

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 محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Génie Mécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : **Génie Mécanique**

Spécialité : **Energétique**

Par : **SELLAMI Younes**

Sujet

Conception et réalisation d'un dispositif de dépôt de couches minces par procédé
sol-gel (Dip-coating) commandé par Arduino

M/Mohamed BENTOUMI

Prof

Univ-BBA

Président

M/Salah DAOUD

Prof

Univ-BBA

Examineur

M/Saad SAOUD

Prof

Univ-BBA

Examineur

M/Zahir ROUBAH

Prof

Univ-BBA

Encadrant

M/ Lotfi BOUTAHAR

/

Univ-BBA

Co-Encadrant

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, je remercie chaleureusement mon encadreur, Pr. Rouabah Zahir, pour son soutien inébranlable, ses conseils précieux, et sa disponibilité tout au long de ce travail. Ses connaissances approfondies et sa rigueur scientifique ont été d'une aide inestimable pour mener à bien cette recherche.

Je souhaite également adresser mes remerciements sincères à Lotfi Boutaher, doctorant, pour son assistance technique, ses encouragements et ses précieux conseils qui ont grandement contribué à l'avancement de ce travail. Sa collaboration et son expertise ont été d'une grande valeur.

Je remercie également l'Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi – BBA pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser ce mémoire dans un environnement académique stimulant et enrichissant.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance à la Faculté des Sciences et de la Technologie, en particulier au Département de Génie Mécanique, pour les ressources et les équipements mis à ma disposition, ainsi que pour l'encadrement académique de qualité qui m'a permis de mener à bien cette recherche.

Merci à tous.

SELLAMI Younes.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à toutes les personnes qui ont été une source d'inspiration, de soutien et d'encouragement tout au long de cette aventure académique.

À mon père et à ma mère,

Vous avez été les piliers de ma vie. Votre amour, votre soutien inconditionnel et vos sacrifices ont rendu possible la réalisation de ce rêve. Merci pour votre sagesse, votre patience et vos encouragements constants.

À mes sœurs et à mes frères,

Votre présence, votre affection et vos encouragements m'ont toujours donné la force de persévérer. Merci pour votre compréhension et votre soutien inestimable.

À tous mes amis,

Merci pour votre amitié sincère, votre soutien et vos encouragements. Votre compagnie et vos mots réconfortants ont été essentiels durant les moments de doute.

À toute ma famille, en particulier les familles Sellami et Ben Merzouge,

Votre amour et votre soutien m'ont permis de surmonter les défis et de rester motivé. Merci pour être toujours là pour moi.

Et enfin, à moi-même,

Pour avoir cru en mes rêves, pour avoir persévéré malgré les obstacles et pour avoir travaillé avec détermination pour atteindre cet objectif.

Merci à tous de faire partie de cette belle aventure.

Nomenclatures

CVD	Dépôt chimique en phase vapeur.
PVD	Dépôt physique en phase vapeur.
LPCVD	Low Pressure Chemical Vapor Deposition
PECVD	Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition
<i>e</i>	épaisseur du film
<i>η</i>	viscosité du liquide
<i>v</i>	vitesse de retrait du substrat
<i>ρ</i>	densité du liquide
<i>g</i>	la gravité

Liste des figures

Chapitre 1 :

Figure I.1 Techniques de dépôt des couches minces.

Figure I.2: Schéma conventionnel d'un pulvérisateur cathodique

Figure I.3: Principe de l'ablation par faisceau laser pulsé

Figure I.4: Méthodes chimiques pour le dépôt des couches minces

Figure I.5: Diagramme schématique d'un équipement de Dépôt par spray pyrolyse

Figure I.6: Potentiel de la chimie sol-gel

Figure I.7 : Détail des étapes du dip-coating : Trempage du substrat dans le sol, formation de a couche pendant le retrait du substrat et gélation du film par évaporation du solvant

Figure I.8: Étapes du processus de dépôt par spin-coating

Figure I.9: Étapes du processus de dépôt par brush coating

Figure I.10: Étapes du processus de dépôt par Spray-coating

Chapitre 2 :

Figure II.1 : Schéma représentant la formation d'un film obtenu par dip-coating

Figure II.2 : Le liquide déposé sur le substrat

Figure II.3 : Aspect physique du dépôt du film par "dip-coating"

Figure II.4: processus d'hydrolyse

Figure II.5: processus de condensation

Figure II.6. Evolution de la viscosité de la solution et de la constante

Figure II.7. Description schématique du processus de polymérisation sol-gel.

