

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université –Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de Technologie  
Département Des sciences de la matière



Projet de Fin d'Etudes

Dans le cadre de l'arrêté ministériel n°008 modifiant et complétant l'arrêté ministériel  
n°1275

« Un diplôme, une startup / micro entreprise ou brevet d'invention »

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Physique

Filière : Physique

Spécialité : Physique des matériaux

Thème :

**Étude et réalisation de Couches Minces biosourcés Hydrophobes  
et Anti-Poussière pour les surfaces vitrées des panneaux solaires  
photovoltaïques**

Présenté par :

Melle. KADABENABDALLAH Chaimaa

Devant le jury :

Mr. ADJADJ Azeddine

MCA UAT.B.B

Président

Mr. MOHAMEDI Walid

MCA UAT.B.B

Examinateur

Mme. FEKIH Nadia

MCA UAT.B.B

Examinatrice

Mme. BERRICHI Amina

Pr UATB.B

Examinatrice

Mme. FEKIH Zakia

MCB UAT.B.B

Encadrente

Mr. CHIALI Anisse

MCA ESSAT

Co-encadrent

Mr. NEBATTI ECH-CHERGUI Abdelkader

Pr UAT.B.B

Co-encadrent

Mr. HANDAOUI Mahfoud

Pr UAT.B

représentant de l'incubateur

Mme. BAILICHE Zohra

Pr UATB.B

représentant de l'incubateur

Mr. BELGHARES Nadir

Direction de l'énergie et des Mines

Partenaire socio-économique

Année universitaire : 2024-2025

## ***Remerciements :***

Je remercie avant tout Dieu Tout-Puissant pour m'avoir permis d'achever ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude à m'encadrante **Dr. FEKIH Zakia**, enseignante chercheur à Université Belhadj Bouchaib Ain Temouchent, pour son accompagnement précieux, sa bienveillance et son engagement constant tout au long de ce projet.

**Mes sincères remerciements vont aux membres du jury :**

À **Dr. ADJADJ Azeddine**, pour avoir accepté de présider le jury et pour sa présence qui a honoré cette soutenance.

À **Dr. MOHAMEDI Walid**, **Dr. FEKIH Nadia** et **Pr. BERRICHI Amina**, examinateurs de ce travail, pour avoir pris le temps de l'examiner et d'y apporter un regard critique et constructif.

Je tiens à remercier **Dr. CHIALI Anisse**, Co-encadrant, pour m'avoir accueillie au laboratoire URMER de l'Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen, et pour m'avoir donné la chance de réaliser ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à **Dr. NEBATTI ECH-CHERGUI Abdelkader**, mon Co-encadrant m'avoir orientée vers le laboratoire des Matériaux de l'École Nationale Polytechnique Maurice Audin d'Oran (ENPOMA). Où j'ai pu réaliser l'essentiel de la partie expérimentale de ce travail.

Je remercie **Pr. HANDAOUI Mahfoud** et **Pr. BAILICHE Zohra** pour leur soutien et la confiance accordée dans le cadre de l'incubation de ce projet.

Je voudrais remercier aussi toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à mes recherches

## ***Dédicaces :***

### ***À mes précieux parents***♥

Vous êtes les racines silencieuses de tout ce que j'ai pu construire. Votre amour inconditionnel, votre patience infinie et vos sacrifices quotidiens ont été le souffle discret qui a porté chacun de mes pas.

Si ce travail marque une étape dans mon parcours, il est surtout le reflet de tout ce que vous m'avez transmis : la persévérance, l'humilité, et la foi en l'effort.

À vous, je dois bien plus que des mots. Tout cela, grâce à vous

Je vous aime profondément.

Et à mes chères sœurs, *Ikram*, *Yousra* et *Meriem*, merci pour votre affection, votre présence réconfortante dans les moments où j'en avais le plus besoin, et votre complicité qui ont toujours été un refuge pour moi

*Wahid*, je veux te remercier du fond du cœur, pour ta confiance en mes capacités, ton soutien mais inestimable, tes encouragements et ta présence qui ont compté plus que tu ne l'imagines.

À mes enseignants, toute ma gratitude et mon respect

À mes amies et collègues de parcours, celles et ceux qui ont partagé les bancs de la fac, les longues soirées de révision, les doutes comme les réussites

Merci pour votre présence, votre soutien et votre bienveillance à chaque étape de ce chemin.

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I :Revêtements fonctionnels</b> .....	4
I.2 Généralités sur les couches minces fonctionnelles : .....	4
I.2.1 Définition : .....	4
I.2.2. Couches minces fonctionnelles : .....	4
I.3. Importance des couches minces fonctionnelles : .....	5
I.4 Importance des revêtements hydrophobes et anti-poussière dans les domaines de l'énergie solaire, du bâtiment et de l'automobile : .....	6
I.4.1 L'énergies solaire : .....	6
I.4.2 Bâtiment : .....	7
I.4.3. Automobiles : .....	8
I.5 Contexte environnemental et économique : .....	9
I.5.1 Solution écologiques : .....	9
I.6 Matériaux biosourcés : .....	10
I.6.1 Définition : .....	10
I.6.2 Matériaux biosourcés utilisé : .....	10
I.6.3. Comparaison avec les solutions conventionnelles : .....	11
I.7 Principaux avantages du technique Dip-Coating pour la production revêtement et adaptables a des surfaces diverses : .....	12
I.8 Conclusion : .....	12
<b>Chapitre II:Matériaux Biosourcés et Méthodologies Expérimentales</b> .....	17
II.1 Introduction : .....	17
II.2 Sélection et Préparation des Matériaux Biosourcés : .....	17
II.2.1 Critères de sélection les matériaux : .....	17
II.3Présentation des matériaux retenus : .....	18
II.3.1Les huiles essentielles : .....	18
II.3.2 Les solvants écologiques : .....	19
II.3.3 Stabilisants naturels : .....	20
II.4 Justification du choix des matériaux sélectionnés : propriétés antistatiques, hydrophobe, compatibilité écologique : .....	21
II.4.1 Huile essentielle : .....	21
II.4.2 Les stabilisants naturels : .....	22
II.4.3 Les solvants écologiques : .....	22

II.5 Méthode de revêtement Dip-Coating : .....	23
II.5.1 Définition : .....	23
II.5.2 L'objectif : .....	24
II.5.3 Principe et technique du Dip-Coating : .....	24
II.5.4 Paramètre d'application : .....	25
II.5.5 Comparaison entre le Dip-Coating et la Pulvérisation pour l'Application de Revêtements : .....	26
II.6 Protocole Détaillé de Préparation, d'Application et de Séchage des Revêtements Biosourcés : .....	27
II.6.1 Préparation de la Solution de Revêtement Biosourcé : .....	27
II.6.2 Préparation de la Solution : .....	27
II.6.3 Application du Revêtement (Techniques de Dépôt) : .....	28
II.7 Conclusion : .....	30
<b>Conclusion générale</b> .....	65
<b>Perspectives</b> .....	78
<b>Résumé</b> .....	80

### **Liste des tableaux :**

<b>Tableaux 1 :Présentation des avantages et des limites des matériaux biosourcés par rapport aux matériaux synthétiques.</b> .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
---	------------------------------------

### **Listes des figures :**

<b>Figure 1:</b> des panneaux solaires recouverts par des revêtements hydrophobes autonettoyants .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure 2:</b> Schéma du dispositif expérimental lors des mesures : ...	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure 3:</b> Effet antistatique des panneaux photovoltaïques solaires : (A) Panneau non revêtu (panneau de référence), (B) Panneau photovoltaïque revêtu de nanomatériau hydrophobe .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure 4:</b> montage d'extraction par Hydrodistillation type lyvenger. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure 5:</b> montage d'extraction par Hydrodistillation type Clyvenger. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure 6:</b> d-limonène extrait de citron .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure 7:</b> principales étapes du dip-coating .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>



# ***Introduction générale***

## *Introduction générale*

---

Les installations photovoltaïques (PV) dans les zones désertiques telles que le Moyen-Orient, l'Afrique, les pays à quatre saisons et les zones industrielles souffrent d'une perte d'efficacité due à l'accumulation de poussière, de chutes de neige et de saletés aéroportées provenant des usines. L'encrassement résultant de l'accumulation de saletés entrave la conversion de la lumière en électricité, ce qui dégrade les performances du système photovoltaïque. C'est pourquoi les panneaux photovoltaïques doivent être nettoyés régulièrement afin de maintenir une performance stable [1].

Il existe plusieurs méthodes de nettoyage des panneaux photovoltaïques, que l'on peut classer en deux catégories : (1) les méthodes traditionnelles de nettoyage manuel et (2) les méthodes d'auto-nettoyage ou de nettoyage automatisé. L'approche traditionnelle du nettoyage manuel présente de nombreuses limites, car elle prend du temps et le processus peut entraîner des fissures à la surface du panneau avec le temps, en raison du brossage. En outre, l'approche traditionnelle peut ne pas éliminer totalement les petites particules. D'autre part, l'approche du nettoyage automatique applique différentes méthodes de nettoyage, telles que les méthodes électrostatiques, les méthodes mécaniques et les méthodes de revêtement. Alors que les méthodes électrostatiques et les méthodes mécaniques automatisées consomment de l'énergie supplémentaire provenant des systèmes solaires photovoltaïques, et donc plus de coûts, l'utilisation de méthodes de revêtement pour le nettoyage des panneaux ne consomme pas d'énergie[2].

Pour optimiser le rendement global des panneaux solaires photovoltaïques, un nettoyage fréquent s'avère indispensable. Toutefois, cette opération est généralement coûteuse, chronophage et énergivore. Il devient donc essentiel de développer des méthodes de nettoyage innovantes, capables de fonctionner de manière autonome, sans consommer ni temps ni énergie.

Par ailleurs, L'impact environnemental négatif de l'industrie chimique est essentiellement causé par des synthèses dangereuses, une surproduction de gaz à effet de serre. Par ailleurs, la grande consommation de matériaux non renouvelables conduit à l'épuisement de ces ressources, il est donc nécessaire de les remplacer par des produits renouvelables.

A la fin des années 90, Paul Anastas et John Warner ont introduit le concept d'une chimie plus respectueuse: la chimie verte.[3]

## *Introduction générale*

---

Dans ce contexte, l'intérêt croissant pour l'amélioration du comportement des revêtements, justifie des efforts de recherche accrus afin de fournir de nouvelles solutions efficaces pour une protection durable. Les tendances récentes dans ce domaine comprennent l'utilisation de produits naturels bio- extraits, huiles essentielles, cires, résines, biopolymères, agents de contrôle biologique - pour lesquels le principal critère de classification est représenté par le type de protection fourni.[4] Ces matériaux ont été choisis pour leurs propriétés hydrophobes et anti-poussière, assurant une protection efficace des surfaces vitrées contre les agressions environnementales. Ils sont également écologiques et compatibles avec les principes du développement durable.

Ce projet de master, au profil résolument orienté startup, se démarque par son approche innovante visant à élaborer des revêtements utilisant des matériaux biosourcés et naturellement disponibles. Ces couches minces, développée grâce à des méthodes simples telles que le dip-coating, appliquées sur des surfaces vitrées et transparentes, sont conçues pour accroître leur résistance à la poussière et aux contaminants aqueux tout en maintenant une excellente transparence.

Notre travail est présenté dans ce manuscrit structuré en trois parties comme suit :

- Le premier chapitre est une étude documentaire de la couche mince, de son concept, de son application et l'importance des revêtements hydrophobes et anti-poussière dans divers secteurs.
- Le deuxième chapitre est consacré à la méthode de réalisation de couches minces biosourcées à travers la sélection de matériaux naturels adaptés. Le protocole de dépôts par dip-coating est détaillé, en précisant les paramètres d'application pour garantir une couche uniforme.

La justification de cette méthode par rapport à d'autres techniques est expliquées sur les plan économique et technique.

- Le troisième chapitre final est Partie expérimental et présente les différentes caractérisations effectuées sur les couches obtenues (transparence, hydrophobie, anti-poussière), les protocoles de test, tels que la spectrophotométrie, l'adhérence de la poussière et la durabilité, sont expliqués.

## *Introduction générale*

---

Au final, nous terminons le travail par une conclusion générale qui résume les différentes étapes et les différents résultats obtenus dans ce travail.

