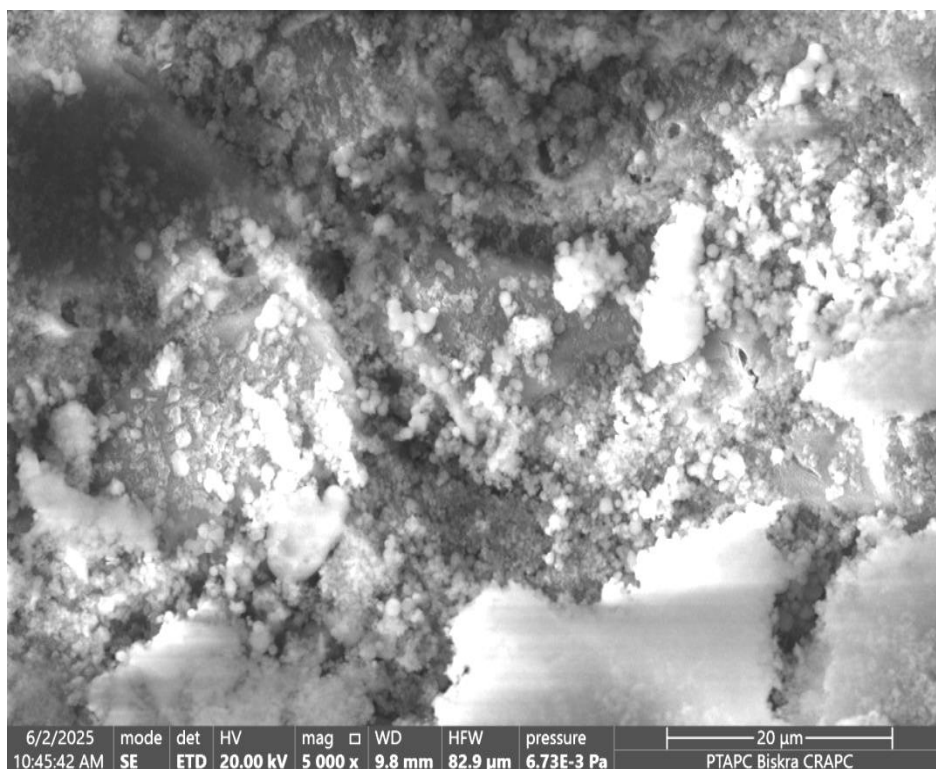


Figure IV.3 : Images obtenues par microscopie électronique à balayage de lacetate de cellulose(a) et spectre EDS (b)

IV.6.Caracterisation des dépôts élaborés

IV.6.1.Caracterisation par Diffraction des rayons X

IV.6.1.1.Effet de densité du courant

Pour les depot abase de Nickel-phosphore-acetate de cellulose(NiPAC)

Les propriétés structurales des films d'acétate de cellulose NiP, étudiées par analyse aux rayons X, révèlent une interaction complexe entre les phases cristallines et amorphes, influencées par les conditions de synthèse et de traitement. La technique de diffraction des rayons X a été essentielle pour élucider ces propriétés, fournissant des informations sur la taille, la distribution et la cristallinité des phases NiP au sein de la matrice acétate de cellulose. Les films présentent une gamme de caractéristiques structurales, allant des formes cristallines aux formes amorphes, selon les conditions de préparations des dépôts composites. Voici les principales propriétés structurales identifiées par analyse X-ray.

La structure de l'alliage Ni-P-acétate de cellulose a été étudiée à l'aide de l'instrument de diffraction des rayons X avec un rayonnement Cu-K de longueur d'onde 1,5406 Å. **La Figure (IV.4)** montre les profils de diffraction des rayons X des revêtements Ni-P-AC déposées pendant 1 heure avec différentes densités de courant. D'après la figure (IV. 4), aucun pic de diffraction de cuivre n'est trouvé dans tous les spectres indiquant que les substrats sont complètement recouverts par le revêtement, ce qui prouve que les fissures susmentionnées étaient superficielles et n'ont pas atteint le substrat.

Les échantillons déposés présentent une nature semi cristalline avec un pic intense autour de 43° indiquant des phases NP(232) et NP(032) qui sont oxyde phosphate de nickel et NC(101) qui est acétate de nickel hydraté et des pics autour de 45° indiquant la phase NiAh qui est acétate de nickel tétrahydraté autour de 50° et Ni_3P (730) autour de 74° du et Ni_2P autour de 90° à densité de courant de ($j = 1,3,5 \text{ A. dm}^{-2}$) indiqués par P1, P2 et P3 respectivement) avec des intensités différentes, comme indique cette figure (IV. 4) nous avons remarqués que ces pics ont été disparus avec l'échantillon ($j = 7 \text{ A. dm}^{-2}$ indique par P4). L'apparition des nouveaux pics autour de 30° de la phase nickel carbonate hydroxyde hydrate (NCH) pour les échantillons de (j

= 3.5 ,7 A. dm⁻²), et L'apparition des nouveaux pics autour de 45° de la phase nickel acétate hydrate (NAH) pour les échantillons de ($j = 5, 7$ A. dm⁻²).

Par la comparaison entre les spectres nous remarquons qu'il y a un décalage de la majorité des pics (111), ces comportements peuvent être liés à la distorsion du réseau cristallin à la suite de la diffusion des atomes du phosphore dans le réseau du nickel. Il a été montré que les dépôts électrolytiques texturés associent un mélange de grains fins et gros. Cela signifie que les petits grains sont orientés aléatoirement et présentent souvent une forte concentration de défauts [10].

On a remarqué que les intensités des pics diminuent progressivement avec l'augmentation de densité de courant, ou ils sont devenus plus élargies (forme bande) sa implique le degré de cristallinité des échantillons à cause de déposition de bio polymère qui ayant une structure amorphe.

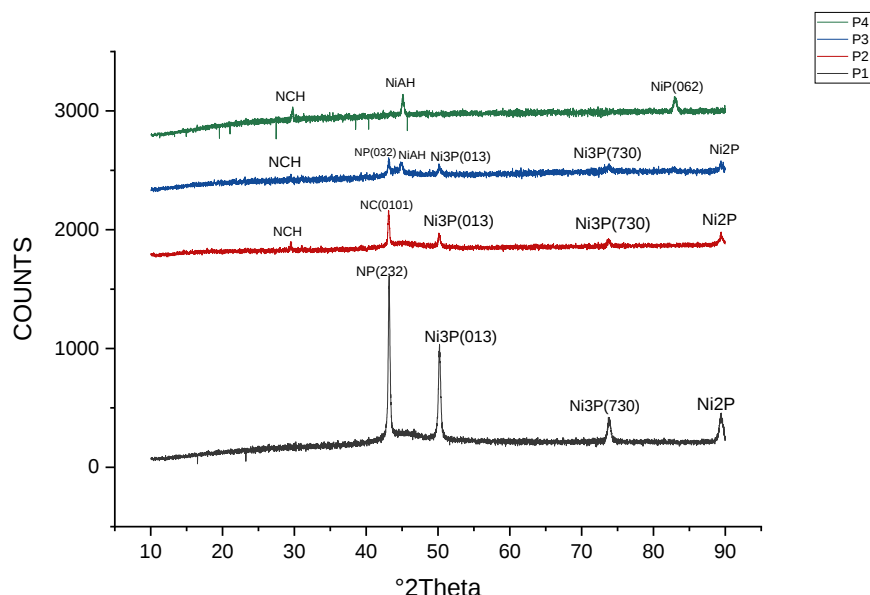


Figure IV.4 : Profiles de DRX des dépôts Ni-P- acétate de cellulose en fonction de la densité de courant appliquée

Le **tableau IV.1** présente les différents paramètres extraites et calculées à partir des profils de diffraction des rayons X des di fentes dépôts composite à base de nickel. Phosphore –Acétate (NiPAC) de cellulose en fonction de densité du courant, les paramètres sont les intensités des pic (Counets), Le largeur a mis hauteur des pics (FWHM), la distance réticulaire ou bien la distance entre les plans(d), la taille des cristallites et le degré de cristallinité.

D'après les valeurs des intensités nous avons remarques une diminution progressive des intensités des pics avec l'augmentation de densité de courant, cette diminution à cause de bonne déposition de l'acétate de cellulose sur nos substrats en cuivre, puisque ce biopolymère ayant une structure amorphe avec une degré de cristallinité trop faible.

Une structure amorphe de film à base de NiP est plus avantageuse à cause de La haute résistance à la corrosion par l'absence de grains et de joints limite la pénétration des agents corrosifs, et réduit les voies de propagation de la corrosion. Une structure amorphe ayant une Bonne homogénéité c.a.d l'uniformité de la structure amorphe est bénéfique pour des couches très fines ou en milieu agressif.[10]. Et d'après Costa et al [11] Les films cristallins de Ni-P, bien qu'ayant des structures définies, sont plus susceptibles à la corrosion en raison de la présence de joints de grain qui peuvent agir comme des sites d'initiation de la corrosion.