Liste des figures

Chapitre 3 :

Figure III.1 : vis trapézoïdale

Figure III.2 : coupleur 6.35mm*8mm

Figure III.3 : guidage Mini V

Figure III.4 : Arduino

Figure III.5 : moteur pas à pas

Figure III.6 : Le pilote L298N

Figure III.7 : diagramme de câblage

Figure III.8 : Interaction sur le clavier

Figure III.9: Interface sur écran LCD

Figure III.10: Support substrat

Figure III.11: carcasse de la machine de dip coating

Figure III.12: cast corners

Figure III.13: prototype de machin dip coating sur SOLIDS

Figure III.14: prototype de machin dip coating real

Liste des tableaux

Chapitre 1 :

Tableau I. 1 : Avantages et inconvénients du procédé sol-gel

Tableau III.1 : List des composants

Table des matières

Remerciements	
Dédicaces	
Nomenclature	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Table des matières	
Introduction générale.....	1

Chapitre 1 : dépôt de couches minces

1.1	Introduction.....	4
1.2	Définition d'une couche mince.....	4
1.3	Principe de couche mince.....	5
1.4	Mécanisme de formation d'une couche mince.....	5
1.4.1	Méthode physique.....	6
1.4.1.1	Dépôts physiques en phase vapeur ou PVD.....	6
A.	Pulvérisation cathodique directe.....	7
B.	Pulvérisation cathodique réactive.....	7
C.	Ablation laser.....	7
D.	L'évaporation sous vide.....	8
1.4.2	Méthode chimique.....	9
1.4.2.1	Dépôts chimique en phase liquide.....	10
1.5	Méthode Sol gel.....	11
1.5.1	Description de la méthode sol-gel.....	11
1.5.2	Le principe de la méthode sol-gel.....	11
1.5.3	Avantages et inconvénients du procédé Sol-Gel.....	12
1.5.4	Méthodes d'application du sol gel.....	12
1.5.4.1	Dip-coating.....	12
1.5.4.2	Spin-coating.....	13
1.5.4.3	Brush coating (pinceau).....	14
1.5.4.4	Spray-coating.....	15
1.6	Conclusion.....	15

Chapitre 2: Procédé sol-gel (Dip coating)

2.1	Introduction	17
2.2	Le contexte historique	17
2.3	Définition et Aperçu du Dip Coating Sol-Gel.....	18
2.3.1	Aperçu	18
2.3.1.1.	Processus	18
2.3.1.1	Principes.....	19
2.3.1.2	Applications	19
2.3.1.3	Avantage	19
2.4	Procédé Dip- coating :.....	20
2.5	Mécanismes réactionnels de la synthèse sol-gel :	22
2.5.1	L'hydrolyse :.....	22
2.5.2	La polycondensation :	22
2.5.3	La transition sol-gel :	23
2.6	Paramètres influençant la cinétique des réactions :.....	24
2.6.1	La température :.....	24
2.6.2	Le choix de précurseur et de sa concentration :.....	24
2.6.2.1	Le solvant.....	25
2.6.2.2	Le PH du sol (choix du catalyseur)	25
2.6.3	Traitement Thermique séchage recuit.....	25
2.7	L'oxyde de zinc (ZnO) :.....	26
2.7.1	Introduction.....	26
2.7.2	Paramètres de déposition de films minces d'oxyde de zinc (ZnO) par la technique sol- gel :.....	26
2.7.3	Quelques applications de films minces de l'oxyde de zinc :	27
2.8	Conclusion	27

Chapitre 3 : réalisation d'une machine (dip coating)

3.1	Introduction	29
3.2	Principes Fondamentaux du Dip-Coating	30
3.3	Innovations Récentes dans la Technologie du Dip-Coating	30
3.4	Conception de machine dip coating	31
3.4.1	List des composants :	31
3.4.2	Conception mécanique :	32
3.4.2.1	Mécanisme de mouvement :	32
3.4.2.2	Couplage	32
3.4.2.3	Guidage Linéaire.....	33
3.4.3	Conception électrique :	33
3.4.3.1	Système de contrôle :	33
3.4.3.2	Moteur pas à pas :	34
3.4.3.3	Le pilote L298N :	34
3.4.4	Câblage des composants.....	35
3.4.5	Interface utilisateur :	36
3.4.5.1	Interaction utilisateur :	36
3.4.6	Conception par 3D :	37
3.4.6.1	Support substrat :	37
3.5	Fabrication et assemblage :	38
3.5.1	Structure :	38
3.5.2	Assemblage :	39
3.6	Le prototype de machine dip coating :	40
3.7	Le prototype real de machine dip coating :	41
3.8	Conclusion	42
	Conclusion générale	44
	Références bibliographiques	46
	Résumé.....	50