### **Références bibliographique:**

- [1] A. Syafiq, A. K. Pandey, N. N. Adzman, et N. A. Rahim, « Advances in approaches and methods for self-cleaning of solar photovoltaic panels », *Sol. Energy*, vol. 162, p. 597-619, mars 2018, doi: 10.1016/j.solener.2017.12.023.
- [2] H. R. Alamri, H. Rezk, H. Abd-Elbary, H. A. Ziedan, et A. Elnozahy, « Experimental Investigation to Improve the Energy Efficiency of Solar PV Panels Using Hydrophobic SiO<sub>2</sub> Nanomaterial », *Coatings*, vol. 10, n° 5, p. 503, mai 2020, doi: 10.3390/coatings10050503.
- [3] Ould-Chikh, M., « Contribution au développement de matériaux biosourcés pour des applications environnementales », Université Paris, Paris, France, 2020.
- [4] C.-A. Teacă et al., « Natural bio-based products for wood coating and protection against degradation: A Review », *BioResources*, vol. 14, n° 2, p. 4873-4901, févr. 2019, doi: 10.15376/biores.14.2.Teaca.

# *Chapitre I*

## *Revêtements fonctionnels*

## **I.1 Introduction :**

Les couches minces fonctionnelles sont largement utilisées pour améliorer les propriétés de surface des matériaux dans divers domaines comme l'énergie, le bâtiment et l'automobile. Elles confèrent des fonctions spécifiques telles que l'hydrophobie, la transparence ou la résistance à l'usure. Toutefois, les matériaux synthétiques couramment utilisés soulèvent des enjeux environnementaux. Le recours à des matériaux biosourcés constitue une alternative durable prometteuse. Ce chapitre présente les fondements scientifiques des couches minces et discute de leur intérêt dans une démarche d'éco-innovation, en préparation à l'étude expérimentale menée dans ce mémoire.

## **I.2 Généralités sur les couches minces fonctionnelles :**

### **I.2.1 Définition :**

Une couche mince est un matériau dont l'épaisseur, généralement exprimée en micromètres ou en nanomètres, est très faible par rapport à ses deux autres dimensions. Ce rapport d'échelle confère au matériau un comportement quasi bidimensionnel, particulièrement important dans de nombreuses applications technologiques [1].

La distinction principale entre un matériau massif et une couche mince réside dans l'importance des effets de surface. Dans les matériaux massifs, ces effets sont souvent négligés au profit des propriétés volumiques. À l'inverse, dans une couche mince, ce sont justement les interactions aux interfaces et les phénomènes liés aux surfaces qui dominent les propriétés physiques et chimiques du système [2]. Plus l'épaisseur est faible, plus ces effets deviennent significatifs. Toutefois, au-delà d'une certaine épaisseur, le matériau tend à retrouver les propriétés classiques de son état massif.

Les couches minces offrent ainsi une large gamme d'avantages fonctionnels. Elles permettent, par exemple, de réduire la réflexion lumineuse ce qui est essentiel pour la fabrication de revêtements antireflet sur les surfaces vitrées, les verres optiques ou les écrans d'affichage. Elles peuvent aussi contribuer à améliorer la conductivité de surface, ou à protéger les matériaux contre la corrosion et l'usure, selon les propriétés du matériau déposé [3].

### **I.2.2. Couches minces fonctionnelles :**

Les couches minces fonctionnelles sont des dépôts de matériaux de l'ordre du nanomètre à quelques micromètres d'épaisseur, possédant des propriétés spécifiques

(électriques, optiques, mécaniques, etc.) qui leur confèrent une fonction particulière dans diverses applications technologiques et de revêtements optiques, ainsi que dans la préparation de revêtements antireflets. [4]

Les couches minces jouent un rôle fondamental dans l'amélioration des propriétés des matériaux en modifiant leurs caractéristiques physiques, chimiques et optiques grâce à différentes techniques de dépôt et de caractérisation [5]

### **I.3. Importance des couches minces fonctionnelles :**

Les **couches minces fonctionnelles** sont devenues des composants clés dans de nombreux domaines scientifiques et industriels, en raison de leur capacité à conférer aux matériaux de base des **propriétés de surface spécifiques**, sans modification structurelle en profondeur. Leur importance se manifeste dans des secteurs variés, notamment l'optoélectronique, les capteurs chimiques et biologiques, ainsi que les revêtements protecteurs.

#### *I.3.1 Applications en optoélectronique et photovoltaïque :*

Les cellules photovoltaïques sont des dispositifs composés de matériaux semi-conducteurs capables de convertir l'énergie solaire en électricité. L'effet photovoltaïque du matériau utilisé est responsable de cette transformation, permettant ainsi de capter l'énergie des photons reçus et de libérer des porteurs de charge de la bande de valence vers la bande de conduction [6]. Elles possèdent une expertise dans l'élaboration de nanomatériaux et de nanocristaux semi-conducteurs, ainsi que dans la fonctionnalisation optique et électrique des couches minces [7].

#### *I.3.2 Capteurs chimiques et biologiques :*

Les couches minces nanostructurées sont employées dans la fabrication de capteurs à haute sensibilité pour la détection de diverses substances chimiques et biologiques. Elles permettent la réalisation de dispositifs innovants ou le développement de surfaces fonctionnalisées présentant des propriétés avancées. [8]

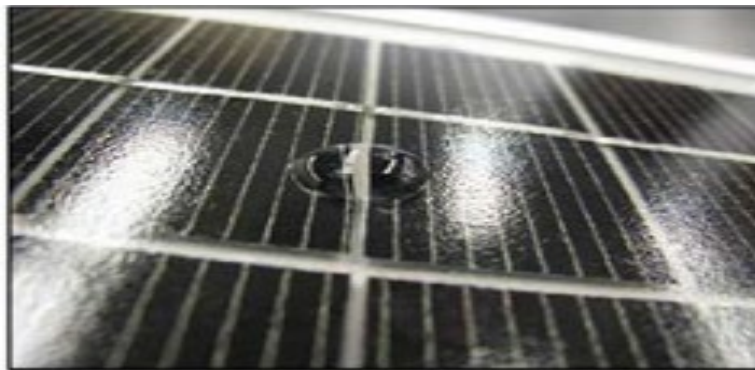
#### *I.3.3 Revêtements protecteurs :*

Les revêtements de protection déposés sous pression atmosphérique présentent une microstructure nanocristalline, conférant au matériau des propriétés mécaniques améliorées et une résistance accrue à la corrosion [9]

## I.4 Importance des revêtements hydrophobes et anti-poussière dans les domaines de l'énergie solaire, du bâtiment et de l'automobile :

### I.4.1 L'énergies solaire :

Le nano-revêtement hydrophobe, utilisé pour le revêtement des panneaux photovoltaïques solaires, est un concentré d'imprégnation formant un film transparent. Ce film protège les surfaces traitées contre l'accumulation de poussière, saletés etc. Le principe fondamental de l'utilisation les nano-revêtement hydrophobes repose sur la formation d'une barrière qui induit l'accumulation de l'eau sous forme de gouttelettes sphériques. Lorsque les panneaux solaires sont installés sous un angle incliné, ces gouttelettes, en raison de leur faible adhésion à la surface, roulent le long du panneau par effet gravitationnel, comme illustré à la **Figure I.1.** [10]



***Figure I.1:*** des panneaux solaires recouverts par des revêtements hydrophobes autonettoyants

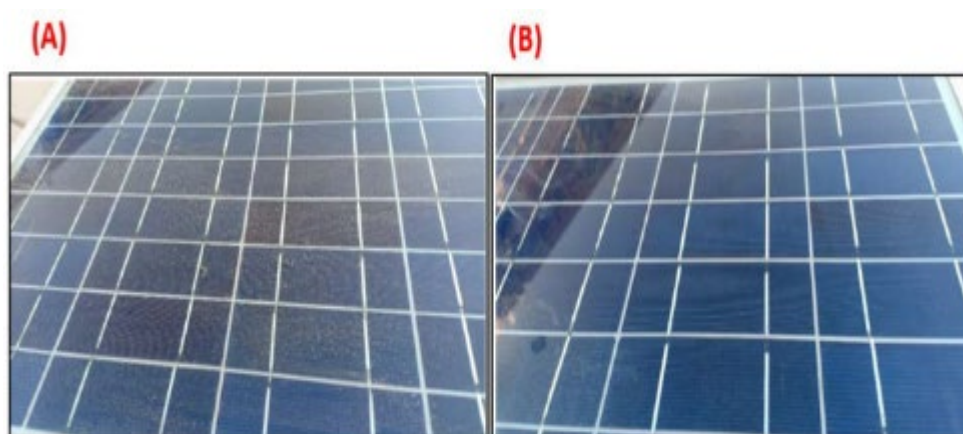
L'effet antistatique du nano-revêtement hydrophobe à base permet la dispersion des gouttelettes d'eau et la formation d'une fine couche offrant une résistance réduite au passage des photons. Les petites gouttelettes d'eau se rejoignent et s'écoulent facilement sur la surface du panneau, comme illustré à la **Figure I.2** [10].



**Figure I.2 : Schéma du dispositif expérimental lors des mesures :**

(A) Panneau autonettoyant revêtu de nanomatériau hydrophobe, (B) Panneau non revêtu — nettoyage manuel, (C) Panneau poussiéreux, maintenu dans cet état durant toute l'expérience (référence), (D) Charge (résistance variable), (E) Dispositif de mesure.

L'écoulement de l'eau entraîne l'élimination des particules de poussière, contrairement aux panneaux non revêtus où l'eau stagnante peut former une couche de boue en surface, comme montré à la **Figure I.3**. De plus, à des vitesses de vent élevées, le processus d'auto-nettoyage est renforcé, améliorant ainsi l'efficacité globale des panneaux photovoltaïques revêtus [10].



**Figure I.3: Effet antistatique des panneaux photovoltaïques solaires :** (A) Panneau non revêtu (panneau de référence), (B) Panneau photovoltaïque revêtu de nanomatériau hydrophobe

#### I.4.2 Bâtiment :

Présentent des propriétés autonettoyantes favorables contre les différents types d'est particulièrement bénéfique pour les bâtiments, car elle facilite l'entretien des surfaces en réduisant l'accumulation de saletés et de poussière, tout en offrant une protection contre la

corrosion[11]. Deux chercheurs de Virginia Tech se sont intéressés à ce que l'on appelle couramment 'l'effet lotus', un phénomène de super-hydrophobie causé par une rugosité nanométrique et inspiré des feuilles de la plante aquatique du même nom, phénomène qui accorde à une surface des capacités autonettoyantes [12]. Certains revêtements nanométriques appliqués sur les surfaces vitrées, notamment à base de dioxyde de titane, confèrent aux fenêtres un caractère autonettoyant en réduisant l'adhérence de l'eau et des salissures. Ces traitements permettent de limiter les opérations d'entretien tout en préservant la transparence et l'efficacité énergétique des bâtiments [13].

### **I.4.3. Automobiles :**

Les revêtements hydrophobes ont des applications pratiques dans de nombreux domaines, y compris dans l'industrie automobile. Ces revêtements offrent de nombreux avantages pour les véhicules, et leur utilisation est de plus en plus répandue. En effet, les revêtements hydrophobes agissent comme une barrière contre l'eau et d'autres liquides, ce qui les rend extrêmement utiles pour protéger les surfaces des voitures.

L'un des principaux avantages des revêtements hydrophobes dans l'industrie automobile est leur capacité à repousser l'eau et à réduire la formation de traces d'eau et de dépôts minéraux. Cela signifie que les surfaces traitées avec des revêtements hydrophobes restent propres plus longtemps et sont plus faciles à nettoyer. En outre, ces revêtements peuvent également protéger la carrosserie de la voiture contre la corrosion et les dommages causés par l'exposition à l'eau et à l'humidité.

Un autre avantage important est que les revêtements hydrophobes peuvent améliorer la visibilité pendant la conduite sous la pluie. En empêchant l'accumulation d'eau sur les vitres, ces revêtements permettent de maintenir une vision claire, ce qui contribue à la sécurité des conducteurs. De plus, l'application de revêtements hydrophobes sur les surfaces extérieures des voitures peut également réduire la traînée aérodynamique, ce qui peut améliorer l'efficacité énergétique et réduire la consommation de carburant.