Pour les valeurs de la largeur a mis hauteur des pics (FWHM) nous avons remarques l'augmentation de ces valeurs avec l'augmentation des densités du courant, les valeurs obtenus de FWHM confirment deux principaux résultats :

1-Des pics élargies c'est à dire diminution des tailles des cristallites, faible porosité et sa donne un dépôt compacte et résistant.

2. Des pics élargies c'est-à-dire la diminution de degré de cristallinité (les pics deviennent forme des bandes cad une structure plus amorphe).

Les résultats de FWHM ont été confirmés par les résultats obtenus des tailles des cristallites.

D'après les résultats de la FWHM et la tailles des cristallites je peux conclure que les densités de courant optimale dans notre étude sont $j = 1 \text{ A. dm}^{-2}$ et $j = 5 \text{ A. dm}^{-2}$.

Tableau IV.1 : Caractéristiques cristallines des échantillons avec $C=1\text{g/l}$ et densités du courant ($j = 1, 3, 5$, et 7 A. dm^{-2}).

Pièce	$^{\circ}2\text{Theta}$	Intensité des pics	FWHM	D	La taille Cristallites
-------	-------------------------	-----------------------	------	---	---------------------------

P1	43,179	1319,76	0,2362	2,09518	33.65 nm
	50,218	779,89	0,1574	1,81677	
	73,726	185,53	0,1968	1,28509	
	89,407	198,63	0,1574	1,09595	
P2	29,510	58,62	0,1968	3,02696	44.87 nm
	43,106	296,61	0,1771	2,09856	
	50,109	106,96	0,1968	1,82046	
	73,711	56,22	0,3149	1,28532	
	89,445	-----	-----	-----	
P3	29,474	36,35	0,2362	3,03060	28.88 nm
	43,131	145,36	0,2755	2,09742	
	44,878	103,25	0,3149	2,01974	
	50,128	69,19	0,2362	1,81982	
	73,839	44,82	0,6298	1,28341	
	89,400	-----	-----	-----	
P4	27,449	17,17	0,240	3,24085	50.60 nm
	29,781	92,77	0,1574	3,00003	
	45,113	159,38	0,2755	2,00097	
	82,984	111,98	0,4723	1,16365	

IV.6.1.1. Effet de concentration de l'acétate de cellulose sur les caractéristiques des dépôts avec les densités des courants ($j=1 \text{ A. dm}^{-2}$, $j=5 \text{ A. dm}^{-2}$)

a/ avec $j=1 \text{ A. dm}^{-2}$

Dans ce cas nous avons fixé la densité du courant et varié la concentration de bio polymère utilisée ($C=1\text{g/l(P1)}$, $C=2\text{g/l (P5)}$ et $C=3\text{g/l(P6)}$). L'échantillon (P1) est mentionné dans la partie précédente.

Comme indique la figure IV.5 les échantillons déposés (P5 et P6) pics avec des intensités élevées autour de $2\theta=43^\circ$ indiquant dès l'apparition des nouvelles phases NC de formule chimique ($\text{CH}_{11}\text{NO}_8$), et de NCH (013) de composition $\text{CH}_{11}\text{NO}_8$ (P6) et NP(202) de composition $\text{C}_6\text{H}_7\text{NO}_4$ (P5) autour de 50° , on remarque

aussi des nouvelles phases de nickel-phosphore-oxygène ($\text{Ni}_2\text{O}_{12}\text{P}_4$) mais avec des intensités relativement faibles autour de 74° pour les deux échantillons P5 et P6. Nous avons remarqués aussi l'apparition des nouvelles phases de nickel carbonate hydroxyde autour de 90° qui sont $\text{C}_4\text{NiO}_4(\text{P5})$ et $\text{CNiO}_3(\text{P6})$.

Le **tableau IV.2** présente les différentes paramètres extraites et calculées à partir des profils de diffraction des rayons X des différents dépôts composites à base de nickel. Phosphore –Acétate de cellulose (NiPAC) en fonction de concentration de bio polymère utilise.

Comme indiquant le **tableau IV.2** avec l'augmentation des concentrations de l'acétate de cellulose, nous avons obtenus des phases cristallines à base de nickel, carbone, oxygène et phosphore, sa confirme bonne interaction entre les composés chimiques qui compose le bain de déposition.

D'après ce tableau il y a une augmentation des intensités des pics avec l'augmentation de concentration de bio polymère. D'après la littérature la structure cristalline augmente la dureté et la résistance à l'usure, tandis que la structure amorphe augmente la résistance à la corrosion [12].

Nous avons remarqué aussi la diminution des tailles des cristallites avec l'augmentation de concentration ($C=3\text{g/L}$), sa donne une structure compacte (faible porosité), dure et résistante.

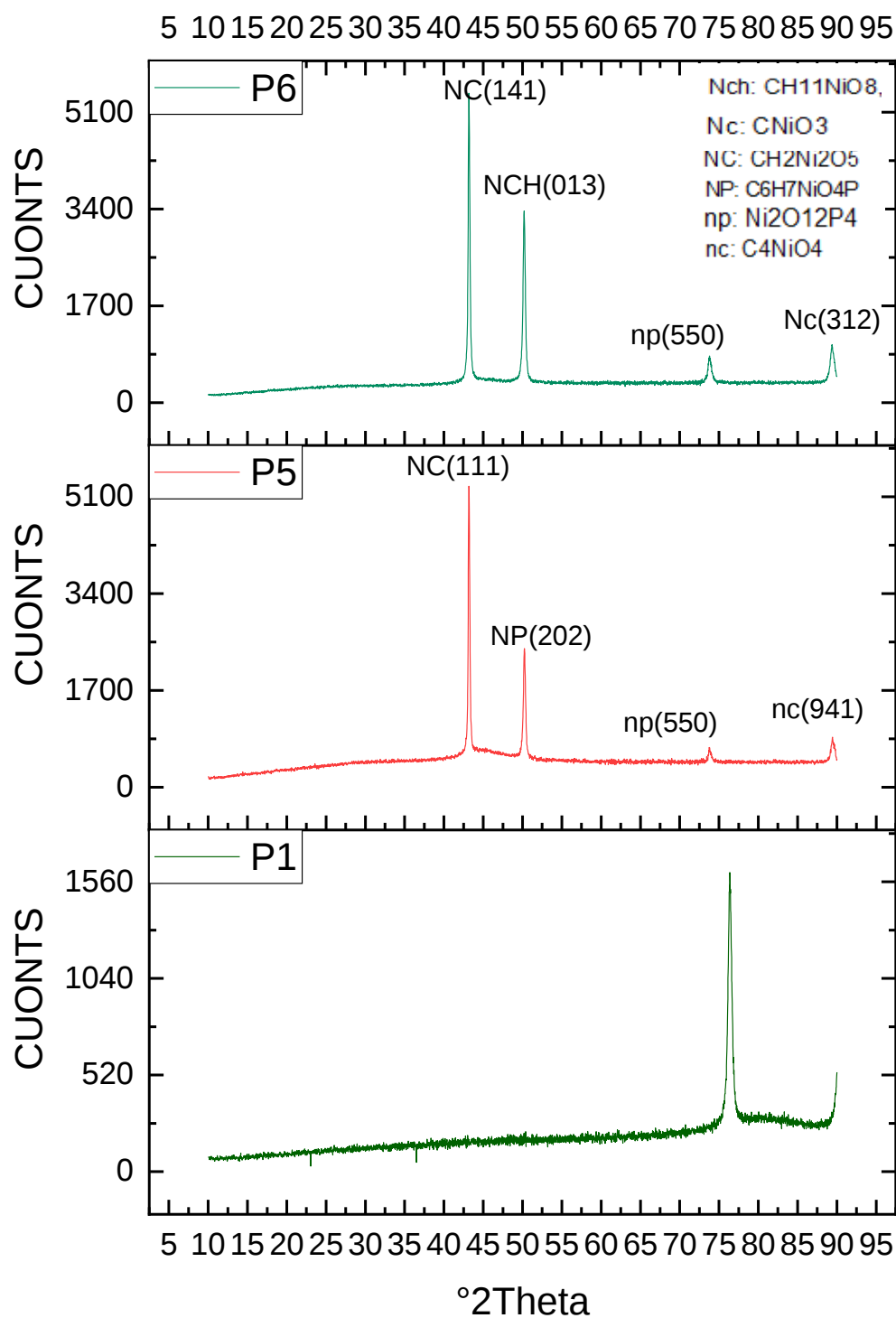


Figure IV.5 : Profile de DRX des dépôts Ni-P- acétate de cellulose en fonction de concentration de biopolymère avec $j=1 \text{ A. dm}^{-2}$.

Tableau IV.2 : Caractéristiques cristallines des échantillons avec $j = 1 \text{ A. dm}^{-2}$ et les concentrations ($C = 1, 2, 3 \text{ g/l}$ de bio polymère).