Introduction

Générale

Introduction Générale

Dans le contexte actuel de développement technologique rapide, les matériaux avancés jouent un rôle crucial dans divers domaines d'application, allant de l'électronique à l'énergie renouvelable. Parmi ces matériaux, les couches minces occupent une place prépondérante en raison de leurs propriétés uniques et de leur capacité à améliorer les performances des dispositifs. En effet, le processus dépôt des couches minces consiste à appliquer une couche de matériau de quelques nanomètres à quelques micromètres d'épaisseur sur un substrat.

Les méthodes de dépôt des couches minces incluent diverses techniques physiques et chimiques, chacune avec ses avantages et limitations spécifiques. La technique sol-gel dip coating, est une méthode particulièrement efficace pour la fabrication de couches minces. Le procédé sol-gel implique la transition d'une solution liquide (Sol) vers un réseau solide (Gel) pour former un revêtement uniforme sur un substrat par immersion.

Le procédé dip coating, ou dépôt par immersion, est une technique de revêtement de surface qui consiste à plonger un substrat dans une solution de revêtement et à le retirer à une vitesse contrôlée afin de former un film uniforme. Cette méthode est largement utilisée dans divers domaines tels que l'électronique, la biotechnologie, et les énergies renouvelables en raison de sa simplicité et de son efficacité. Elle permet notamment l'application de couches minces de matériaux, ce qui est crucial pour la fabrication de capteurs, de cellules solaires, et de dispositifs médicaux.

Ce travail de fin d'étude start-ups a pour objectif, la conception, la réalisation et la mise en œuvre d'un dispositif sol-gel dip coating, en mettant l'accent sur les innovations technologiques et les améliorations apportées pour augmenter la précision et l'efficacité du processus. La conception d'une machine de dip coating nécessite une compréhension approfondie des dynamiques des fluides, des matériaux et des contrôles automatisés, que nous détaillerons dans ce chapitre.

Ce mémoire explore trois aspects fondamentaux de l'élaboration et de l'application des couches minces, à savoir le dépôt des couches minces, la technique sol-gel dip coating, et la conception et la réalisation d'une machine de dip coating.

De ce fait, notre mémoire est scindé en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré au dépôt des couches minces et vise à fournir une compréhension complète des techniques et des technologies impliquées dans la fabrication de couches minces.

Le deuxième chapitre met l'accent sur le procédé sol-gel (Dip-coating).

Le troisième chapitre illustre la conception et la réalisation d'une machine de sol-gel dip coating, qui nous permet l'automatisation et l'optimisation de processus de dépôt des couches minces par immersion.

Chapitre 1

1.1	Introduction.....	4
1.2	Définition d'une couche mince.....	4
1.3	Principe de couche mince	5
1.4	Mécanisme de formation d'une couche mince	5
1.4.1	Méthode physique.....	6
1.4.1.1	Dépôts physiques en phase vapeur ou PVD	6
A.	Pulvérisation cathodique directe	7
B.	Pulvérisation cathodique réactive.....	7
C.	Ablation laser	7
D.	L'évaporation sous vide.....	8
1.4.2	Méthode chimique.....	9
1.4.2.1	Dépôts chimique en phase liquide.....	10
1.5	Méthode Sol gel.....	11
1.5.1	Description de la méthode sol-gel.....	11
1.5.2	Le principe de la méthode sol-gel	11
1.5.3	Avantages et inconvénients du procédé Sol-Gel.....	12
1.5.4	Méthodes d'application du sol gel	12
1.5.4.1	Dip-coating.....	12
1.5.4.2	Spin-coating.....	13
1.5.4.3	Brush coating (pinceau)	14
1.5.4.4	Spray-coating	15
1.6	Conclusion	15

1.1 Introduction

Le dépôt de couches minces est une technique essentielle dans le domaine de la science des matériaux, offrant la possibilité de fabriquer des films de matériaux fonctionnels avec des épaisseurs allant de quelques nanomètres à plusieurs micromètres. Cette méthode de revêtement a une importance considérable dans de nombreux secteurs industriels, y compris l'électronique, l'optique, l'énergie, la biotechnologie et la médecine. En permettant le contrôle précis des propriétés physiques, chimiques et électriques des films, le dépôt de couches minces ouvre la voie à une gamme variée d'applications allant des dispositifs microélectroniques avancés aux revêtements de surface fonctionnels.