Les revêtements hydrophobes offrent de nombreux avantages pour l'industrie automobile, notamment en termes de protection, de sécurité et d'efficacité. Leur utilisation continue de croître, et il est probable qu'ils deviendront bientôt un élément standard dans la fabrication et l'entretien des véhicules [14].

## **I.5 Contexte environnemental et économique :**

Le développement de projets issus des énergies renouvelables est justifié par des considérations environnementales, stratégiques et énergétiques. Cependant, ces dernières sont loin d'être neutres énergétiquement et créent le débat voire de vifs conflits. La volonté de lutter contre le changement climatique et le développement de processus plus durables ne doivent pas occulter la face cachée des énergies renouvelables. Le déploiement de celles-ci ne doit pas cacher les incidences sur différentes sphères : sociales, économiques et environnementales [15]. La réduction des impacts environnementaux peut représenter des investissements considérables pour les entreprises industrielles. Confrontées, d'une part, à des pressions réglementaires ou sociétales exigeant l'adoption de systèmes de dépollution efficaces et, d'autre part, à des contraintes économiques et concurrentielles qui limitent les investissements non productifs, ces entreprises ont souvent une marge de manœuvre très étroite [16].

### **I.5.1 Solution écologiques :**

#### ***I.5.1.1 L'éco conception :***

L'éco conception c'est l'intégration systématique des aspects environnementaux dès la conception et le développement avec pour objectif la réduction des impacts environnementaux négatifs tout au long de leur cycle de vie à service rendu équivalent ou supérieur. Cette approche dès l'amont d'un processus de conception vise à trouver le meilleur équilibre entre les exigences, environnementales, sociales, techniques et économiques dans la conception et le développement. L'éco conception cherche à améliorer le fonctionnement écologique à préserver les ressources et à en générer de nouvelles pour l'homme et à promouvoir une approche plus résiliente de l'environnement bâtis. En tant qu'approche et processus interactifs ; l'éco conception inclut aussi bien les hommes que la faune et applique les meilleures théories scientifiques disponibles pour créer un environnement résilient et durable [17].

#### ***I.5.1.2 L'éco-innovation :***

L'éco-innovations désigne toute forme d'innovation permettant de réaliser des progrès environnementaux significatifs et contribuant aux objectifs de développement durable c'est intégrer les critères du développement durable dans les processus industriels par l'innovation tels que: un procédé de récupération de substances valorisables des eaux usées un emballage alimentaire plus efficace une production de matériaux de construction à partir de déchets recyclés ; des nouvelles méthodes de management.

La démarche d'éco-innovation développée pour intégrer la dimension environnementale se transpose très naturellement pour intégrer également la dimension sociale ou sociétale. « Plus écologique » s'élargit alors en « Plus responsable » [17].

### ***1.5.1.3 Matériaux de la ressource naturelle :***

Un éco matériau dit « matériau écologique » ou « matériau biosourcé » et parfois aussi qualifié de « matériau sain ») est un matériau naturel des matériaux issus de la biomasse d'origine végétale ou animale, qui répond à des critères environnementaux ou socio-environnementaux, tout au long de son cycle de vie (c'est-à-dire de sa production à son élimination ou recyclage). Ces matériaux répondent aux critères et principes du développement durable.

L'intérêt des matériaux biosourcés tant d'un point de vue environnemental (stockage de carbone, renouvelable de la matière première, faibles besoins en énergie grise non renouvelable) que d'un point de vue économique, en contribuant au maintien. [18]

## **I.6 Matériaux biosourcés :**

### **I.6.1 Définition :**

Les matériaux biosourcés sont des matériaux issus de la biomasse d'origine végétale ou animale [19]. Ces matériaux proviennent de ressources naturelles renouvelables telles que le bois, la paille, le chanvre, le coton, le lin, les algues, et bien d'autres encore. Ils se distinguent par leur origine naturelle et leur capacité à être régénérés sur le long terme, ce qui en fait des alternatives durables aux matériaux traditionnels. Les matériaux biosourcés offrent également des avantages en termes de performance, ce qui en fait des choix attrayants pour les projets de rénovation axés sur la durabilité et l'efficacité énergétique. En outre, leur utilisation contribue à réduire l'empreinte carbone en favorisant une approche plus respectueuse de l'environnement dans le secteur de la construction [20].

### **I.6.2 Matériaux biosourcés utilisés :**

- **Les biopolymères:** sont des macromolécules organiques constituées d'unités répétitives et produites par des organismes vivants [21].
- **Huiles essentielles :** Les huiles essentielles sont des mélanges de composés lipophiles, volatils et souvent liquides qui sont stockés dans des tissus végétaux spécialisés et extraits des plantes grâce à des procédés physiques [22].

### I.6.3. Comparaison avec les solutions conventionnelles :

Voici un tableau comparatif des *matériaux biosourcés* et *matériaux synthétiques*, en mettant en avant leurs avantages et leurs limites par rapport aux solutions conventionnelles :

Critères	Matériaux biosourcés	Matériaux synthétiques
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Faible impact environnemental (renouvelables, biodégradables)</li> <li>• Bonne régulation thermique et hygrométrique.</li> <li>• Faible émission de CO<sub>2</sub> lors de la fabrication</li> <li>• Confort acoustique élevé [23].</li> <li>• Soutien des filières locales et agriculture durable.</li> <li>• recyclables [24]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bonnes caractéristiques mécaniques transverses</li> <li>• La possibilité d'utilisation à des températures élevées <ul style="list-style-type: none"> <li>• Une bonne conductibilité électrique et thermique et mécanique [25]</li> </ul> </li> </ul>
Limites	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durabilité parfois inférieure.</li> <li>• Nécessité d'un traitement contre les moisissures.</li> <li>• Les attaques d'insectes ou le feu.</li> <li>• Ressources très localisées ou insuffisantes. [26]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le coût élevé des matières premières et des procédés de fabrication.</li> <li>• La gestion complexe des déchets en fin de vie en raison de leur caractère thermostable. [27]</li> <li>• Émissions de substances toxiques possibles (COV, additifs chimiques).</li> <li>• Fabrication énergivore et dépendante des ressources fossiles. [28]</li> </ul>

**Tableau I.1:** Présentation des avantages et des limites des matériaux biosourcés par rapport aux matériaux synthétiques.

## I.7 Principaux avantages de la technique Dip-Coating pour la production revêtement et adaptables a des surfaces diverses :

Le **dip-coating** est une technique de dépôt largement utilisée pour la fabrication de films minces, notamment dans les domaines des matériaux fonctionnels et des nanotechnologies, procédé de cette technique présente plusieurs atouts :

- **Uniformité des films déposés** : Cette méthode permet d'obtenir des films homogènes, même sur des surfaces complexes.
- **Contrôle précis de l'épaisseur** : L'épaisseur du film peut être ajustée en modifiant la vitesse de retrait du substrat.
- **Simplicité et faible coût** : Contrairement à d'autres techniques de dépôt, le dip-coating ne nécessite pas d'équipements coûteux.
- **Grande adaptabilité des matériaux** : Il est possible de déposer une large gamme de matériaux (oxydes, polymères, nanoparticules).
- **Haute reproductibilité** : Cette technique permet de produire des films de manière cohérente et répétable [29].

En résumé, le Dip-Coating sol-gel est une méthode polyvalente et économique Procédé sol-gel (Dip-Coating) déposer des films minces avec des propriétés adaptées, ce qui en fait une technique précieuse pour des applications diverses dans les domaines de la science des matériaux, de l'optique, de l'électronique [30].

## I.8 Conclusion :

Pour terminer, ce chapitre a révélé l'impact des couches minces fonctionnelles dans les différents domaines d'application. Leur intangible contributoire aide à doper l'efficacité, la longévité, et l'optimisation énergétique d'un système. Aussi, le recours à l'éco-innovation comme les matériaux biosourcés et l'éco-conception constituent une nouvelle manière intelligente et durable de réduire l'impact écologique. De plus, le développement technologique de certaines techniques de dépôts, et notamment le dip-coating sol-gel, rend l'obtention de films minces de matières aux propriétés intéressantes possible, ce qui ouvre de nouvelles perspectives scientifiques et industrielles.

---

### Références bibliographiques :

- [1] L. Herissi, « Élaboration par pulvérisation pyrolytique et caractérisation de couches minces semi-conductrices et transparentes d'oxyde de zinc : Perfectionnement du système de dépôt », Université Larbi Ben M'hidi-Oum El Bouaghi, Oum El Bouaghi Algérie, 2008. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.researchgate.net/publication/338127555>
- [2] S. Bennour, « Élaboration et caractérisation des couches minces d'oxyde de zinc (ZnO) déposées par spray pyrolyse », Université Kasdi Merbah Ouargla, Ouargla, Algérie, 2016. [En ligne]. Disponible sur: [https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/35284/1/BENNOUR-Sara.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/35284/1/BENNOUR-Sara.pdf?utm_source=chatgpt.com)
- [3] M. Gourier, *Introduction aux couches minces et au revêtement : enjeux et applications*, FILAB Laboratoire d'Analyses&D'Expertises. 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://filab.fr/blog/2023/06/introduction-couches-minces-revetement/>
- [4] D. L. Smith et D. W. Hoffman, « *Thin-Film Deposition: Principles and Practice* », *Phys. Today*, vol. 49, n° 4, p. 60-62, avr. 1996, doi: 10.1063/1.2807590.
- [5] Linda Aissani, Zied Driss, et Nourredine Belghar, *Élaboration et caractérisation des couches minces*, Presses Académiques Francophones. 2022.
- [6] M. Z. Azizi et A. K. Ben Seddik, « Élaboration et caractérisation des couches minces de ZnO pour les applications optoélectroniques », Université Kasdi Merbah Ouargla, Ouargla, Algérie, 2024. [En ligne]. Disponible sur: [https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/36905/1/AZIZI%20Mohammed%20Ziad%2BBEN%20SEDDIK%20Ahmed%20Karam.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/36905/1/AZIZI%20Mohammed%20Ziad%2BBEN%20SEDDIK%20Ahmed%20Karam.pdf?utm_source=chatgpt.com)
- [7] Institut Jean Lamour, « Étude, élaboration et fonctionnalisation de couches minces pour les dispositifs de télécommunication optique et le photovoltaïque », Université de Lorraine, France, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://ijl.univ-lorraine.fr/etude-elaboration-et-fonctionnalisation-de-couches-minces-pour-les-dispositifs-de-telecommunication>
- [8] Laboratoire des Matériaux et du Génie Physique (LMGP), « Couches minces fonctionnelles et nano-ingénierie des surfaces (FunSurf) », Grenoble INP - UGA, Grenoble France, 2025. [En ligne]. Disponible sur: [https://lmgp.grenoble-inp.fr/fr/recherche/couches-minces-fonctionnelles-et-nano-ingenierie-des-surfaces-funsurf?utm\\_source=chatgpt.com](https://lmgp.grenoble-inp.fr/fr/recherche/couches-minces-fonctionnelles-et-nano-ingenierie-des-surfaces-funsurf?utm_source=chatgpt.com)

- [9] A. Douard, F. Frade Suarez, J.B. Jorcin, M. Nadal, N. Pébère, et F. Maury, « Revêtements de protection à base de chrome déposés sous pression atmosphérique par MOCVD et DLI-CVD : microstructure, propriétés mécaniques et résistance à la corrosion », Nancy, France, 2005. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iuvsta.org/iuvsta2/assets/docs/pdf/volume.pdf>
- [10] H. R. Alamri, H. Rezk, H. Abd-Elbary, H. A. Ziedan, et A. Elnozahy, « Experimental Investigation to Improve the Energy Efficiency of Solar PV Panels Using Hydrophobic SiO<sub>2</sub> Nanomaterial », *Coatings*, vol. 10, n° 5, p. 503, mai 2020, doi: 10.3390/coatings10050503.
- [11] L. Xu, « Synthèse et caractérisation des revêtements superhydrophobes à base de caoutchouc de silicone pour la protection contre la corrosion », Université du Québec à Chicoutimi, Québec Canada, 2020. [En ligne]. Disponible sur: [https://constellation.uqac.ca/id/eprint/4535/1/Xu\\_uqac\\_0862N\\_10443.pdf](https://constellation.uqac.ca/id/eprint/4535/1/Xu_uqac_0862N_10443.pdf)
- [12] Techniques de l'Ingénieur, « S'inspirer de l'effet lotus pour créer un revêtement superhydrophobe », 2014. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/sinspirer-de-leffet-lotus-pour-creer-un-revetement-superhydrophobe-2390/>
- [13] Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail, « Les nanomatériaux : effets sur la santé de l'homme et sur l'environnement », Afsset, 2006. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/AP2005et0010Ra.pdf>
- [14] FFPEA, « Les applications pratiques des revêtements hydrophobes », 2025, [En ligne]. Disponible sur: <https://ffpea.fr/les-applications-pratiques-des-revetements-hydrophobes/>
- [15] I. Nya, « La face cachée des énergies renouvelables », *Territ. En Mouv.*, n° 55, déc. 2022, doi: 10.4000/tem.8418.
- [16] O. Boiral, « Environnement et économie : une relation équivoque », *Vertigo*, vol. 5-2, 2004, doi: 10.4000/vertigo.3386.
- [17] F. Fekari Ouarda et A. Ferkous, « De l'éco-conception à l'éco-innovation : Conception d'un quartier résidentiel dans la ville nouvelle d'El-Ménéaa », Université Saad Dahlab Blida 1, Algérie, Blida Algérie, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://di.univ-blida.dz/jspui/bitstream/123456789/1569/1/4.720.1374.pdf>