Piece	$^{\circ}2\theta$	Intensités des pics	FWHM	d	La taille des cristallites
P1 C=1g/l	43,179	1319,76	0,2362	2,09518	33.65 nm
	50,218	779,89	0,1574	1,81677	
	73,726	185,53	0,1968	1,28509	
	89,407	198,63	0,1574	1,09595	
P5 C=2g/l	43,171	4662,28	0,1968	2,09557	40.42 nm
	50,200	1803,59	0,1968	1,81739	
	73,774	234,42	0,1574	1,28438	
	89,436	382,77	0,1968	1,09567	
P6 C=3g/l	43,159	4910,05	0,2558	2,09611	31.08 nm
	50,186	2918,94	0,1771	1,81785	
	73,740	421,91	0,2755	1,28489	
	89,365	566,01	0,2755	1,09636	

b/avec $j=5 \text{ A. dm}^{-2}$

Dans ce cas nous avons fixés la densité du courant et varié la concentration de bio polymère utilisée ($C=1 \text{ g/l}$ (P3), $C=2 \text{ g/l}$ (P7) et $C=3 \text{ g/l}$ (P8)). L'échantillon (P3) est mentionné dans la partie précédente.

Comme indique **la figure IV.6** les échantillons déposés (P7 et P8) Nous avons obtenus les mêmes phases qu'avec la densité du courant ($j= 1 \text{ A. dm}^{-2}$) sauf l'apparition d'une nouvelle phase NCO ($\text{C}_2\text{H}_4\text{NiO}_6$) autour de 45° .

D'après le tableau IV. Il y a une légère augmentation des intensités des pics avec l'augmentation de concentration de bio polymère (2g/L) mais la structure devient plus amorphe à cause des élargissements notables des derniers pics. Nous avons remarqué aussi une légère augmentation des tailles des cristallites (P7). Costa et al [11] confirme que les films amorphes de Ni-P démontrent une résistance à la polarisation

plus élevée, les rendant moins susceptibles à la corrosion par rapport aux films cristallins et d'après (Wang et al). [13] Les films amorphes maintiennent mieux leur intégrité sous des conditions environnementales variées, ce qui est crucial pour les applications dans des environnements corrosifs .

Avec la concentration($C=3\text{g/l}$) il y a une augmentation notable des intensités et les pics deviennent plus fins, ce qui confirme que la structure devient plus cristalline. Nous avons remarqué aussi l'augmentation des tailles des cristallites, ce qui implique une structure plus poreuse et moins compacte.

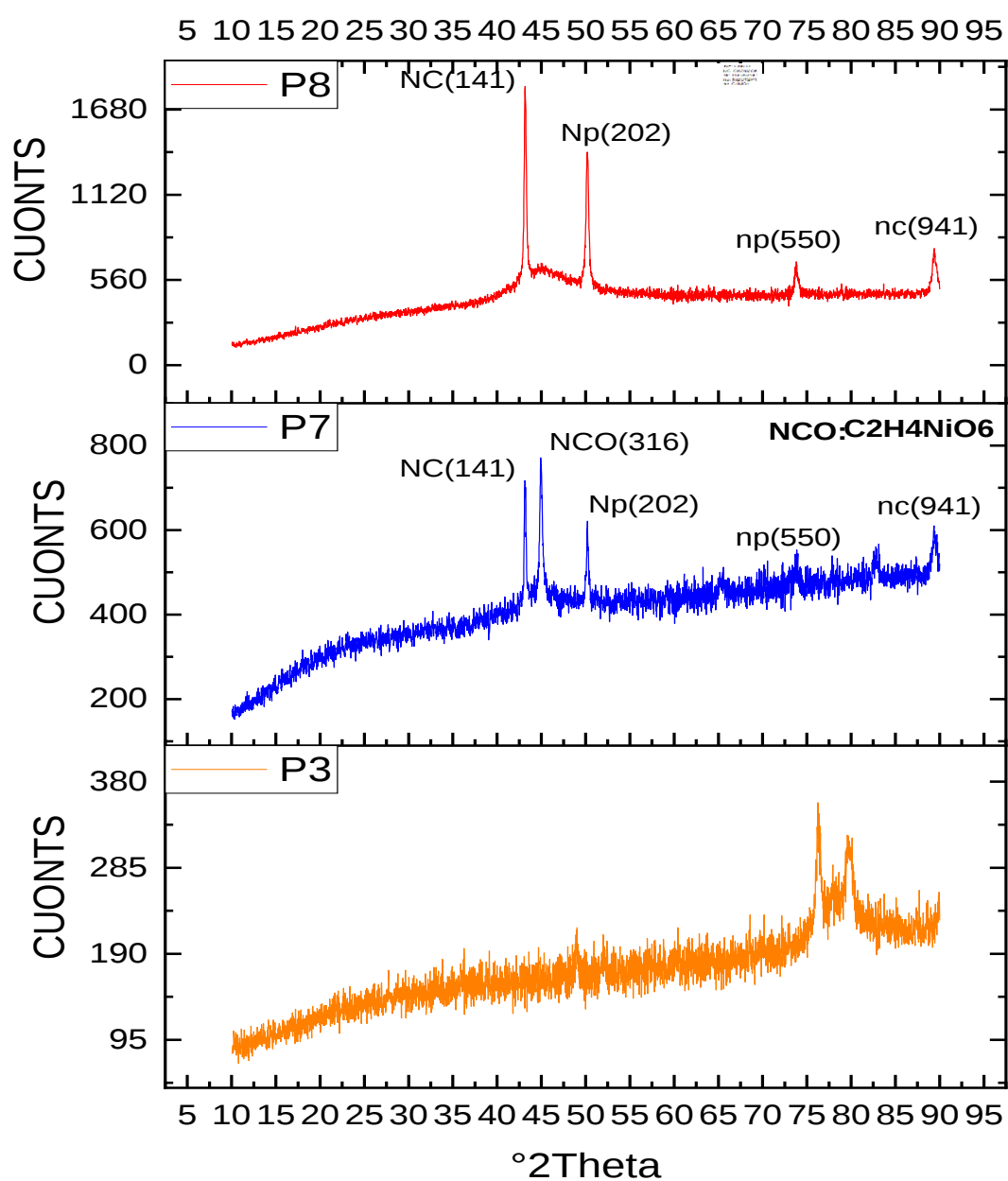


Figure IV.6 : Profile de DRX de dépôts Ni-P- acétate de cellulose en fonction de concentration de bio polymère avec $j=5$.

Tableau IV.3 : Caractéristiques cristallines des échantillons avec $j = 5 \text{ A. dm}^{-2}$ et les concentrations ($C = 1, 2, 3 \text{ g/l}$ de bio polymère).

P	2θ	Intensités des pics	FWHM	d	La taille des cristallites
P3 C=1g/l	29,474	36,35	0,2362	3,03060	28.88 nm
	43,131	145,36	0,2755	2,09742	
	44,878	103,25	0,3149	2,01974	
	50,128	69,19	0,2362	1,81982	
	73,839	44,82	0,6298	1,28341	
	89,400				
P7 C=2g/l	43,14	286,42	0,1968	2,09666	33.65 nm
	44,93	329,57	0,2362	2,01740	
	50,20	184,86	0,1574	1,81717	
	65,42	37,31	0,9446	1,42660	
	73,73	39,08	0,9446	1,28493	
	82,82	55,86	0,9446	1,16551	
P8 C=3g/l	43,14	1277,20	0,1378	2,09699	57.77 nm
	50,10	749,49	0,1181	1,82059	
	73,76	174,56	0,3936	1,28445	
	89,40	248,04	0,2755	1,09600	

IV.6.2. Comportement électrochimique des dépôts Ni-P-C

IV.6.2.1. Courbes de polarisation (voltampérométrie)

Le comportement électrochimique des dépôts élaborés par voie électrochimique avec différentes concentrations de biopolymère dans un milieu NaCl (1M) a été réalisé avec la technique de polarisation potentiodynamique, une vitesse de balayage de 1mV/s et la température ambiante. La figure (IV.7) présente

les courbes de polarisation (Tafel), les résultats cinétiques obtenus avec la densité du courant $j = 1 \text{ A. dm}^{-2}$ et avec les concentrations ($C=1\text{g/l}$, 2g/l et 3g/l de bio polymère).

Les valeurs des densités de courant de corrosion (i_{corr}), le potentiel de corrosion (E_{corr}), Taux de corrosion, la résistance de polarisation (R_p), en milieu NaCl sont reportées dans le **Tableau (IV.4)**.

Nous remarquons que les potentiels de corrosion des dépôts se déplacent anodiquement (valeur plus noble). La courbe de polarisation de l'échantillon revêtu de Ni-PAC est considérablement décalée vers des valeurs plus positives avec l'augmentation de concentration de bio polymère ajouté ($C=2\text{g/l}$ et 3g/l) ce qui signifie de meilleures propriétés de corrosion pour ces échantillons.