L'objectif principal du dépôt de couches minces est de produire des films de matériaux avec des propriétés spécifiques pour répondre aux exigences particulières des applications visées. Cette technique permet de contrôler l'épaisseur, la composition chimique, la structure cristalline, la morphologie de surface et les propriétés de transport des films, ce qui offre une grande flexibilité pour concevoir des matériaux sur mesure avec des fonctionnalités précises.

Dans ce chapitre, nous explorerons les principaux aspects du dépôt de couches minces, notamment les différentes techniques de dépôt utilisées, les matériaux couramment utilisés, les applications industrielles et les défis associés à cette technologie. Nous examinerons également l'importance croissante du dépôt de couches minces dans la recherche et le développement de nouveaux matériaux et dispositifs innovants.

1.2 Définition d'une couche mince

Une couche mince (en anglais : thin film) est un revêtement dont l'épaisseur peut varier de quelques couches atomiques à une dizaine de micromètres. Ces revêtements modifient les propriétés du substrat sur lesquels ils sont déposés. Ils sont principalement utilisés [1]:

- Dans la fabrication de composants électroniques tels que des cellules photovoltaïques en raison de leurs propriétés isolantes ou conductrices.
- Pour la protection d'objets afin d'améliorer les propriétés mécaniques, de résistance à l'usure, à la corrosion ou en servant de barrière thermique. Il s'agit, par exemple, du chromage.

- Pour modifier les propriétés optiques d'objets. En particulier, citons les revêtements décoratifs (exemple de la dorure) ou modifiant le pouvoir réflecteur de surfaces (verres anti-reflets ou miroirs). Autrement dit, les couches minces étant des nano-objets dans une direction de l'espace, les propriétés physiques et chimiques des couches minces peuvent différer de celles des objets macroscopiques selon toutes leurs dimensions. Par exemple, un matériau isolant lorsqu'il est de dimensions macroscopiques peut devenir conducteur électrique sous forme de couche mince du fait de l'effet tunnel.

1.3 Principe de couche mince

Par principe, une couche mince (C.M.) d'un matériau donné est un élément de ce matériau auquel l'une des dimensions qu'on appelle l'épaisseur, a été fortement réduite, de telle sorte qu'elle varie de quelques nanomètres "nm" à quelques micromètres "µm" (typiquement ce sont des couches de 10 à 100 nanomètres d'épaisseur) [2]. La différence essentielle entre le matériau à l'état massif et celle en couches minces est que dans le premier, on néglige généralement le rôle des surfaces limites dans les propriétés, tandis que dans la deuxième, ce sont, au contraire, les effets liés aux surfaces limites qui sont prépondérants. Il est assez évident que plus l'épaisseur est faible plus cet effet bidimensionnel est important. Cependant, lorsque l'épaisseur dépassera un certain seuil; son effet deviendra minime et le matériau retrouvera les propriétés bien connues du matériau massif [3].

1.4 Mécanisme de formation d'une couche mince

La microstructure des couches minces est extrêmement sensible aux propriétés chimiques et physiques du matériau mis en jeu lors de sa croissance, ainsi que des conditions physiques de dépôt à chaque étape d'évolution de la couche mince. En particulier, les propriétés des couches minces sont très sensibles à la nature du substrat sur lequel elles sont formées. Cela explique, par exemple, le fait que des couches minces d'un même matériau et d'une même épaisseur peuvent présenter des propriétés physiques différentes sur des substrats de nature différente

Méthodes d'élaboration des couches minces [4].

Il existe plusieurs méthodes d'élaboration des couches minces qui sont réparties en deux catégories :

- Les méthodes physiques
- Les méthodes chimiques.