- [18] N. Aiache et S. Zouaoui, « Matériaux innovants : propriétés et utilisation », Université 8 Mai 1945 de Guelma, Guelma Algérie, 2017. [En ligne]. Disponible sur: <https://dspace.univ-guelma.dz/xmlui/handle/123456789/696>
- [19] F. Amoura et M. Leham, « Revalorisation de l'architecture vernaculaire Kabyle à travers les matériaux biosourcés », Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Tizi-Ouzou, Algérie, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://dspace.ummtto.dz/items/3399c718-772f-428b-9189-1dfbc7eba7bf>
- [20] B. Eugene, « Eugene Becker ». [En ligne]. Disponible sur: <https://ecopedia.fr/blog/79/>
- [21] L. J. Stal, « Biopolymer », in *Encyclopedia of Astrobiology*, M. Gargaud, R. Amils, J. C. Quintanilla, H. J. Cleaves, W. M. Irvine, D. L. Pinti, et M. Viso, Éd., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, p. 199-200. doi: 10.1007/978-3-642-11274-4\_188.
- [22] C. Benini, J. P. Danflous, J. P. Wathelet, P. Du Jardin, et M. L. Fauconnier, « L'ylang-ylang [*Cananga odorata* (Lam.) Hook. f. & Thomson] : une plante à huile essentielle méconnue dans une filière en danger », *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, vol. 14, n° 4, p. 693-705, 2010, [En ligne]. Disponible sur: [https://www.researchgate.net/publication/49593539\\_L%27ylang-ylang\\_Cananga\\_odorata\\_Lam\\_Hook\\_f\\_Thomson\\_une\\_plante\\_a\\_huile\\_essentielle\\_meconnue\\_dans\\_une\\_filiere\\_en\\_danger](https://www.researchgate.net/publication/49593539_L%27ylang-ylang_Cananga_odorata_Lam_Hook_f_Thomson_une_plante_a_huile_essentielle_meconnue_dans_une_filiere_en_danger)
- [23] T. Djidi et R. Behairi, « Performances des systèmes passifs de rafraîchissement dans les bâtiments », Université Abderrahmane Mira de Béjaïa, Béjaïa Algérie, 2020.
- [24] S. Merniche, « Terre crue : stabilisation naturelle », École Nationale Supérieure d'Architecture de Paris-Malaquais, Paris Malaquais, 2016. [En ligne]. Disponible sur: <https://seminairematériaux.files.wordpress.com/2016/12/r9-terre-crue-stabilisation-naturelle-salim-merniche-v1.pdf>
- [25] S. Soualah, « Étude des matériaux composites à matrice métallique », Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2018/10/Soualah-Sarra.pdf>

- 
- [26] A. A. Omeme, « Optimisation des performances hygrothermiques des matériaux biosourcés intégrant des matériaux à changement de phase », Université Paris-Est, Paris-Est France, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-04095081>
- [27] T. Abed et Z. Baadi, « Étude des matériaux composites à matrice métallique », Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/34340/1/m%C3%A9moire%20tarek%20abed%20et%20zoubir%20baadi%20%281%29.pdf>
- [28] H. Latappy, « Étude des COV issus de la dégradation thermique et oxydative des matériaux polymères », Université Paris-Sud, Paris-Sud France, 2014. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-01059771>
- [29] C. J. Brinker, « Dip Coating », in *Chemical Solution Deposition of Functional Oxide Thin Films*, T. Schneller, R. Waser, M. Kosec, et D. Payne, Éd., Vienna: Springer Vienna, 2013, p. 233-261. doi: 10.1007/978-3-211-99311-8\_10.
- [30] Y. S. E. L. L. A. M. I., « Conception et réalisation d'un dispositif de dépôt de couches minces par procédé sol-gel (Dip-coating) commandé par Arduino », Université de Bordj Bou Arréridj, Bordj Bou Arréridj Algérie, 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://dspace.univ-bba.dz/items/2f09681d-7b0c-4437-ac57-95438fdfe2bc>

## *Chapitre II*

### *Matériaux Biosourcés et Méthodologies Expérimentales*

## **II.1 Introduction :**

Les matériaux biosourcés et leur utilisation dans le revêtement de surface attirent de plus en plus d'attention.

Ce chapitre traite du choix de ces matériaux en relation avec leurs aspects fonctionnels et environnementaux. Il décrit la technique de revêtement par immersion, qui est utilisée dans cette étude en raison de la facilité de son application et de son efficacité, et examine ses principaux avantages par rapport à d'autres procédés.

Enfin, une procédure détaillée pour la préparation et l'application des revêtements, qui garantit la performance et l'adhésion souhaitées des couches déposées, est fournie.

## **II.2 Sélection et Préparation des Matériaux Biosourcés :**

Les matériaux biosourcés visent à favoriser le développement durable et à réduire l'empreinte carbone. D'autres paramètres tels que la performance, la renouvelabilité et la compatibilité avec les processus industriels sont tout aussi importants, voire plus, dans la sélection des matériaux. Pour garantir que leurs propriétés sont optimisées et efficaces, une préparation adéquate est nécessaire. Ce processus comprend, mais ne se limite pas à l'extraction, la purification des matières premières et leur modification pour améliorer leur stabilité et leur efficacité pour l'application prévue.[1]

### **II.2.1 Critères de sélection les matériaux :**

Origine renouvelables : provenant de sources naturelles qui se renouvellent à un rythme supérieur à celui de leur consommation, Plus simplement, les énergies d'origine renouvelables sont issues des éléments naturels : le soleil, le vent, les chutes d'eau, les marées, la chaleur de la Terre, la croissance des végétaux... Souvent, on qualifie les énergies renouvelables d'énergies "flux" par opposition aux énergies "stock", elles-mêmes constituées de gisements limités de combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz, uranium). Contrairement à celle des énergies fossiles, l'exploitation des énergies renouvelables n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. [1]

Impact environnemental réduit : Avec la pollution et l'épuisement des ressources naturelles, les efforts consacrés au respect de l'environnement n'ont jamais été aussi importants. [2]

Propriétés fonctionnelles : Les matériaux biosourcés sont aujourd'hui des solutions incontournables pour répondre aux problématiques de transition énergétique auxquelles nous devons faire face, dans de nombreux domaines tels que les secteurs du bâtiment, des infrastructures, de l'automobile. [3]

## II.3 Présentation des matériaux retenus :

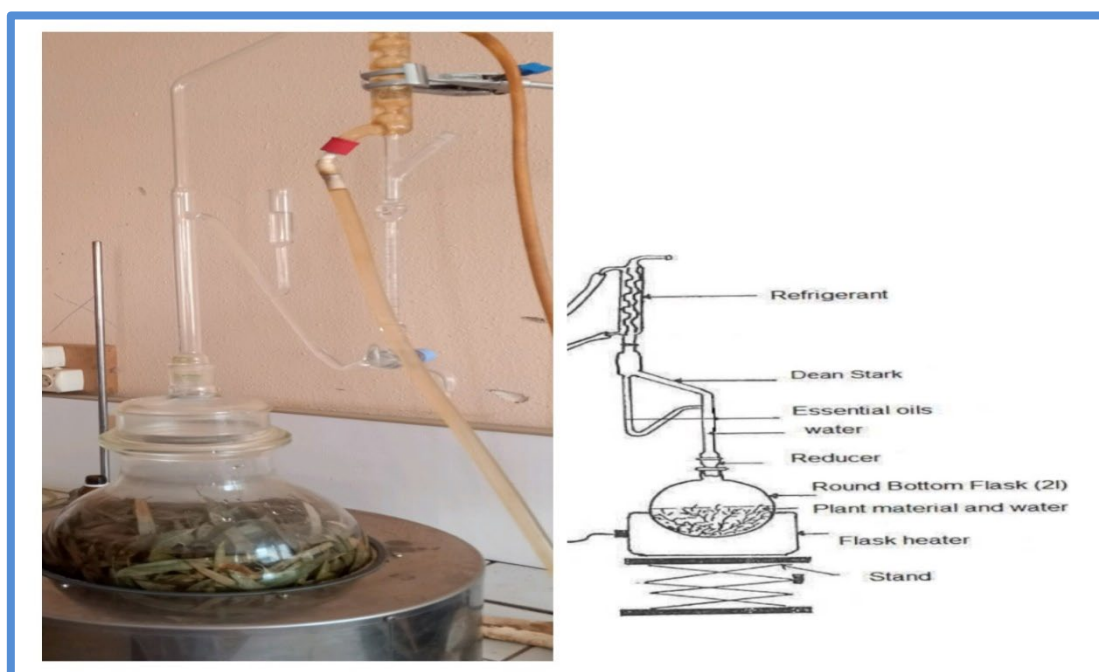
### II.3.1 Les huiles essentielles :

On définit les huiles essentielles par des substances odorantes et volatiles, extraite d'un végétal sous forme liquide. Elle provient d'une sécrétion naturelle de produits volatils élaborée par certains végétaux et contenue dans les cellules de la plante. Selon l'huile désirée, on prendra tout ou partie d'une plante spécifique pour en extraire l'essence aromatique très volatiles, les huiles essentielles ne rancissent pas, sont solubles dans l'huile et dans l'alcool, mais pas dans l'eau. [4]

Il s'agit d'un extrait pur et naturel provenant de plantes aromatiques. Elle concentre l'essence de la plante, autrement dit son parfum. Il s'agit de substances odorantes, volatiles, de consistance huileuse, très concentrées, offrant une forte concentration en principes actifs. Il faut ainsi une très grande quantité de plantes fraîches pour obtenir quelques millilitres d'huiles essentielles. On ne peut définir une essence sans définir sa méthode d'extraction. [5]

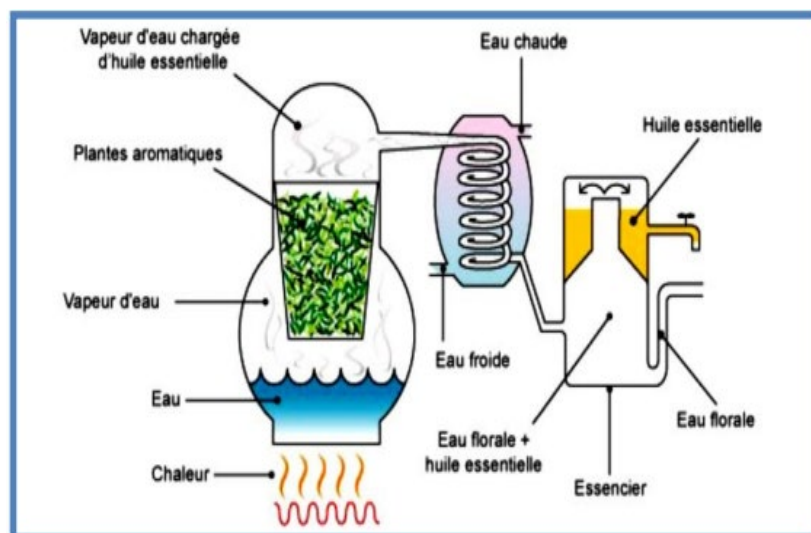
#### II.3.1. Les principales méthodes d'extraction :