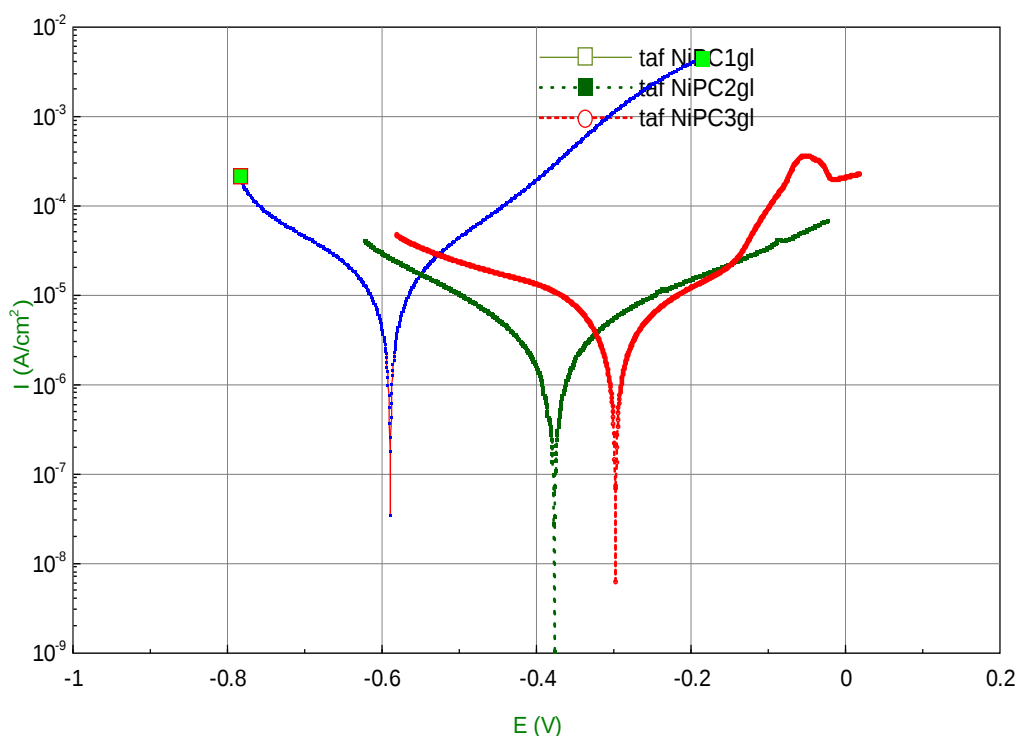


Figure IV.7 : Courbes de polarisation des revêtements Ni-P électrodéposés pour différentes de concentrations

Tableau IV.4 : Paramètres électrochimiques des dépôts Ni-P AC dans le milieu agressif NaCl 1M.

	Ba (mV)	Bc (mV)	I0 (Amps/ cm ²)	E0 (Volts)	Rp (Ω*cm ²)	Taux de corrosion (mm/a)
NiPC 1g	178.79	215.59	1.5972E-05	-0.5885	2504	0.1128
NiPC 2g	301.09	270.83	4.1068E-06	-0.3760	15973	0.019096
NiPC 3g	424.75	621.73	1.3897E-05	-0.29692	7198.6	0.042371

D'après les courbes de polarisation (**Figure IV.7**, et le **Tableau IV.4** l'addition des concentrations de biopolymère jusqu'à 3g/l nous notons que :

L'augmentation des concentrations, diminue la densité de courant de corrosion (i_{corr}) jusqu'à atteindre la valeur minimale 4.1068E-06 et 1.5493 E-06 ($\mu A/cm^2$) avec les concentrations de 2g/l (concentration optimale pour le biopolymère). Ce qui suggère que les molécules inhibitrices forment une couche adsorbée sur la surface de l'alliage bloquant le processus de corrosion,

Un déplacement du potentiel de corrosion (E_{corr}) vers des valeurs positives de -0.5885mV/ECS à -0.29692 mV/ECS. Une augmentation de la résistance de polarisation (R_p) jusqu'à une valeur maximale de 15973 ($k\Omega .cm$) pour le biopolymère avec C=2g/l.

La diminution de taux de corrosion avec l'augmentation de concentration qui atteint une valeur de 19,096% (2g/l) et 42,371% (3g/l).

En résumé Les revêtement à base de cellulose fonctionne selon deux mécanismes principaux : 1. Mécanisme de Barrière : Les fibres de l'acétate de créent une barrière physique qui empêche les substances corrosives de toucher la surface du cuivre. 2. Mécanisme de passivation:Le revêtement améliore également la passivation du cuivre, ce qui contribue encore à sa résistance à la corrosion.[14].

IV.6.2.2. Caractérisations par MEB

L'analyse de la morphologie des revêtements Ni-P-acétate de cellulose élaboré par voie électrochimique sur des substrats en cuivre avec différentes densités de courant, a été réalisée à l'aide d'un microscope électronique à balayage.

L'observation de la morphologie de surface Del échantillon ($C=2g/l$ et $j=1A. dm^{-2}$) est présentée sur la Figure (IV.8.a).

La figure présente un revêtement homogène d'alliage Ni-P-AC déposé dans ces conditions est de bonne qualité, uniforme et texture de surface sans porosité, et le spectre EDS (Figure IV. 8.b) de dépôt NiP-AC élaboré confirme la présence de tous les éléments chimiques avec des pourcentages élevés, qui sont Le Nickel (Ni), le phosphore(P) avec le carbone et l'oxygène qui sont les principaux éléments chimiques de notre biopolymère. Ce résultat confirme la bonne déposition de NiPAC.

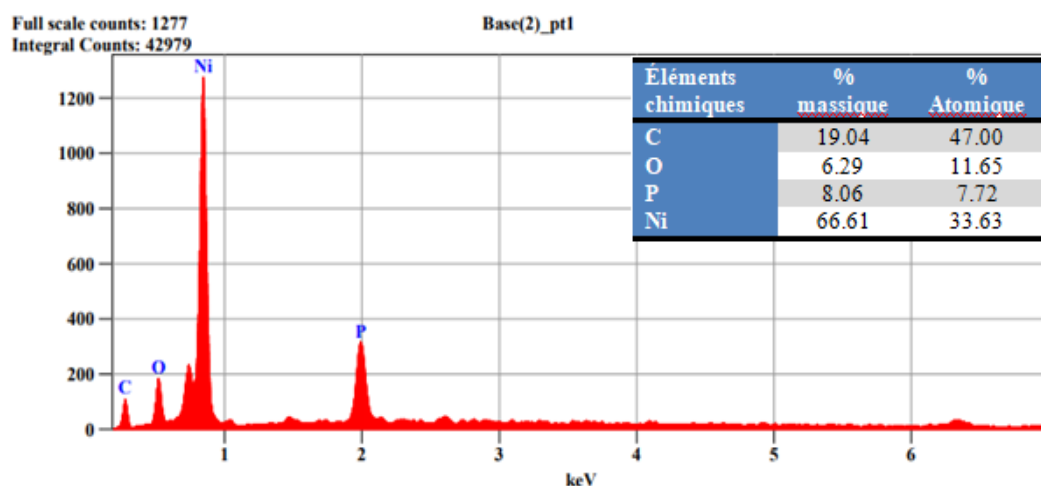
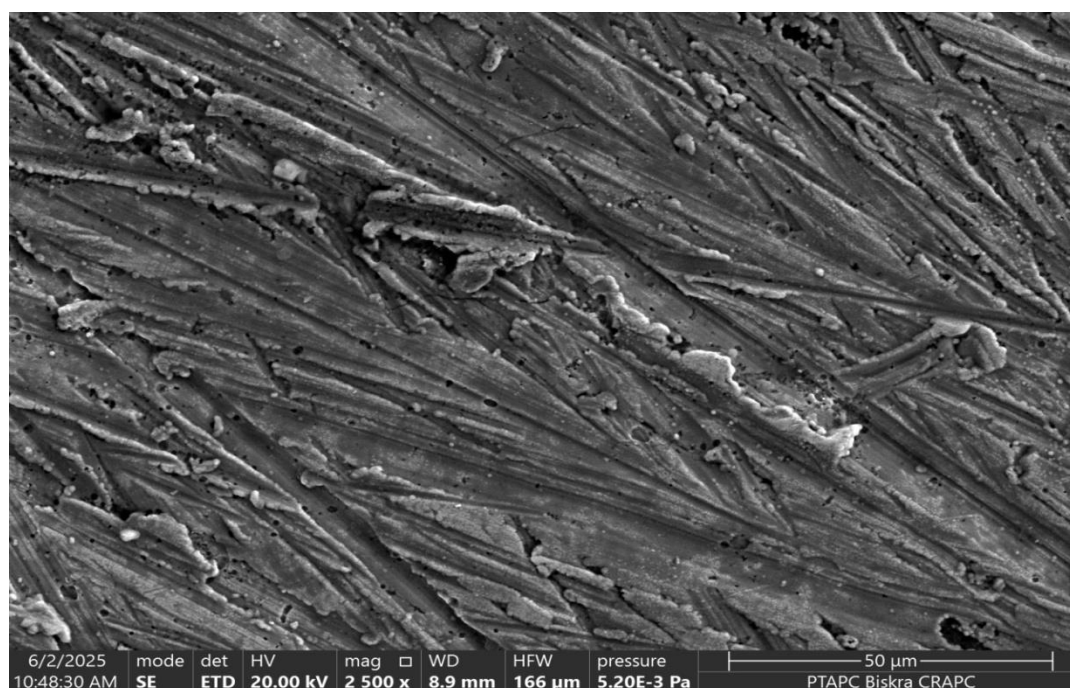