La **Figure I.1** représente l'intégralité de ces méthodes d'élaboration

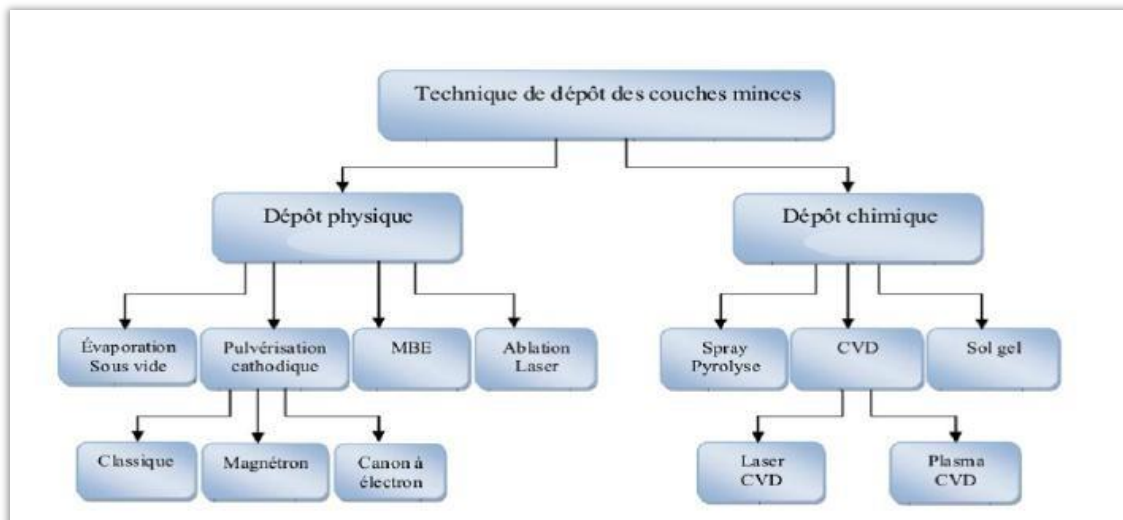


Figure I.1 Techniques de dépôt des couches mince [4].

1.4.1 Méthode physique

1.4.1.1 Dépôts physiques en phase vapeur ou PVD

Les procédés par PVD regroupent principalement l'évaporation, l'ablation laser et la pulvérisation sous toutes ses formes. Dans la réalisation d'une couche on peut distinguer les trois étapes suivantes [5] :

- La création des espèces a déposé, sous forme d'atomes, de molécules ou de clusters (groupes d'atomes ou de molécules),
- Le transport de ces espèces en phase vapeur de la source vers le substrat,
- Le dépôt sur le substrat et la croissance de la couche.
- La pulvérisation cathodique

Dans cette méthode, le substrat est mis dans une enceinte contenant un gaz (en général de l'argon) à basse pression, dans lequel on provoque une décharge électrique. Cette décharge a pour rôle d'ioniser les atomes de gaz. Les ions ainsi obtenus sont accélérés par une différence de potentiel et viennent bombarder une cathode constituée du matériau à déposer (cible) [6] [7].

Sous l'impact des ions accélérés, des atomes sont arrachés à la cathode et sont déposés sur le substrat. Dans certains cas, on introduit dans l'enceinte en plus de

l'argon un gaz qui va réagir chimiquement avec les atomes pulvérisés pour former le matériau que l'on désire obtenir. Alors, on a une pulvérisation cathodique réactive. Cette méthode permet d'avoir des dépôts de faible résistivité et des couches de bonnes stœchiométries ayant une transmission moyenne dans le visible [8].

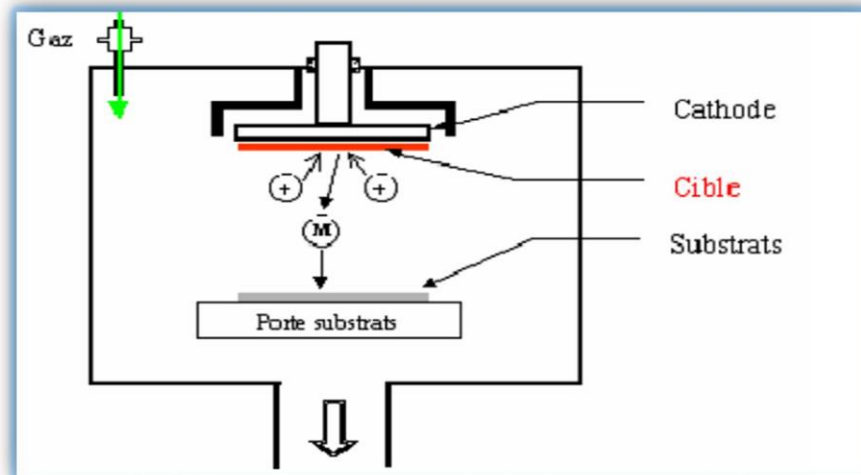


Figure I.2: Schéma conventionnel d'un pulvérisateur cathodique [9]

A. Pulvérisation cathodique directe

On crée dans la chambre un plasma de gaz inerte, en général de l'argon, par application sur la cible d'une tension électrique continue de haute fréquence. Les ions positifs du plasma viennent alors bombarder la cathode constituée par le matériau à déposer. [9] Sous l'impact des cations du plasma, des atomes sont arrachés à la cathode et viennent ainsi se déposer sur le substrat (anode) [10]

B. Pulvérisation cathodique réactive

On introduit dans l'enceinte, en plus de l'argon, un gaz qui va réagir chimiquement avec les atomes pulvérisés du matériau à déposer. On dit que l'on a une pulvérisation cathodique réactive [11].