Extraction par hydrodistillation : Elle consiste en une distillation à la vapeur alors que la plante reste immergée dans l'eau. Elle entraîne plus d'hydrolyse que la distillation à la vapeur mais est adaptée à tous les produits même les plus difficiles à extraire. (Huiles essentielles de Rose, Encens, Myrrhe). [6]



**Figure II.1:** montage d'extraction par Hydrodistillation type Clyvenger.

Extraction par entraînement à la vapeur d'eau : La vapeur d'eau traverse la plante pour en extraire les composés volatils. Ce processus est adapté à quasiment tous les types de plantes ou parties de plantes. (Huiles essentielles de Lavande, Lavandin, Camomille, Immortelle, Géranium, Eucalyptus Etc.). [6]



**Figure II.2 :** montage d'extraction par entraînement à la vapeur d'eau.

### II.3.2 Les solvants écologiques :

Les solvants écologiques également appelés solvants verts, représentent une alternative de plus en plus pertinente et prometteuse par rapport aux solvants conventionnels. Ce type de solvants se distingue par sa durabilité et son respect de l'environnement, offrant une série d'avantages qui les rendent très attractifs dans diverses applications industrielles et commerciales. L'utilisation de solvants écologiques peut améliorer la perception du public et l'image de l'entreprise. Les solvants écologiques offrent une alternative viable et responsable aux solvants conventionnels en termes de développement durable, de sécurité et d'efficacité. Leur utilisation est non seulement bénéfique pour l'environnement et la santé humaine, mais elle peut également améliorer la réputation et la conformité réglementaire des entreprises qui choisissent de les intégrer dans leurs processus et leurs produits. [7]

#### II.3.2.1 Exemples de solvants écologiques :

Les alcools : Les alcools sont des molécules possédant une fonction hydroxyle, c'est à dire un groupement  $-OH$  lié à un carbone. Cette fonction est à la fois présente dans beaucoup de composés naturels comme les sucres ou les essences naturelles mais également comme solvant en chimie organique. [8]

Le d-limonène : Le D-limonène est biodégradable, non polaire et pourrait être utilisé comme remplacement des alcanes dans l'extraction des huiles comestibles ou comme solvant pour recycler le polystyrène expansé en fibres. Il est aussi utilisé à la place du toluène comme solvant lors de la polymérisation du polypropylène isotactique et conduit à une meilleure stéréospécificité. Cependant la réactivité des doubles liaisons C=C du D-limonène pourrait être un facteur limitant dans son utilisation comme solvant. [9]



**Figure II.3:** d-limonène extrait de citron

### II.3.3 Stabilisants naturels :

Un stabilisant naturel est une substance qui aide à maintenir la structure d'un produit sans recourir à des additifs chimiques. Il peut agir en tant que liant, épaississant, conservateur ou agent émulsifiant, contribuant ainsi à la durée de vie et à la performance du produit. La consistance ou la durée de vie des produits dans divers secteurs, y compris l'alimentation, les cosmétiques, et les revêtements. Leur rôle principal est de prévenir la dégradation ou la séparation des composants d'un produit, tout en étant respectueux de l'environnement et souvent plus sûrs pour la santé par rapport aux alternatives synthétiques. [10]

Il existe 3 grandes familles de biopolymères utilisés traditionnellement pour la stabilisation :

Les polysaccharides (glucides complexes) qui vont former des armatures entre les particules d'argile. Exemples : les fibres végétales fermentées, la farine...

Les lipides (matière grasse) qui vont permettre de consolider les enduits grâce à un phénomène d'oxydation des lipides. Ils facilitent également l'enduisage en lubrifiant les particules et améliorent la résistance à l'eau de la terre grâce aux propriétés hydrophobes des lipides. Exemples : huile de lin, cire végétale...

Les protéines agissent comme une colle sur les particules d'argiles. Elles peuvent également diminuer la sensibilité à l'eau des enduits terre. Exemple : La caséine (protéine du lait). [11]

## **II.4 Justification du choix des matériaux sélectionnés : propriétés antistatiques, hydrophobe, compatibilité écologique :**

### **II.4.1 Huile essentielle :**

**Propriétés antistatique :** L'absence de charge électrique dans les huiles essentielles permet de réduire l'électricité statique, car leur conductivité est très faible et elles peuvent retenir une certaine humidité. De telles propriétés peuvent créer un revêtement protecteur sur les surfaces qui "émettent" de l'électricité statique et minimisent le frottement[12]. Ce mécanisme repose sur la combinaison d'une conductivité modérée et de la nature hygroscopique des huiles essentielles, qui supprime les phénomènes de décharge électrique[13]

**Propriétés hydrophobique :** Les huiles essentielles (HE) sont des dipôles et sont insolubles dans l'eau en raison de leurs structures chimiques composées principalement de terpènes et de phénols. Néanmoins, en raison de leur volatilité, leur efficacité peut être de courte durée, ce qui signifie qu'elles devront être combinées avec des fixateurs, tels que la cire d'abeille. De plus, pour être incorporées dans des solutions aqueuses, des émulsifiants doivent être ajoutés aux HE. Elles sont également utilisées dans des produits bloquant l'humidité, tels que les crèmes barrières, ou pour des dispersions en aromathérapie, comme l'huile de teatree dans les produits anti-pelliculaires[14].

**Compatibilité écologiques :** Les huiles essentielles (HE) sont de plus en plus utilisées dans plusieurs domaines de la santé et possèdent des vertus écologiques sans précédent grâce, entre autres, à leur degré de biodégradabilité, leur toxicité étant modérée. D'une part, ces huiles se décomposent, de manière pondérée, limitant la pollution persistante et se bonifient au fil du temps, car elles proviennent de plantes cultivables, en opposition aux produits dérivés du pétrole. En outre, leur utilisation est sans danger pour les écosystèmes, ce qui permet leur utilisation a posteriori callable en agriculture biologique, comme pour les pesticides naturels. Toutefois, il conviendrait de toujours modérer leur production. Une surproduction peut entraîner la surexploitation de certaines plantes comme le bois de rose, menaçant la biodiversité.[15]

#### II.4.2 Les stabilisants naturels :

**Propriétés antistatiques :** Les stabilisants écologiques, tels que les bio polymères naturels peuvent conférer des propriétés antistatiques en minimisant l'accumulation de charge sur la surface des revêtements. Par exemple, certaines recherches ont montré que l'incorporation de certains biopolymères dans des matrices polymères améliore leur conductivité, contribuant ainsi à des propriétés antistatiques efficaces. De plus, l'utilisation de dérivés de cardanol, un composé provenant de l'huile de coque de noix de cajou, a été étudiée pour améliorer les propriétés antistatiques des matériaux polymères[16]

**Propriétés hydrophobes :** Les stabilisants écologiques possèdent d'importantes propriétés hydrophobes qui dépendent de leur structure chimique et de leur composition. Par exemple, les stabilisateurs contenant de la lignine possèdent des groupes hydroxyles qui sont des parties hydrophiles et hydrophobes, ce qui aide à augmenter leur efficacité dans la stabilisation des sols et des polymères[17]. De plus, les polymères hydrophobes modifiés améliorent la résistance à l'eau et la biodégradabilité des matériaux écologiques.[18]

En outre, certaines études sur les revêtements superhydrophobes ont examiné la possibilité d'utiliser des composés respectueux de l'environnement pour produire des surfaces autonettoyantes et résistantes à l'humidité.[19]

**Compatibilité écologiques :** Contribuant à la réduction de l'empreinte écologique des matériaux de construction. Par exemple, l'utilisation de bio polymères naturels dans les revêtements de sol permet de diminuer les émissions de composés organiques volatils (COV), améliorant ainsi la qualité de l'air intérieur. De plus, des revêtements de façade écologiques, tels que les enduits à la chaux, offrent une alternative durable aux revêtements plastiques, avec une durée de vie prolongée et un écobilan favorable. [20]L'étude a exploré l'utilisation de bio polymères pour la stabilisation de matériaux de construction durables, mettant en évidence leur compatibilité écologique et leur efficacité. [16]

#### II.4.3 Les solvants écologiques :

**Propriétés antistatiques :** Les solvants ont des propriétés antistatiques Ils ont un grand rôle de faciliter l'écoulement des charges en augmentant la conductivité des matériaux, mais, dans de nombreux cas (déstabilisation, problème de coloration), on a recours à des adjuvants qui doivent être présents en surface pour être actifs. Leur mode d'action est lié à leur conductivité propre. On peut soit disperser l'agent sur la surface à protéger, soit incorporer dans la masse,

pendant la mise en œuvre, un produit semi-compatible pouvant exsuder aux températures d'usage. [21]

**Propriétés hydrophobes :** Les solvants hydrophobes ne sont pas miscibles à l'eau, ce qui les rend très intéressants pour réaliser des extractions de composés d'intérêts présents dans l'eau. L'utilisation de solvants hydrophobes limite les coûts de certains procédés.

Les solvants hydrophobes qui ont été développés sont composés de sels d'ammonium quaternaire, ou de terpènes, comme le menthol et le thymol, avec des acides carboxyliques, la diminution de la température de fusion est souvent faible, Cette propriété remarquable peut rendre des procédés industriels énergétiquement moins coûteux et cinétiquement plus rapides. Par exemple, dans des applications d'extraction, l'utilisation des solvants peut remplacer l'étape de distillation, permettant un gain d'énergie et de temps. Ils ont également une possibilité de recyclage, limitant ainsi la production de déchets. [22]

**Compatibilité écologique :** Les solvants écologiques offrent une compatibilité environnementale accrue grâce à leur faible toxicité, leur biodégradabilité et leur efficacité énergétique. Par exemple, les solvants à base d'alcools bio-sourcés présentent une excellente stabilité chimique tout en réduisant l'empreinte carbone des procédés industriels [23]. De plus, l'utilisation de liquides ioniques verts améliore l'efficacité des réactions chimiques sans produire de résidus toxiques [24]

## **II.5 Méthode de revêtement Dip-Coating :**

### **II.5.1 Définition :**

La technique de trempage ou "dip-coating" est particulièrement bien adaptée à la réalisation de couches minces car elle permet le dépôt des films très homogènes sur des substrats de grande taille. Elle permet de plus d'ajuster la microstructure (porosité, cristallinité) des dépôts et d'en contrôler l'épaisseur.

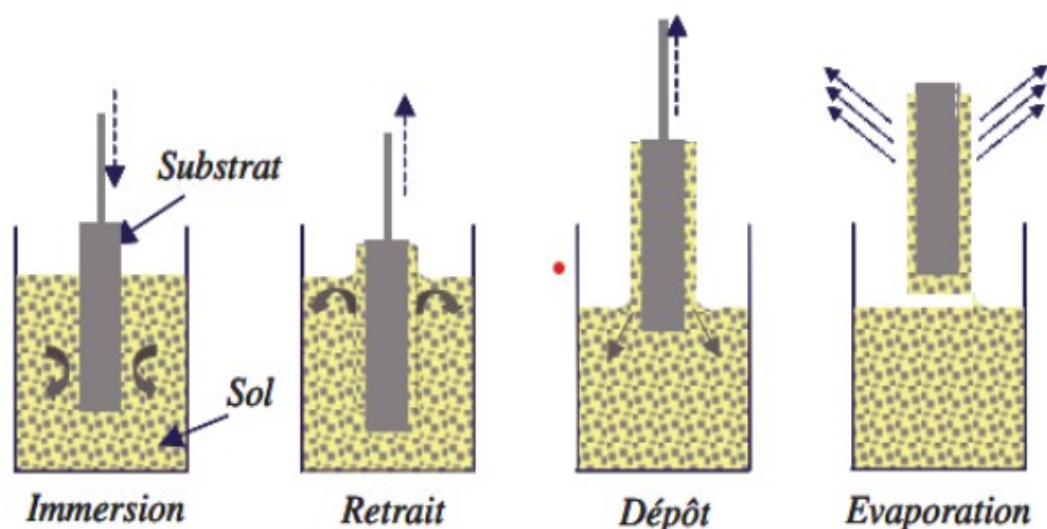
Cette méthode consiste à immerger le substrat dans la solution et à le retirer dans des conditions très contrôlées et stables pour obtenir un film d'épaisseur régulière. Lors de la remontée, le liquide va s'écouler sur le substrat. A la fin de l'écoulement, le substrat est recouvert d'un film uniforme et très poreux[25]

## II.5.2 L'objectif :

L'objectif de la technique Dip-Coating est de déposer des couches minces uniformes sur des surfaces immergées dans une solution colloïdale, permettant un contrôle précis de l'épaisseur et des propriétés du film [26]. Cette méthode est largement utilisée pour les matériaux avancés en raison de sa simplicité, de sa reproductibilité et de sa compatibilité avec divers substrats [26].