Figure IV.8 : Images obtenues par microscopie électronique à balayage de revêtement Ni-P-AC (a) et spectre EDS (b)

Références

- [1] Stuart,B.(2004). Infrared Spectroscopy : Fundamentals and Applications. Wiley.
- [2] Colthup, N.B., Daly,L.H,& Woberley,S.E.(1990). Introduction to Infrared and Raman Spectroscopy. Academic Press.
- [3] Socrates,G. (2001). Infrared and Raman Characteristic Group Fréqueancies: Tables and Charts.Wiley.
- [4] Poletto, M, al(2014). Structural Characteristic ans thermal properties of native cellulose. Materials, 7(9), 6105-6119.
- [5] Silverstein, R.M., et al (2014). Spectrometric Identification of Organic Compounds. Wiley.
- [6] Kondo, T. (1997). The assignment of IR absorption bands due to free hydroxyl groups in cellulose. Cellulose, 4(4), 281-292.
- [7] Oh,S.Y., et al (2005). Crystalline structure analysis of cellulose treated with sodium hydroxide and carbon dioxide by means of X-ray diffraction and FTIR Spectroscopy. Carbohydrate Research,340 (15), 2376-2391.
- [8] Prasmna Asokan Poorani Sathya et all In-vitro evaliation of electrosmn cellulose acétate nanofiber containing Graphene oxide / TiO/Curcumin for wounds healing application Colloids and surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects.
- [9] Yan-Fei Pan, Zhi et al, The preparation, Characterization, and influence of multiple electroless nickel-phosphorus (Ni-P) hollow composite coating on micro-nano cellulose fibers, Surface & Coatings Technology 298(2016) pages 33-38.
- [10] T. Watanabe & T.Kanayama (1989),”Microstucture of Electroplated Ni-P Alloy Film”, Journal of the surface Finish Society of Japan , Volume 40, page 425.
- [11] Costa, J.M., et al, 2024 Crystallinity and corrosion resistance of Ni-P coatings on cellulose substrate.
- [12] Mentar Loubna Effets des Additifs Orgaiques sur les propriétés de Films Minces Granulaires de C0-Cu, Thèse de doctorat , University de sétif 1, (2013).
- [13] Wang, Yuehua, avec Meiqi Yu, Qi Qiao Fei You, Cailing Li & Jinku Yu, Effect of Plastics Deformation on the Crystalz Structure and Crystallization Activation Energy of Ni-W-P- Alloy Coating, Journal of materials engineering and Performance, volume 24, pages 2653-2657 (2015).

[14] Randis Randis et al , Cellulose nanofibres of oil palm fonds as a filler in nanocomposite, International journal of Biological Macromolecules (Vol 279, Part 4), (2024).

Conclusion générale

Dans cette étude, nous avons examiné la création de dépôts composites électrolytiques contenant du nickel et phosphore en employant un biopolymère naturel, l'acétate de cellulose, comme additif dans la solution de dépôt. Cette étude vise avant tout à renforcer la résistance à la corrosion des revêtements métalliques en incorporant un matériau biosourcé, renouvelable et écologique.

Le dépôt a été effectué sur des substrats métalliques (tels que le cuivre), intégrant de l'acétate de cellulose dans le bain Ni-P. On privilégie l'utilisation de ce biopolymère en raison de ses attributs bénéfiques : elle est non toxique, renouvelable et peut optimiser l'adhésion ainsi que l'uniformité du dépôt. Différentes méthodes de caractérisation ont été employées, y compris la spectroscopie infrarouge (FTIR), la microscopie électronique à balayage (MEB), la diffraction des rayons X (DRX), la spectroscopie EDS, et l'analyse électrochimique qui est la polarisation de Tafel. Ces techniques ont facilité l'évaluation de la morphologie, de la structure, de la composition et du comportement électrochimique des dépôts.

Sur la lumière des résultats et des discussions ci-dessus, on peut tirer les conclusions suivantes :

A/Pour le bio polymère extrait à partir d'un déchet de coton :

1. Le spectre infrarouge présente toutes les bandes caractéristiques de cellulose qui sont : des bandes correspondent aux vibrations d'élongation O-H, et de des groupes CH₂ et CH des unités de glucose et de liaisons β -glycosidiques de la cellulose.
2. le spectre de DRX montre une large bande correspond aux structures amorphes de bio polymère.

B/Pour les dépôts élaborés à base d'acétate de cellulose :

1. Les résultats obtenus par le spectre de diffraction des rayons X confirment que les densités du courant optimal pour déposer le film NiPAC sont $j=1$ et $j=5$.
2. les résultats obtenus à partir des courbes de polarisation confirment que la concentration optimale pour protéger le cuivre contre la corrosion est $C=2\text{g/l}$ de

Par conséquent, le recours à l'acétate de cellulose comme additif naturel dans les dépôts électrolytiques constitue une stratégie prometteuse, pérenne et efficace pour la production de revêtements métalliques protecteurs de haute performance.

ملخص

هدفت هذه الدراسة إلى تطوير راسب طلاء كهربائي مركبة قائمة على النيكل والفوسفات (Ni-P) من خلال دمج بوليمر حيوي طبيعي، وهو أسيتات السليلوز، لتحسين حماية المعادن من التآكل. أظهرت إضافة بوليمر في حمام الطلاء الكهربائي تأثيرًا إيجابيًا على بنية وجودة الرواسب. وأظهرت فحوصات المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) سطحًا أكثر تجانسًا وأقل مسامية. وأظهر تحليل EDS توزيعًا متجانسًا للسليلوز في المصفوفة. وكشفت بيانات حيود الأشعة السينية عن بنية غير متبلورة أكثر وضوحًا، مرتبطة بوجود البوليمر الحيوي.

وأظهرت مخططات استقطاب تافل. كما أثبتت الدراسات الكهروكيميائية التأثير الوقائي ل أسيتات السليلوز انخفاضًا ملحوظًا في تيار التآكل، بينما كشف تحليل المعاوقة عن زيادة في مقاومة الاستقطاب، مما يشير إلى تشيير البيانات التي تم جمعها إلى أن دمج أسيتات السليلوز يحسن جودة الطلاء،. تحسن الاستقرار الكهروكيميائي. ويجعله أكثر تجانسًا، ويزيد بشكل كبير من مقاومته للتآكل.

Résumé

Le but de cette étude était d'élaborer des dépôts électrolytiques composites à base de Ni-P en intégrant un bio polymère naturel, l'acétate de cellulose, dans le but d'optimiser la protection des métaux face à la corrosion.

L'inclusion de ce bio polymère dans le bain électrolytique a révélé un impact positif sur la structure et la qualité du dépôt. Les examens MEB ont démontré une surface plus uniforme et moins poreuse. Les données de diffraction des rayons X ont mis en évidence une structure amorphe plus prononcée, associée à l'existence du biopolymère. Les études électrochimiques ont aussi validé l'effet de protection offert par-là l'acétate de cellulose. Les graphiques de polarisation de Tafel ont montré une diminution notable du courant de corrosion, tandis que l'impédancemétrie a mis en évidence une hausse de la résistance de polarisation, signifiant une amélioration de la stabilité électrochimique. Les données recueillies indiquent que l'incorporation d'acétate de cellulose améliore la qualité du revêtement, le rend plus uniforme et accroît de manière significative sa résistance à la corrosion.

Summary

The aim of this study was to develop Ni-P-based composite electroplating deposits by incorporating a natural biopolymer, cellulose acetate, to optimize metal corrosion protection. The inclusion of this biopolymer in the electroplating bath revealed a positive impact on the structure and quality of the deposit. SEM examinations demonstrated a more uniform and less porous surface X-ray diffraction data revealed a more pronounced amorphous structure, associated with the presence

of the biopolymer. Electrochemical studies also validated the protective effect provided by cellulose. Tafel polarization plots showed a significant decrease in corrosion current, while impedance analysis revealed an increase in polarization resistance, indicating improved electrochemical stability. The collected data indicate that the incorporation of cellulose acetate improves the quality of the coating, makes it more uniform, and significantly increases its corrosion resistance.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة محمد خيضر - بسكرة

عنوان المشروع:

Fabrication des dépôts composites électrolytiques utilisant un biopolymère pour protéger les métaux contre la corrosion.