## II.5.3 Principe et technique du Dip-Coating :

Cette dernière est facile à mettre en œuvre et permet de contrôler l'épaisseur de la couche déposée. Elle se déroule en deux étapes principales : l'immersion du substrat dans le sol puis son retrait à une vitesse contrôlée comme illustré dans la **Figure II.4**.



**Figure II.4:** principales étapes du dip-coating

### Les étapes de dépôt sont comme suivies :

**1. Immersion** : le substrat est immergé dans le sol à une vitesse constante. Le temps de séjour permet l'interaction entre le substrat et la couche pour assurer un mouillage complet. La vitesse et la profondeur de l'immersion influencent l'épaisseur de la couche déposée.

**2. Répartition** : Après l'immersion, le substrat est retiré du bain. En raison de l'adhésion du liquide à la surface et des forces de capillarité, le revêtement se répartit de manière uniforme sur toute la surface du substrat. La vitesse à laquelle le substrat est retiré joue un rôle crucial dans l'épaisseur du film formé : un retrait rapide entraîne une couche plus fine, tandis qu'un retrait plus lent peut créer une couche plus épaisse.

**3. Séchage :** La dernière étape consiste à sécher la couche déposée. Cela peut être réalisé par évaporation du solvant à température ambiante ou par chauffage. Ce séchage est crucial pour la formation d'une couche solide et uniforme, et il doit être contrôlé pour éviter des défauts comme des fissures ou des bulles d'air. [27]

#### **II.5.4 Paramètre d'application :**

Le dip-coating est une technique relativement simple. Cependant, pour obtenir un contrôle maximal lors du revêtement d'un substrat, il est important de comprendre les facteurs qui peuvent influencer vos résultats. Pour produire des films de haute qualité, des paramètres tels que la vitesse de retrait doit être optimisés. Les facteurs atmosphériques, tels que la température, le flux d'air et la propreté, jouent également un rôle important dans la qualité du film et doivent être soigneusement surveillés pendant le processus de dip-coating. [28]

#### **Vitesse de retrait :**

La vitesse de retrait dans la technique Dip-Coating est un paramètre clé influençant l'épaisseur du film déposé, généralement située entre **1 et 10 mm/s** selon la viscosité du solvant et les conditions de séchage. Une augmentation de la vitesse de retrait entraîne un dépôt plus épais en raison de la traction capillaire et de l'évaporation du solvant [26]

#### **Concentration de solution (viscosité du solution) :**

La concentration de la solution dans le Dip-Coating influence directement l'épaisseur et l'uniformité du film déposé. Une concentration plus élevée en précurseur entraîne une couche plus épaisse, tandis qu'une faible concentration améliore l'uniformité et réduit la formation de défauts [26] Lors du processus d'application, la dynamique de l'écoulement visqueux doit être rigoureusement contrôlée afin d'assurer une distribution uniforme du matériau [29]. En revêtement par immersion, l'utilisation d'un adhésif ayant une viscosité comprise entre **50 et 500 mPa·s** est généralement requise. Les pièces à revêtir sont immergées dans un réservoir contenant la solution adhésive, puis retirées lentement, et laissées en suspension pendant quelques secondes afin de permettre l'égouttement de l'excès de solution[30]

#### **Temps de séchage :**

un temps de séchage court favorise l'évaporation rapide du solvant, mais peut induire des tensions et des fissurations, tandis qu'un séchage plus long permet une répartition homogène du film [26]. Par exemple, pour des solutions sol-gel, le séchage optimal varie de quelques secondes à plusieurs minutes en fonction de la nature du solvant et du substrat utilisé [31] Ce phénomène favorise le séchage tout en maintenant une teneur en eau stable, réduisant ainsi les risques d'irrégularités de surface [32]

## **II.5.5 Comparaison entre le Dip-Coating et la Pulvérisation pour l'Application de Revêtements :**

### ***II.5.5.1 Avantages du Dip-Coating :***

L'un des principaux avantages du dip-coating par rapport aux autres techniques de dépôt est la simplicité de sa conception. Cette méthode est peu coûteuse à mettre en place et à entretenir, tout en permettant de produire des films d'une uniformité extrêmement élevée, avec une rugosité de l'ordre du nanomètre.[28]

Le dip-coating peut être appliqué sur une grande variété de substrats, y compris ceux ayant de grandes surfaces, ce qui le rend particulièrement adapté aux applications industrielles. Comparé à la pulvérisation, il offre une meilleure efficacité dans la fabrication de revêtements homogènes et est souvent privilégié pour les revêtements de haute précision.[33] Cette méthode est utilisée à la fois dans les laboratoires et l'industrie pour diverses applications, notamment les revêtements optiques. Elle est fréquemment employée pour la fabrication de revêtements antistatiques à grande échelle, tels que ceux utilisés pour les lunettes de contrôle solaire et les rétroviseurs de véhicules.[34]

### ***II.5.5.2 Limites et Contraintes de la Pulvérisation :***

La pulvérisation (spray-coating) est une autre méthode couramment utilisée, notamment pour l'application de revêtements sur des structures métalliques. Cette technique repose sur l'atomisation de la solution en fines gouttelettes par de l'air comprimé, permettant ainsi la formation d'un film continu sur la surface ciblée. L'un des principaux avantages de la pulvérisation est sa rapidité, mais elle présente également un gaspillage élevé de matériau en raison du phénomène de brouillard (overspray).[35]

De plus, pour garantir une qualité optimale, la pulvérisation impose des exigences strictes. Par exemple, les peintures à base d'eau ne doivent pas être contaminées par de l'huile ou des impuretés. Il est donc nécessaire d'installer des filtres pour éliminer les particules indésirables. Par ailleurs, la pulvérisation est généralement réalisée dans des cabines de peinture, où l'environnement est soigneusement contrôlé en termes de propreté de l'air et d'humidité. L'application par pulvérisation présente des difficultés pour la fabrication de revêtements polymères superamphiphobes. Elle exige un contrôle précis et est moins adaptée à certains substrats comme le verre, le papier, le coton, le cuivre et l'aluminium[33]

## **II.6 Protocole Détaillé de Préparation, d'Application et de Séchage des Revêtements Biosourcés :**

### **II.6.1 Préparation de la Solution de Revêtement Biosourcé :**

#### ***II.6.1.1 Choisissons des Matériaux Biosourcés :***

Les revêtements biosourcés conçus pour conférer des propriétés hydrophobes et anti-poussiéreux vitres résultent de l'association de polymères naturels, des huiles essentielles, des solvants verts et des stabilisants pour améliorer leur durabilité et leur efficacité. Parmi les huiles essentielles, l'huile de tea tree et l'huile de citron sont riches en composés terpéniques, leur conférant des propriétés hydrophobes et antibactériennes[36]. Les solvants verts, tels que les solvants eutectiques naturels comme le mélange acide citrique-glycérol, sont privilégiés pour leur capacité à disperser efficacement les composants hydrophobes tout en étant respectueux de l'environnement [37]. Les stabilisants tels que les nanoparticules de silice ou d'argilieren forcent l'adhésion du revêtement sur le verre, améliorant sa résistance mécanique et sa capacité autonettoyante [38]. Enfin, l'usage de polymères biosourcés, comme la nanocellulose modifiée hydrophobe et les polyuréthanes biosourcés, assure une bonne flexibilité et une excellente adhésion au substrat, favorisant ainsi la longévité et l'efficacité du revêtement[39]

### **II.6.2 Préparation de la Solution :**

#### ***II.6.2.1 Dissolution et Dispersion :***

La préparation d'une solution biosourcée pour un revêtement hydrophobe repose sur plusieurs étapes clés visant à garantir une dispersion homogène et une stabilité optimale du mélange. Tout d'abord, les polymères biosourcés, tels que la nanocellulose modifiée, les

polyuréthanes biosourcés ou le chitosane, sont pesés en fonction de la concentration requise (généralement entre 1 et 10 % m/v) et introduits progressivement dans un solvant vert comme l'eau, l'éthanol ou un solvant eutectique naturel[37]. Ensuite, la dissolution s'effectue sous agitation mécanique dans une plage de 300 à 600 rpm, à une température contrôlée variant entre 20 et 80°C, selon la solubilité du polymère sélectionné [40]. Une agitation prolongée assure une hydratation complète des polymères et une réduction des agrégats, facilitant ainsi leur incorporation dans la solution [39]

Après la dissolution initiale, des charges et additifs, tels que les nanoparticules de silice, d'argile ou d'oxyde de titane, sont ajoutés progressivement sous agitation continue, afin d'améliorer les propriétés hydrophobes et mécaniques du revêtement. Pour optimiser la dispersion des charges, des techniques telles que l'ultrasonication ou l'homogénéisation haute pression peuvent être utilisées, favorisant ainsi une meilleure interaction entre les polymères et les charges.[36] Enfin, la solution est laissée en agitation douce pour assurer une stabilisation homogène avant son application sur le substrat.[40]

### ***II.6.2.2 Homogénéisation et Stabilisation des Solutions Biosourcés :***

L'homogénéisation et la stabilisation sont des étapes essentielles dans la préparation des solutions biosourcées pour les revêtements hydrophobes. La filtration est utilisée pour éliminer les particules indésirables, garantissant ainsi une solution homogène et stable avant son application [41]. L'ultrasonication, une technique impliquant des ondes ultrasonores, est souvent employée pour améliorer la dispersion des nanoparticules, assurant ainsi une répartition uniforme et une meilleure interaction avec les polymères biosourcés [42]. Ce processus permet également de réduire l'agrégation des nanoparticules et d'optimiser leurs propriétés fonctionnelles dans le revêtement final [43]. Enfin, la déaération sous vide est essentielle pour éliminer les bulles d'air, évitant ainsi les défauts de surface lors du séchage et garantissant une application uniforme du revêtement sur le substrat vitré [44]

### **II.6.3 Application du Revêtement (Techniques de Dépôt) :**

#### ***II.6.3.1 Prétraitement du Substrat pour les Revêtements Biosourcés :***

L'efficacité d'un revêtement biosourcé repose en grande partie sur la qualité de son adhésion au substrat, rendant ainsi le prétraitement de surface une étape déterminante. Une

préparation minutieuse permet d'assurer une interface propre et réactive, facilitant l'ancrage du revêtement et améliorant ses performances à long terme.

Dans un premier temps, un nettoyage initial est réalisé à l'aide de solvants appropriés, tels que l'éthanol ou l'eau oxygénée, afin d'éliminer les impuretés et les contaminants susceptibles d'altérer l'adhésion [45]. Cette étape garantit l'uniformité chimique et physique de la surface, créant ainsi un support optimisé pour l'application du revêtement.

Différentes méthodes d'activation de surface sont ensuite employées, en fonction de la nature du substrat et des exigences spécifiques du revêtement :

Le traitement plasma est l'une des méthodes les plus efficaces pour modifier chimiquement la surface des polymères et améliorer leur adhésion aux revêtements biosourcés [46]. Aussi la silanisation est une méthode particulièrement adaptée aux substrats en verre ou en métal, car elle favorise la formation de liaisons chimiques solides entre le revêtement et le substrat grâce à des agents de couplage silaniques[47]

### ***II.6.3.2 Techniques de Dépôt : Méthode d'Immersion-Émergence (Dipping) :***

La méthode d'immersion-émergence, ou dipping, est couramment utilisée pour obtenir des films homogènes et épais lors de l'application de revêtements biosourcés. Ce procédé repose sur l'immersion contrôlée du substrat dans une solution de revêtement, suivie d'un retrait progressif à une vitesse constante comprise entre 1 et 5 mm/s, permettant de réguler l'épaisseur du film déposé [48]. L'épaisseur finale du revêtement dépend principalement de la viscosité de la solution, de la concentration des polymères et de la vitesse de retrait du substrat [49] Une immersion maintenue pendant 10 à 60 secondes favorise une adhésion uniforme et une répartition homogène des polymères sur la surface du substrat [50] Afin d'éviter les irrégularités, il est crucial de retirer le substrat lentement, ce qui permet une évaporation contrôlée du solvant et une meilleure uniformité du dépôt [51].

### ***II.6.3.3 Séchage et Réticulation des Revêtements Biosourcés :***

Le processus de séchage et réticulation est une étape critique influençant directement la qualité et la durabilité des revêtements biosourcés. Différentes méthodes peuvent être utilisées en fonction des propriétés du polymère et des performances recherchées :

L'évaporation contrôlée, réalisée sous hotte ventilée ou à l'air libre, permet un séchage progressif en maintenant une humidité relative (HR) entre 50 et 60 %, évitant ainsi la formation de fissures dues à un retrait rapide du solvant [52] Le séchage thermique, généralement effectué

entre 40 et 80°C, est particulièrement adapté aux polymères résistants à la chaleur, favorisant une évaporation accélérée tout en conservant l'intégrité du film formé [53].

Pour les matériaux plus sensibles aux températures élevées, le séchage sous vide constitue une alternative efficace, réduisant la pression atmosphérique pour faciliter l'élimination des solvants sans altérer la structure du revêtement [54]. Cette technique a notamment été étudiée pour son impact sur la transparence des films biosourcés, montrant une réduction des défauts optiques et une amélioration de l'uniformité du revêtement [55].

## **II.7 Conclusion :**

En conclusion, la sélection de matériaux biosourcés écoresponsables accompagne un travail pertinent de leurs analyses, ces derniers sont capables de concevoir un revêtement qui est à la fois homogène et efficace. Cette méthode améliore la technologie du dip-coating et permet de réaliser une finition de peau mince aux propriétés reprochées.

**Références bibliographiques :**

- [1] F. Collard, « Les énergies renouvelables »:, *Courr. Hebd. CRISP*, vol. n° 2252-2253, n° 7, p. 5-72, mai 2015, doi: 10.3917/cris.2252.0005.
- [2] J. Kaenzig et O. Jolliet, « Consommation respectueuse de l'environnement: décisions et acteurs clés, modèles de consommation », Office fédéral de l'environnement, work report 0616, 2006. [En ligne]. Disponible sur: <https://iwoe.unisg.ch/publications/consommation-respectueuse-de-lenvironnement-decisions-et-acteurs-cles-modeles-de-consommation/>
- [3] S. Marceau, S. Caré, et P. Lesage, « Matériaux biosourcés et naturels pour une construction durable », Séminaire MABIONAT, Champ-sur-Marne, France, 2016. [En ligne]. Disponible sur: <https://enpc.hal.science/hal-01711725>
- [4] A. Guerrouf, « Application des huiles essentielles dans la lutte microbiologique : cas d'un cabinet dentaire », Université Kasdi Merbah Ouargla, Ouargla, Algérie, 2017. [En ligne]. Disponible sur: <http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/15048>
- [5] M. Bazizi, « Extraction d'huile essentielle de l'espèce végétale *Salvia officinalis* L. par hydrodistillation : caractérisation physicochimique et modélisation paramétrique », Université Badji Mokhtar-Annaba, Annaba, Algérie, 2016. [En ligne]. Disponible sur: <https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2017/11/BAZIZI-Marwa.pdf>
- [6] Réhamnta, Y. et Khaifia, K., « Contribution à l'étude de l'activité acaricide des huiles essentielles de *Rosmarinus officinalis* L. et *Lavandula stoechas* L. contre les tiques du genre *Rhipicephalus* sp. », Université 8 Mai 1945 - Guelma, Guelma, Algérie, 2015.
- [7] Quimidroga, « Solvants écologiques ». 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.quimidroga.com/fr/solvants/>
- [8] R. Margaux, « Les alcools en chimie organique », École Normale Supérieure de Lyon, Lyon, France, 2020. [En ligne]. Disponible sur: [https://chimie.ens-lyon.fr/sites/default/files/2022-01/Alcools\\_OIC\\_2020.pdf](https://chimie.ens-lyon.fr/sites/default/files/2022-01/Alcools_OIC_2020.pdf)
- [9] B. Pauline, « Solvants et chimie verte 3/3 : Des solvants alternatifs verts », févr. 2013, [En ligne]. Disponible sur: <https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-organique/methodes-et-outils/solvants-et-chimie-verte-33-des-solvants>

- [10] M. Lancaster, *Green Chemistry: An Introductory Text*, 3rd ed. La Vergne: Royal Society of Chemistry, The, 2016.
- [11] P. Lou, « Synthèse sur les stabilisants naturels des enduits en terre crue », Oïkos. [En ligne]. Disponible sur: <https://oikos-ecoconstruction.com/fiche/synthese-stabilisants-naturels-enduits-terre-crue/>
- [12] M. N. Boukhatem et W. N. Setzer, « Essential Oils as Antimicrobial Agents: Current Progress and Future Applications », *Molecules*, vol. 25, n° 20, p. 4876, 2020, doi: 10.3390/molecules25204876.
- [13] R. Tisserand, R. Young, et E. Williamson, *Essential Oil Safety: a guide for Health Care Professionals*, 2. Edition. Edinburgh London New York Oxford Philadelphia St. Louis Sydney Toronto: Churchill Livingstone Elsevier, 2014.
- [14] S. G. Griffin, S. G. Wyllie, J. L. Markham, et D. N. Leach, « The role of structure and molecular properties of terpenoids in determining their antimicrobial activity », *Flavour Fragr. J.*, vol. 14, n° 5, p. 322-332, sept. 1999, doi: 10.1002/(SICI)1099-1026(199909/10)14:5<322::AID-FFJ837>3.0.CO;2-4.
- [15] M. B. Isman, « Bioinsecticides based on plant essential oils: a short overview », *Z. Für Naturforschung C*, vol. 75, n° 7-8, p. 179-182, juill. 2020, doi: 10.1515/znc-2020-0038.
- [16] B. Briou, « Valorisation du cardanol et d'acides et d'aldéhydes lipidiques dans le domaine des matériaux polymères », Université de Montpellier, Montpellier, France, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-02180529>
- [17] L. Wang, Y. Yao, J. Li, K. Liu, et F. Wu, « A State-of-the-Art Review of Organic Polymer Modifiers for Slope Eco-Engineering », *Polymers*, vol. 15, n° 13, p. 2878, juin 2023, doi: 10.3390/polym15132878.
- [18] K. Zhu, S. Nie, D. Gong, et M. Xie, « Effect of polysaccharide from *Ganoderma atrum* on the serum metabolites of type 2 diabetic rats », *Food Hydrocoll.*, vol. 53, p. 31-36, févr. 2016, doi: 10.1016/j.foodhyd.2014.10.015.
- [19] L. Xu, « Développement de revêtements superhydrophobes pour la protection contre la corrosion et la formation de buée », Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Canada,

2020. [En ligne]. Disponible sur: [https://constellation.uqac.ca/id/eprint/4535/1/Xu\\_uqac\\_0862N\\_10443.pdf](https://constellation.uqac.ca/id/eprint/4535/1/Xu_uqac_0862N_10443.pdf)
- [20] écoconso, « Les revêtements de façade écologiques », belgique, 170, 2014. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ecoconso.be/fr/content/les-revetements-de-facade-ecologiques>
- [21] L. Carette, « Antistatiques. Lubrifiants. Antichocs », *Plast. Compos.*, août 1993, doi: 10.51257/a-v1-a3236.
- [22] O. Longera, « Design et compréhension de nouveaux solvants eutectiques profonds », Université Clermont Auvergne, Clermont-Ferrand, France, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-03163728v1>
- [23] V. Hessel *et al.*, « Sustainability of green solvents – review and perspective », *Green Chem.*, vol. 24, n° 2, p. 410-437, 2022, doi: 10.1039/D1GC03662A.
- [24] M. Cvjetko Bubalo, S. Vidović, I. Radojčić Redovniković, et S. Jokić, « Green solvents for green technologies », *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 90, n° 9, p. 1631-1639, sept. 2015, doi: 10.1002/jctb.4668.
- [25] K. Medjnoun, « Analyse, caractérisation, prévision et modélisation du comportement des argiles gonflantes », Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Tizi-Ouzou, Algérie, 2014. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2310961>
- [26] C. J. Brinker, « Dip Coating », in *Chemical Solution Deposition of Functional Oxide Thin Films*, T. Schneller, R. Waser, M. Kosec, et D. Payne, Éd., Vienna: Springer Vienna, 2013, p. 233-261. doi: 10.1007/978-3-211-99311-8\_10.
- [27] S. Nouigues, « Étude de revêtements élaborés par le procédé sol-gel sur des surfaces métalliques pour des applications antitartres », Sorbonne Université, Paris, France, 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2024SORUS216>
- [28] Ossila, « Dip Coating: Practical Guide to Theory and Troubleshooting », Ossila, 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ossila.com/pages/dip-coating>
- [29] M. Shakeel Ahmad, A. K. Pandey, et N. Abd Rahim, « Advancements in the development of TiO<sub>2</sub> photoanodes and its fabrication methods for dye sensitized solar cell

(DSSC) applications. A review », *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, p. 89-108, sept. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.03.129.

[30] S. Ebnesajjad et A. H. Landrock, « Introduction and Adhesion Theories », in *Adhesives Technology Handbook*, Elsevier, 2015, p. 1-18. doi: 10.1016/B978-0-323-35595-7.00001-2.

[31] X. Tang et X. Yan, « Dip-coating for fibrous materials: mechanism, methods and applications », *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, vol. 81, n° 2, p. 378-404, févr. 2017, doi: 10.1007/s10971-016-4197-7.

[32] M. A. Aegerter et M. Mennig, Éd., *Sol-Gel Technologies for Glass Producers and Users*. Boston, MA: Springer US, 2004. doi: 10.1007/978-0-387-88953-5.

[33] X. Wu *et al.*, « Preparation of superamphiphobic polymer-based coatings via spray- and dip-coating strategies », *Prog. Org. Coat.*, vol. 90, p. 463-471, janv. 2016, doi: 10.1016/j.porgcoat.2015.08.008.

[34] S. J. Weinstein, « COATING FLOWS », *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol. 36, n° 1, p. 29-53, janv. 2004, doi: 10.1146/annurev.fluid.36.050802.122049.

[35] Y. S. E. L. L. A. M. I., « Conception et réalisation d'un dispositif de dépôt de couches minces par procédé sol-gel (Dip-coating) commandé par Arduino », Université de Bordj Bou Arréridj, Bordj Bou Arréridj Algérie, 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://dspace.univ-bba.dz/items/2f09681d-7b0c-4437-ac57-95438fdfe2bc>

[36] S. Almeida *et al.*, « A Brief Evaluation of Antioxidants, Antistatics, and Plasticizers Additives from Natural Sources for Polymers Formulation », *Polymers*, vol. 15, n° 1, p. 6, déc. 2022, doi: 10.3390/polym15010006.

[37] M. Morales-Jiménez, D. A. Palacio, M. Palencia, M. F. Meléndrez, et B. L. Rivas, « Bio-Based Polymeric Membranes: Development and Environmental Applications », *Membranes*, vol. 13, n° 7, p. 625, juin 2023, doi: 10.3390/membranes13070625.

[38] R. Weiß *et al.*, « A biobased, bioactive, low CO<sub>2</sub> impact coating for soil improvers », *Green Chem.*, vol. 23, n° 17, p. 6501-6514, 2021, doi: 10.1039/D1GC02221K.

[39] V. Selvaraj, T. Swarna Karthika, C. Mansiya, V. Andal, et M. Alagar, « Review on Superhydrophobic Polymer Composite Coating Materials and its Coating Technology for

Advanced Applications », *Polym.-Plast. Technol. Mater.*, vol. 64, n° 5, p. 694-734, mars 2025, doi: 10.1080/25740881.2024.2431220.

[40] M. H. Wahby, A. M. Atta, Y. M. Moustafa, A. O. Ezzat, et A. I. Hashem, « Hydrophobic and Superhydrophobic Bio-Based Nano-Magnetic Epoxy Composites as Organic Coating of Steel », *Coatings*, vol. 10, n° 12, p. 1201, déc. 2020, doi: 10.3390/coatings10121201.

[41] Y. Zhang, S. Wang, Z. Fang, H. Li, et J. Fang, « Molecular design and experimental study of deep eutectic solvent extraction of keratin derived from feathers », *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 241, p. 124512, juin 2023, doi: 10.1016/j.ijbiomac.2023.124512.