مشروع لنيل شهادة مؤسسة ناشئة في إطار القرار الوزاري 1275

صورة العلامة التجارية



الاسم التجاري

INHIBMET

السنة الجامعية

2025_2024

بطاقة معلومات:

حول فريق الاشراف وفريق العمل

1- فريق الاشراف:

فريق الاشراف	
المشرف الرئيسي (01): ديغش كلثوم	التخصص: هندسة كيميائية
المشرف الرئيسي (02): عداينة كلثوم	التخصص: هندسة كيميائية

2- فريق العمل:

فريق المشروع	التخصص	الكلية
الطالب: توم حسنة	هندسة كيميائية	علوم وتكنولوجيا
الطالب: شعبان رنا	هندسة طرائق للبيئة	علوم وتكنولوجيا

عنوان المشروع: Fabrication des dépôts composites électrolytiques utilisant un biopolymère pour protéger les métaux contre la corrosion

فهرس المحتويات

المحور الأول: تقديم المشروع

المحور الثاني: الجوانب الابتكارية

المحور الثالث: التحليل الاستراتيجي للسوق

المحور الرابع: خطة الإنتاج والتنظيم

المحور الخامس: الخطة المالية

المحور السادس: النموذج الاولي التجريبي

عنوان المشروع: Fabrication des dépôts composites électrolytiques utilisant un biopolymère pour protéger les métaux contre la corrosion

المحور الأول: تقديم المشروع

تعاني المعادن من مشكلة التآكل عند تعرضها لبيئات قاسية، مما يؤدي إلى أضرار كبيرة في المعدات والهياكل المعدنية وخسائر اقتصادية معتبرة. بناءً على ذلك، ظهرت الحاجة إلى تطوير تقنيات فعالة لحماية المعادن من التآكل بطريقة مستدامة وصديقة للبيئة.

يرتكز هذا المشروع على تصنيع رواسب مركبة عبر طريقة التحليل الكهربائي، مع دمج بوليمر حيوي ضمن وسط التحضير لتحسين خصائص الحماية للطبقة المترسبة. تعتمد هذه التقنية على تطبيق تيار كهربائي لتحفيز ترسيب مواد على سطح المعدن، مكونة طبقة واقية تعمل كحاجز ضد عوامل التآكل.

فكرة المشروع (الحل المقترح)

بدأت فكرة المشروع من خلال ملاحظة الاعتماد الكبير على مثبطات التآكل الكيميائية المستوردة، والتي تستخدم لحماية المعادن من التآكل، خصوصا في الصناعات التي تتطلب مقاومة عالية للتآكل ونظرا لتكلفتها المرتفعة وصعوبة استيرادها، جاءت الفكرة لإنتاج مواد تثبيط محلية تعتمد على البوليميرات الحيوية، وذلك من خلال تطوير طلاءات مركبة ترسب كهربائيا على سطح المعدن لتشكل حاجزا واقيا. هذا المنتج يمكن أن يكون بديلا اقتصاديا وبيئيا لمثبطات التآكل التقليدية، مع تقديم أداء جيد حسب ما أظهرته التحاليل المنجزة باستعمال تجهيزات بسيطة ومتوفرة.

القيم المقترحة

الأداء: تقديم طلاءات مركبة فعالة كمثبطات تآكل ذات كفاءة عالية لحماية المعادن باستخدام بوليميرات طبيعية.

السعر: منتج محلي بتكلفة أقل مقارنة بالمنتجات المستوردة.

سهولة الوصول: تصنيع محلي يقلل من الاعتماد على استيراد مثبطات التآكل الكيميائية من الخارج.

التكلفة للشركات: تقليص التكاليف على المؤسسات الصناعية بفضل تقنيات بسيطة ومواد أولية محلية.

عنوان المشروع: **Fabrication des dépôts composites électrolytiques utilisant un biopolymère pour protéger les métaux contre la corrosion**

الاستدامة البيئية: منتج صديق للبيئة يعتمد على البوليميرات الحيوية غير السامة والقابلة للتحلل.

الدعم للاقتصاد الوطني : تشجيع الصناعة المحلية والابتكار في مجال الحماية من التآكل.

1. فريق العمل

الطالبة	التخصص	الدورات التكوينية
توم حسنة	هندسة كيميائية	_ تقنيات البحث عن الوظيفة _ المسار المقاولات _ أحسن فكرة مشروع مبتكر _ التفكير التصميمي والابتكاري _ الذكاء الاصطناعي _ تطبيقات المالية المحاسبية BMC_ إعداد نموذج أعمال _ ورشات حول تطبيقات واستخدامات التسويق الرقمي في المشاريع _ كيفية إعداد الدراسة التقنية والاقتصادية للمشاريع المبتكرة

عنوان المشروع: Fabrication des dépôts composites électrolytiques utilisant un biopolymère pour protéger les métaux contre la corrosion

شعبان رنا	هندسة الطرائق للبيئة	_ تقنيات البحث عن الوظيفة _ المسار المقاولات _ أحسن فكرة مشروع مبتكر _ التفكير التصميمي والابتكاري _ الذكاء الاصطناعي _ تطبيقات المالية المحاسبية BMC إعداد نموذج أعمال _ ورشات حول تطبيقات واستخدامات التسويق الرقمي في المشاريع _ كيفية إعداد الدراسة التقنية والاقتصادية للمشاريع المبتكرة
-----------	----------------------	--

2. أهداف المشروع

_ تثمين المواد الطبيعية المحلية من خلال استخدامها كمصدر لمثبطات تأكل صديقة للبيئة.

_ تقليل الاعتماد على مثبطات التآكل المستوردة باهظة الثمن والمضرة للبيئة.

_ تقديم حل اقتصادي وفعال لحماية المعادن يمكن تطبيقه في صناعات الوطنية.

عنوان المشروع: Fabrication des dépôts composites électrolytiques utilisant un biopolymère pour protéger les métaux contre la corrosion

المساهمة في تطوير حلول مستدامة ضمن توجهات الاقتصاد الأخضر.

تعزيز قدراتنا في البحث التطبيقي والابتكار في مجال حماية من التآكل.

جدول زمني لتحقيق المشروع:

عنوان المشروع: Fabrication des dépôts composites électrolytiques utilisant un biopolymère pour protéger les métaux contre la corrosion

الزمن بالأشهر												الاعمال
12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
									✓	✓	✓	دراسة نظرية ومراجعة المصادر
									✓	✓		استخلاص وتحضير البوليمر الحيوي
								✓	✓			تحضير محلول الطلاء المركب
								✓	✓			ترسيب الطلاءات كهربائيا
							✓	✓	✓			اختبارات مقاومة التآكل
							✓	✓				تحليل النتائج
						✓	✓					انتاج اول منتج
						✓	✓	✓	✓			كتابة التقرير

Fabrication des dépôts composites électrolytiques utilisant un biopolymère pour protéger les métaux contre la corrosion

المحور الثاني: الجوانب الابتكارية

طبيعة الابتكارات.

ابتكار السوق:

_ تقديم طلاء جديد مكون من مركب يحتوي على بوليمر حيوي لحماية المعادن من التآكل.

_ استهداف سوق جديد يهتم بالمنتجات البيئية والمستدامة.

_ استجابة لحاجة السوق إلى بدائل غير سامة وصديقة للبيئة.

ابتكار المتزايد:

_ تحسين التكنولوجيا موجودة مسبقا (الطلاء الكهربائي التقليدي).

_ تحسين استدامة وكفاءة المنتج دون تغيير جوهري في التكنولوجيا.

_ جعل عملية الطلاء أكثر توافقا مع متطلبات التنمية المستدامة والمعايير المحلية البيئية الحديثة.

المحور الثالث: التحليل الاستراتيجي للسوق

اولا: تحليل العوامل الكلية (PESTEL)

1_العوامل البيئية: صديق للبيئة.

2_العوامل السياسية: تواجه الدولة الجزائرية لتشجيع الإنتاج المحلي والتقليل التبعية للاستيراد.

3_العوامل الاقتصادية: إمكانية الحصول على التمويل او دعم مادي من صناديق دعم البحث والابتكار.

ثانيا: تحليل القوى التنافسية (PORTER)

1_حدة المنافسين:

السوق الجزائرية تفتقر إلى شركات متخصصة في انتاج طلاءات مركبة تعتمد على البوليميرات الحيوية ما يمنح المشروع فرصة دخول السوق بقوة.

2_القوة التفاوضية مع العملاء:

المنتج المقترح يوفر بديلا مبتكرا وأمنًا للطلاءات التقليدية، مما يمنحه قدرة تفاوضية قوية خاصة في قطاعات حساسة مثل: الصناعة البتروكيميائية والميكانيكية.