[42] T. Robert, S. Eschig, M. Sangermano, et M. Ocepek, « Biobased aromatic building blocks for coating applications », *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.*, vol. 49, p. 100962, oct. 2024, doi: 10.1016/j.cogsc.2024.100962.

[43] K. Bhardwaj et A. K. Singh, « Bio-waste and natural resource mediated eco-friendly synthesis of zinc oxide nanoparticles and their photocatalytic application against dyes contaminated water », *Chem. Eng. J. Adv.*, vol. 16, p. 100536, nov. 2023, doi: 10.1016/j.ceja.2023.100536.

[44] J. Płotka-Wasyłka *et al.*, « Natural/bio-based sorbents as greener extractive materials for endocrine disrupting compounds in samples of different matrix composition », *TrAC Trends Anal. Chem.*, vol. 176, p. 117773, juill. 2024, doi: 10.1016/j.trac.2024.117773.

[45] S. Jadaun, U. Sharma, R. Khapudang, et S. Siddiqui, « Biodegradable nanocellulose reinforced biocomposites for food packaging – a narrative review and future perspective », *J. Water Environ. Nanotechnol.*, vol. 8, n° 3, août 2023, doi: 10.22090/jwent.2023.03.008.

[46] B. A. Khan, « Development of antibacterial hemp hurd/poly (lactic acid) biocomposite for food packaging », University of Southern Queensland, 2017. [En ligne]. Disponible sur: [https://research.usq.edu.au/download/8ab4b4515d6ae9235bcc8a6313d2e474ae452513315454a27bddaacfcf9215cb/10478066/Khan\\_2017\\_whole.pdf](https://research.usq.edu.au/download/8ab4b4515d6ae9235bcc8a6313d2e474ae452513315454a27bddaacfcf9215cb/10478066/Khan_2017_whole.pdf)

[47] C. Santulli, « Hybrid nanocomposites based on cellulose nanocrystals/nanofibrils and silver nanoparticles: Antibacterial applications », in *Cellulose Nanocrystal/Nanoparticles*

*Hybrid Nanocomposites*, Elsevier, 2021, p. 99-114. doi: 10.1016/B978-0-12-822906-4.00011-6.

[48] Z. Zhang, F. Peng, et K. Kornev, « The Thickness and Structure of Dip-Coated Polymer Films in the Liquid and Solid States », *Micromachines*, vol. 13, n° 7, p. 982, juin 2022, doi: 10.3390/mi13070982.

[49] X. Sun, P. Chen, M. Mujahid, et L. Zhou, « Effect of withdrawal speed on the microstructure, optical, and self-cleaning properties of TiO<sub>2</sub> thin films », *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, vol. 93, n° 1, p. 62-69, janv. 2020, doi: 10.1007/s10971-019-05171-4.

[50] J.-T. Liang *et al.*, « Comparisons of plasma-sprayed and sputtering Al<sub>0.5</sub>CoCrFeNi<sub>2</sub> high-entropy alloy coatings », *Surf. Coat. Technol.*, vol. 403, p. 126411, déc. 2020, doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.126411.

[51] W. Yuan *et al.*, « Structural Color Fibers Directly Drawn from Colloidal Suspensions with Controllable Optical Properties », *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 11, n° 21, p. 19388-19396, mai 2019, doi: 10.1021/acsami.8b21070.

[52] P. Blanchet et S. Pepin, « Trends in Chemical Wood Surface Improvements and Modifications: A Review of the Last Five Years », *Coatings*, vol. 11, n° 12, p. 1514, déc. 2021, doi: 10.3390/coatings11121514.

[53] Khandelwal, M., « Carbon footprint of Lignin modified Asphalt mix », Utrecht University, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://studenttheses.uu.nl/handle/20.500.12932/33596>

[54] V. Landry *et al.*, « Recent Developments and Trends in Sustainable and Functional Wood Coatings », *Curr. For. Rep.*, vol. 9, n° 5, p. 319-331, août 2023, doi: 10.1007/s40725-023-00195-0.

[55] Y. Shen, Y. Huang, L. Jiang, et Y. Dan, « Polylactide with improved optical property by introducing natural functional substance: Aloe-emodin », *React. Funct. Polym.*, vol. 148, p. 104486, mars 2020, doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104486.



## ***Conclusion générale***

## *Conclusion générale*

---

L'élaboration des revêtements biosourcés hydrophobes et anti-poussière a permis d'atteindre des performances convaincantes en matière de transparence optique, de répulsion de l'eau et de limitation de l'adhérence particulaire. Les différentes analyses réalisées ont confirmé que les couches déposées assurent une excellente mouillabilité réduite, traduite par un angle de contact élevé, signe d'un comportement hydrophobe efficace. Ce caractère est renforcé par la présence d'agents naturels aux propriétés répulsives, capables de minimiser la rétention des gouttelettes d'eau et d'empêcher leur stagnation sur la surface.

Les tests liés à l'accumulation de poussière ont révélé une nette différence entre les substrats traités et non traités : les surfaces revêtues présentaient une capacité d'auto-nettoyage plus marquée, avec une diminution significative des résidus secs après exposition à un environnement chargé en particules. Cette propriété confirme l'intérêt de ces revêtements pour maintenir la propreté des surfaces vitrées dans des zones fortement exposées (déserts, zones industrielles, régions humides), tout en réduisant le recours à un nettoyage fréquent.

L'intérêt de ces résultats dépasse l'aspect purement technique. En intégrant des matières premières renouvelables, biodégradables et faiblement énergivores, ces revêtements s'inscrivent pleinement dans les principes du développement durable. Leur fabrication requiert peu d'énergie, génère peu de déchets, et limite le recours aux composés organiques volatils toxiques ou dérivés pétrochimiques. L'utilisation de solvants verts, de polymères naturels et d'agents actifs écologiques permet ainsi de répondre aux besoins actuels de fonctionnalisation des surfaces tout en réduisant l'empreinte environnementale.

Ce type de solution offre des perspectives concrètes pour la transition vers une industrie plus propre et plus responsable. L'intégration de revêtements biosourcés dans des systèmes à large échelle, comme les panneaux photovoltaïques, pourrait participer à l'amélioration de l'efficacité énergétique tout en réduisant les coûts d'entretien et la consommation d'eau. C'est donc à la fois une innovation technologique et une réponse pragmatique aux enjeux environnementaux.

## Perspectives

Les résultats obtenus dans ce travail ouvrent plusieurs pistes de recherche et de développement à moyen et long terme :

- **Optimisation des formulations:** Il serait pertinent d'approfondir l'étude des mélanges de matériaux biosourcés afin d'améliorer simultanément les propriétés hydrophobes, optiques et anti-poussière des couches. L'ajout de nanoparticules naturelles ou fonctionnalisées pourrait renforcer l'efficacité des revêtements.
- **Adaptation à d'autres substrats :** L'extension de la méthode de dépôt à d'autres types de surfaces (plastiques, métaux, textiles techniques) permettrait d'envisager des applications variées dans les domaines de l'énergie, de la construction ou du transport.
- **Durabilité à long terme :** Des tests prolongés en conditions réelles (exposition solaire, pluie, vent, pollution atmosphérique) sont nécessaires pour évaluer la tenue des couches dans le temps et proposer des solutions de stabilisation ou de régénération des films.
- **Intégration dans un procédé éco-industriel :** Le développement d'un protocole de dépôt à faible coût, peu énergivore et adaptable à l'échelle semi-industrielle renforcerait l'intérêt de ces revêtements dans une perspective de transfert technologique.
- **Collaboration interdisciplinaire :** Ce travail pourrait s'inscrire dans une dynamique de recherche collaborative, associant physico-chimistes, ingénieurs en matériaux, écologues et industriels pour co-développer des solutions durables et innovantes.

- **Résumé :**

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la recherche appliquée à l'interface des matériaux innovants, de la durabilité environnementale et de la fonctionnalisation des surfaces. Il contribue au développement de technologies propres en explorant des solutions écologiquement responsables fondées sur des ressources naturelles renouvelables dans le domaine des revêtements fonctionnels. L'approche adoptée vise un équilibre entre performance technique et respect des principes de la chimie verte, avec des perspectives d'application à haute valeur ajoutée dans les secteurs de l'énergie et de la protection des matériaux.

L'étude porte sur la mise au point et la caractérisation de films minces biosourcés présentant des propriétés hydrophobes et anti-poussière. Les matériaux utilisés, tels que les huiles essentielles, les solvants verts et les biopolymères, ont été sélectionnés pour leur compatibilité écologique, leurs fonctions de surface efficaces et leur stabilité optique. Les revêtements ont été déposés par la méthode de dip-coating, une technique simple et reproductible, permettant l'obtention de films homogènes.

Les caractérisations incluent la spectrophotométrie UV-Visible pour l'analyse de la transparence, et la microscopie à force atomique (AFM) pour l'examen des propriétés de surface. Les résultats montrent une bonne transparence, une rugosité contrôlée et un comportement hydrophobe satisfaisant. Cette étude propose ainsi une alternative écologique aux revêtements classiques dans les environnements poussiéreux, tout en ouvrant des perspectives d'optimisation des matériaux biosourcés pour les applications photovoltaïques.

**Mots-clés :** revêtements biosourcés, films minces, hydrophobie, propriétés optiques, panneaux photovoltaïques.

- **Abstract:**

This study falls within the scope of applied research at the intersection of advanced materials, environmental sustainability, and surface functionalization. It contributes to the development of clean technologies by exploring environmentally responsible solutions based on renewable natural resources in the field of functional coatings. The adopted approach aims to balance technical performance with adherence to green chemistry principles, targeting high-value applications in energy systems and material protection.

The research focuses on the development and characterization of bio-based thin films exhibiting hydrophobic and dust-repellent properties. Natural components, including essential oils, green solvents, and biopolymers, were selected for their ecological compatibility, surface functionality, and optical stability. The coatings were applied using the dip-coating method—a simple, reproducible technique capable of producing uniform and homogeneous films.

Characterization techniques included UV-Visible spectrophotometry to assess optical transparency and Atomic Force Microscopy (AFM) for surface morphology analysis. The results revealed good light transmittance, controlled surface roughness, and satisfactory hydrophobic performance. This work proposes a viable ecological alternative to conventional coatings for dusty environments and opens promising prospects for optimizing bio-sourced materials in photovoltaic applications.

**Keywords:** bio-based coatings, thin films, hydrophobicity, optical properties, photovoltaic panels.

## • ملخص:

يندرج هذا البحث ضمن إطار البحث التطبيقي الذي يدمج بين المواد المتقدمة، الاستدامة البيئية، وتعديل الخصائص السطحية للمواد. يساهم في تطوير تقنيات نظيفة من خلال استكشاف حلول مسؤولة بيئيًا تعتمد على موارد طبيعية متجددة في مجال الطلاءات الوظيفية. وتسعى المقاربة المتبعة إلى تحقيق توازن فعال بين الأداء التقني والامتثال لمبادئ الكيمياء الخضراء، مع التوجه نحو تطبيقات عالية القيمة في مجالات الطاقة وحماية المواد.

يركز العمل على تطوير وتوصيف أغشية رقيقة ذات أساس حيوي تتميز بخصائص كارهة للماء وطاردة للغبار. تم اختيار مكونات طبيعية مثل الزيوت الأساسية، والمذيبات الخضراء، والبوليمرات الحيوية نظرًا لتوافقها البيئي، ووظائفها السطحية، واستقرارها البصري. طبقت الطلاءات باستخدام تقنية الطلاء بالغمس (Dip-Coating)، وهي طريقة بسيطة وقابلة للتكرار تتيح الحصول على طبقات متجانسة.

شملت تقنيات التوصيف التحليل الطيفي بالأشعة فوق البنفسجية والمرئية (UV-Vis) لتقييم الشفافية البصرية، والفحص المجهرى للقوة الذرية (AFM) لتحليل طبوغرافيا السطح. أظهرت النتائج شفافية جيدة، وخشونة سطحية مضبوطة، وسلوكًا كارهًا للماء يُعد مرضيًا. يُقترح من خلال هذا العمل بديل بيئي واعد للطلاءات التقليدية في البيئات المترتبة، مع آفاق مستقبلية لتعزيز استخدام المواد الحيوية في التطبيقات الكهروضوئية.

**الكلمات المفتاحية:** الطلاءات الحيوية، الأغشية الرقيقة، كراهية الماء، الخصائص البصرية، الألواح الكهروضوئية.