عنوان المشروع: Fabrication des dépôts composites électrolytiques utilisant un biopolymère pour protéger les métaux contre la corrosion

3_ دخول منافسين جدد:

رغم وجود فرص نمو، إلا أن الحواجز التقنية والمعرفية قد تصعب على المنافسين الجدد دخول المجال بسهولة.

4_ تهديد المنتجات البديلة:

المنتجات الكيميائية التقليدية لا تزال سائدة، لكنها تواجه تحديات بيئية وتشريعية، ما يمنح المنتجات الحيوية فرصا كبيرة لتكون بديلا مستداما وآمنا.

ثالثا: تحليل SWOT

1_ نقاط القوة:

- _ انخفاض تكاليف مواد أولية
- _ تمكن أصحاب المشاريع للقيام به (أعضاء الفريق)
- _ أول منتج حيوي صديق للبيئة ومتوفر محليا

2_ نقاط الضعف:

- _ عدم وجود الرأسمال للمشروع
- _ توفير المواد الأولية بشكل قليل
- _ انخفاض ميزانية الترويج

3_ الفرص:

- _ دعم الدولة للمؤسسات الناشئة
- _ وجود فراغ في السوق المحلية لمثل هذه المنتجات
- _ توجه السوق نحو المنتجات الخضراء والأمنة بيئيا

4_ التهديدات:

- _ تقليد المنتج ودخول منافسين هذا إذا لم تكن هناك حماية لمدة 4 سنوات

رابعا: تحليل المنتج التسويقي

عنوان المشروع: Fabrication des dépôts composites électrolytiques utilisant un biopolymère pour protéger les métaux contre la corrosion

1_المنتج: (Product)

الاسم XXX:

الوزن XXX:

تاريخ الإصدار: XXXX/XX/XX

طريقة الحفظ:

يحفظ في مكان بارد تحت درجة حرارة 4C°

2_السعر (Price) :

3_الترويج (Promotion) :

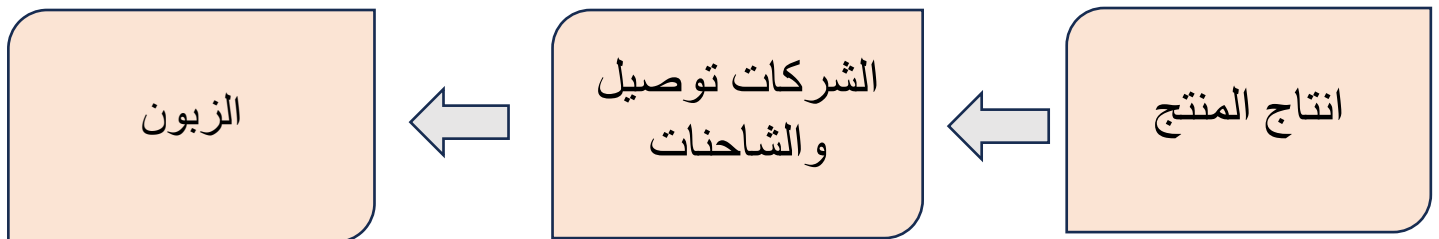
_منصات التواصل الاجتماعي

_المشاركة في المعارض والاحتكاك بمدراء الشركات الاقتصادية

_البيع الشخصي

4_التوزيع (Place) :

تعتمد الوسيطاء للتوزيع وإيصال المنتج للزبائن



خامسا: الاستراتيجيات التسويقية

استراتيجية التمييز: منتج جديد وبالتالي عدم وجود منافسين حاليا وهذا ما يجعل تسعيرة المنتج متميزة.

سادسا: تقدير المبيعات

نظرا لعدم وجود منافسين مباشرين فإنه تطمح المؤسسة لبيع نسبة كبيرة من حجم الإنتاج السنوي.

عنوان المشروع: Fabrication des dépôts composites électrolytiques utilisant un biopolymère pour protéger les métaux contre la corrosion

المحور الرابع: خطة الإنتاج والتنظيم

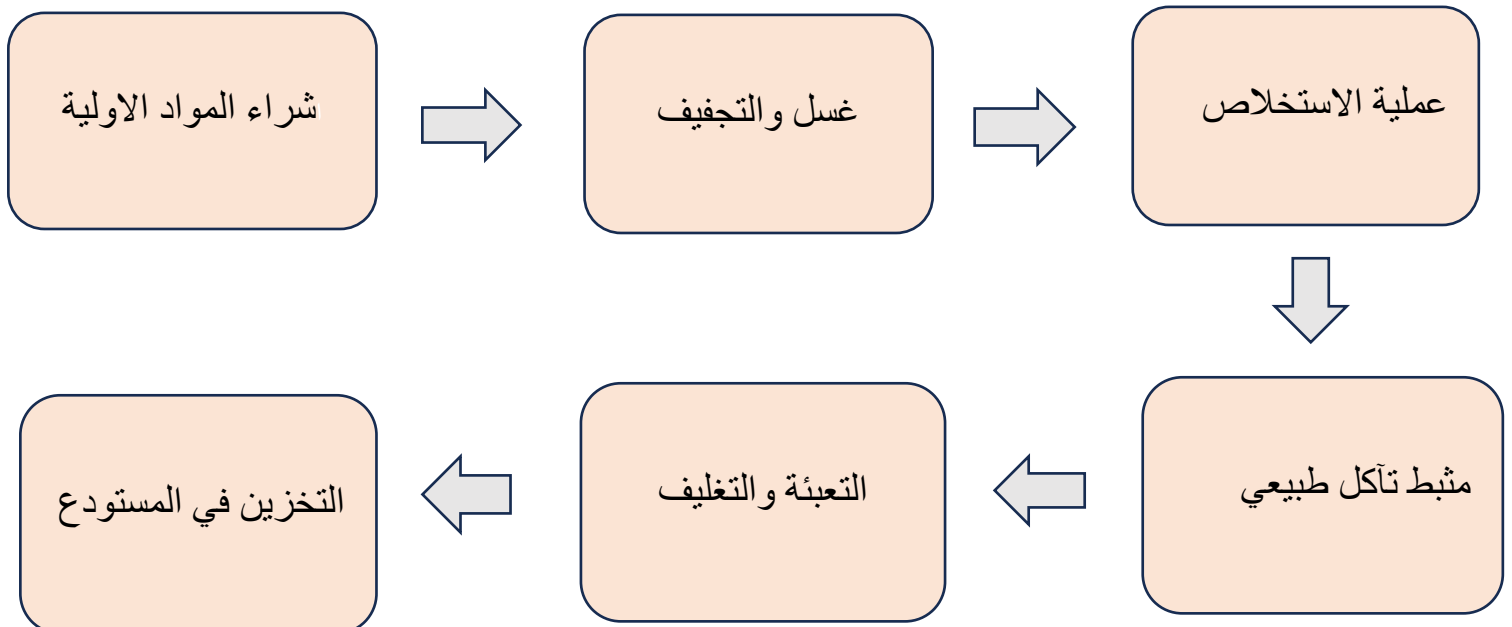
موقع المشروع:



طبيعة الإنتاج

تصنيع طلاءات مركبة كهربائية باستخدام بوليميرات حيوية لحماية المعادن من التآكل.

مخطط الإنتاج



عنوان المشروع: Fabrication des dépôts composites électrolytiques utilisant un biopolymère pour protéger les métaux contre la corrosion

احتياجات المشروع

المواد الأولية: لتجهيز الكمية في الأسبوع الواحد فقط. هذا الجدول قابل للتغيير من ناحية الكمية.

المادة الأولية	النوع	الكمية المطلوبة	سعر الوحدة (DA)	المصدر
نترات النيكل $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$	ملح معدني لتحضير محلول الإلكتروليت	500 غ	500 غ / 2500 دج	Pro labo Algérie
حمض الأسيريك (CH_3COOH)	مذيب لتحضير محلول	1 لتر	1 لتر / 600 دج	شركة كيميائية محلية
ماء مقطر	لتحضير المحاليل	20 لتر	30 دج	مخبر الجامعة
الواح فولاذ او حديد منخفض الكربون	العينات المعدنية للتغطية	10 الواح (5سم×5سم)	150 دج	سوق محلي للمعادن أو مصنع محلي
سلفات النحاس CuSO_4	للتجارب المقارنة او التحسين	200 غ	1200 دج	Pro labo أو مخبر الجامعة
ورق الصنفرة	لتنظيف الاسطح المعدنية	20 ورقة	50 دج	متجر أدوات صناعية
كحول أثيلي	لتنظيف العينات بعد التجربة	1 لتر	800 دج	صيدلية أو شركة كيميائية
اقطاب كهربائية	للإلكترودات أثناء التغطية	2 اقطاب	3000 دج	مخبر الجامعة

عنوان المشروع: Fabrication des dépôts composites électrolytiques utilisant un biopolymère pour protéger les métaux contre la corrosion

الألات والمعدات:

المعدات / الآلات	النوع	الكمية المطلوبة	السعر التقديري (دج)	المصدر
جهاز التغطية الكهروكيميائية	لتنفيذ عملية التغطية الكهروكيميائية	1	300.000/ 600.000	مورد معدات علمية
مصدر تيار كهربائي	لتوفير الجهد	1	500.000/ 150.000	شركات المعدات الالكترونية
ميزان الكتروني دقيق	لوزن المواد بدقة	1	20.000/ 40.000	محل علمي
خلاط مغناطيسي مع سخان	لخلط وتسخين المحاليل	1	25.000/ 70.000	شركات التجهيزات المخبرية
حمام مائي	لتسخين محاليل بدرجات حرارة ثابتة	1	40.000/ 80.000	Pro labo Algérie
PH متر	لقياس درجة الحموضة	1	30.000/ 60.000	Ali أو Pro labo Express
فرن تجفيف	لتجفيف العينات بعد التغطية	1	80.000/ 200.000	مخبر الجامعة أو الموردون

عنوان المشروع: Fabrication des dépôts composites électrolytiques utilisant un biopolymère pour protéger les métaux contre la corrosion

الميكروسكوب بصري	لفحص بنية السطح بصريا بعد التغطية	1	100.000/ 300.000	الجامعة أو شركة تجهيزات بصرية
آلة اختبار التآكل	لتقييم مقاومة التآكل	1	300.000/ 800.000	حسب الميزانية والمصدر
أدوات يدوية ومخبرية	للاستخدامات اليومية في التحضير	عدة	10.000/ 30.000	مخبر الجامعة أو متجر محلي

الموارد البشرية اللازمة للمشروع:

الوظيفة	المهام	عدد الأشخاص
مدير المشروع	الإشراف على سير العمل، التنسيق بين الفرق، متابعة التقدم	1
مشرف تجارب كيميائية	إعداد المحاليل، إجراء التجارب المخبرية، تحليل النتائج	2
فني مختبر	المساعدة في تحضير العينات، تنظيف المعدات، تنفيذ بعض التجارب	2
مهندس تطوير المواد	تصميم وتحسين المواد المستخدمة في التغطية، تطوير التركيبات	1
فني معدات وآلات	صيانة وتشغيل الأجهزة والمعدات المخبرية، ضمان أداء الأجهزة	1

عنوان المشروع: Fabrication des dépôts composites électrolytiques utilisant un biopolymère pour protéger les métaux contre la corrosion

1	متابعة التكاليف، إعداد التقارير المالية، تحليل الميزانية	محاسب
1	تنظيم الوثائق، ترتيب الاجتماعات، متابعة المرسلات	محاسب اداري

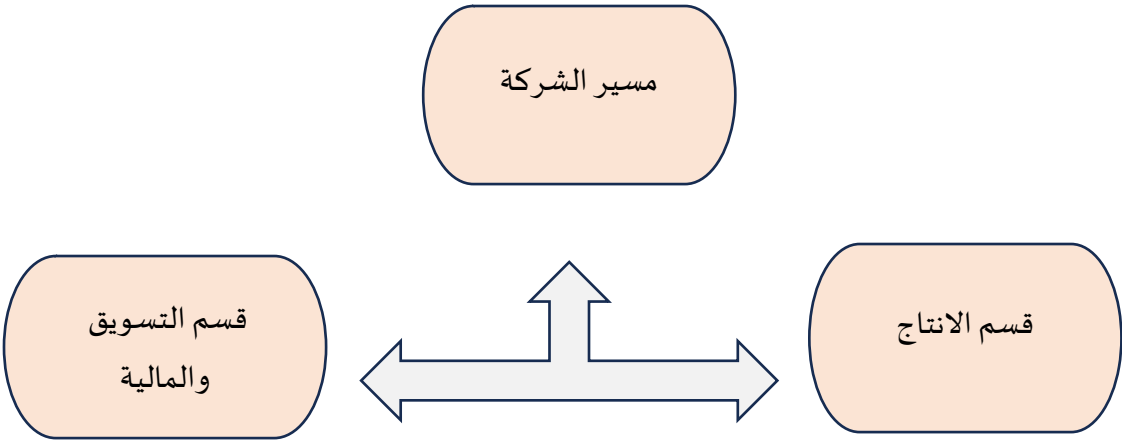
الأثاث والتجهيز:

عنوان المشروع: **Fabrication des dépôts composites électrolytiques utilisant un biopolymère pour protéger les métaux contre la corrosion**

التجهيز/الأثاث	الكمية المطلوبة	السعر التقديري (دج)
طاوولات عمل مخبرية	3	30.000 - 15.000
كراسي مخبرية مريحة	6	15.000 - 5.000
خزائن تخزين (معدنية أو خشبية)	2	20.000 - 10.000
رفوف تخزين	3	8.000 - 3.000
وحدة تخزين خاصة بالأجهزة	1	25.000 - 10.000
جهاز تهوية مع فلتر	1	80.000 - 30.000
لوحات إعلانات	2	3.000 - 1.000
مكيف هواء أو مروحة تهوية	1	30.000 - 10.000
جهاز حاسوب (لإعداد التقارير)	1	70.000 - 30.000
طاولة اجتماعات	1	40.000 - 15.000

عنوان المشروع: Fabrication des dépôts composites électrolytiques utilisant un biopolymère pour protéger les métaux contre la corrosion

المخطط التنظيمي:



المحور الخامس: الخطة المالية PLAN FINANCIER

أولا تكاليف المشروع وامتلاك الاستثمار:

تكاليف المشروع تمثل التكاليف الإجمالية للمشروع في التكاليف الاستثمارية والتكاليف التشغيلية

التكاليف الاستثمارية:

الأصول	التكلفة
الألات والمعدات	2.500.000.00 دج
تجهيزات مكتبية	600.000.00 دج
المجموع	3.100.000.00 دج

التكاليف التشغيلية (الميزانيات التقديرية لسنة واحدة).

الأصول	التكلفة
المواد الأولية	2.500.000.00 دج
أجور العمال	3.000.000.00 دج

عنوان المشروع: Fabrication des dépôts composites électrolytiques utilisant un biopolymère pour protéger les métaux contre la corrosion

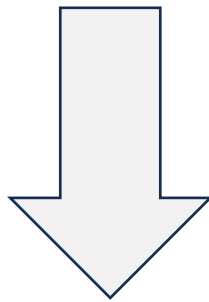
كراء المحل	1.800.000.00 دج
مصاريف الماء والكهرباء	500.000.00 دج
مصاريف النقل	300.000.00 دج
مصاريف الهاتف والإنترنت	250.000.00 دج
مصاريف الإشهار	350.000.00 دج
المجموع	8.700.000.00 دج

الهيكل التمويلي:

سنعتمد في مشروعنا على القروض بنسبة 100% في التمويل.

عنوان المشروع: Fabrication des dépôts composites électrolytiques utilisant un biopolymère pour protéger les métaux contre la corrosion

المحور السادس: النموذج الاولى التجريبي



Fabrication des dépôts composites électrolytiques utilisant un : عنوان المشروع
biopolymère pour protéger les métaux contre la corrosion

➤ الجداول والأشكال

	PREVISION					
Produit A destiné Client	N	N+1	N+2	N+3	N+4	N+5
Quantité produit A	8000	9500	11000	12500	13500	15000
Prix HT produit A	4500	4600	4700	4800	4900	5000
<u>Ventes produit A</u>	36,000,000	43,700,000	51,700,000	60,000,000	66,150,000	75,000,000
CHIFFRE D'AFFAIRES GLOBAL	36,000,000	43,700,000	51,700,000	60,000,000	66,150,000	75,000,000

الملحق رقم 04: نموذج العمل التجاري

الشركات الرئيسية _الجامعة ومخابر البحث _حاضنة الأعمال الجامعية _موردو المواد الخام _وكالات الدعم (CNAC)، (ANADE...)	الأنشطة الرئيسية _تطوير وتحسين تركيبات المثبطات _الإنتاج والتعبئة _التسويق والعلاقات الصناعية _مراقبة الجودة	القيم المقترحة _مثبطات تآكل صديقة للبيئة وفعالة بتكلفة أقل _حماية أطول للمعادن وتقليل تكاليف الصيانة _منتج جزائري بديل للمواد المستوردة	العلاقة مع الزبائن _تقديم دعم فني وتجريبي قبل البيع _عقود صيانة ومرافقة تقنية بعد البيع _زيارات دورية ميدانية وتقييم الأداء	شرائح العملاء _شركات صناعية (صناعة الحديد والصلب، البتروكيماويات، المياه والنقل) _مصانع تعتمد على معدات معدنية معرضة للتآكل _مؤسسات حكومية مهتمة بصيانة البنية التحتية
هيكل التكاليف _تكاليف المواد الخام، التسويق، الإنتاج، النقل وضمان الجودة _أجور الباحثين والموظفين			مصادر الإيرادات _بيع منتج INHIBMET _خدمات إضافية (اختبارات، تحليل، استشارة)	