C. Ablation laser

Est relativement simple. Un faisceau laser impulsionnel (le plus souvent nanoseconde) est focalisé sur une cible massive, placée dans un enceinte ultravide. Dans certaines conditions d'interaction, une quantité de matière est éjectée de la cible, et peut-

être collectée sur un substrat placé en vis-à-vis. La nature et la qualité du dépôt dépendent de nombreux paramètres (énergie du laser, nature et pression du gaz résiduel dans l'enceinte, température du substrat,...). Dans tous les cas, il est nécessaire de contrôler le transport des espèces de la cible jusqu'au substrat [5]

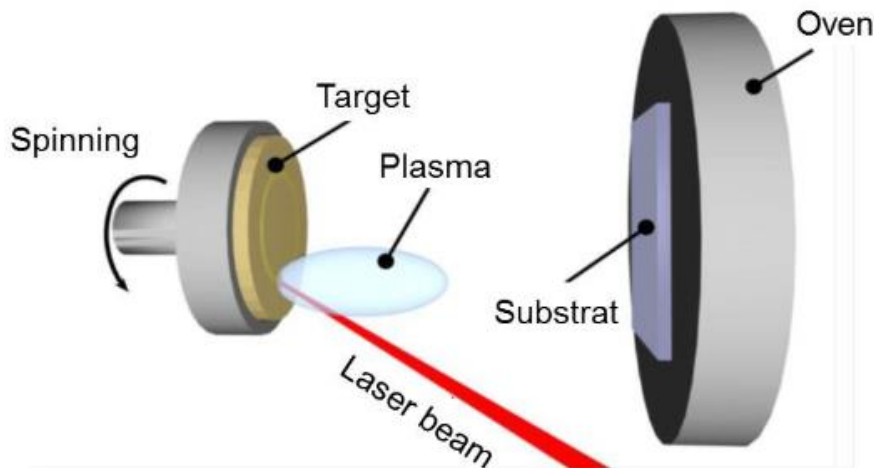


Figure I.3: Principe de l'ablation par faisceau laser pulsé [12]

D. L'évaporation sous vide

L'évaporation d'un matériau à déposer est obtenue en le chauffant par l'un des différents. Moyens: effet Joule, induction (couplage d'une génératrice haute fréquence), canon à électrons, faisceau laser ou arc électrique. Dans le but d'augmentation la vitesse de la formation du film mince, l'évaporation est effectuée sous un vide poussé (pression de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4} Pa) [13,14].

L'évaporation est une technique d'obtention des films sous vide qui consiste à évaporer ou sublimer un matériau. Le dépôt se fait par condensation de la phase vapeur sur un substrat. La vapeur du matériau à déposer est produite par son chauffage à l'état source.

Les procédés de chauffage jusqu'à évaporation sont multiples, on trouve : le chauffage électrique par l'intermédiaire d'une résistance (effet Joule), par induction d'un champ magnétique, par bombardement électronique et par laser.

Cette méthode est la plus simple car il n'est pas nécessaire d'injecter un gaz pour créer un plasma, alors que les autres méthodes PVD ont besoin d'un milieu plasma comme intermédiaire. Cependant, certains problèmes spécifiques à l'évaporation existent : il est difficile de déposer des matériaux très réfractaires ou à faible tension de vapeur. Cette méthode ne permet pas de maîtriser facilement la composition chimique dans le cas d'un alliage par suite d'un effet de distillation du composant le plus volatil.

Les couches peuvent être aussi contaminées par réaction avec le creuset, avec le filament et surtout par le dégazage des parois induit par l'échauffement ou le bombardement des électrons. L'évaporation permet l'obtention du film à une vitesse de dépôt élevée. En revanche, les inconvénients que présente cette technique sont l'élaboration du film souvent non stœchiométriques, une faible adhésion des couches et la nécessité d'une densité de puissance assez importante pour produire la phase gazeuse des matériaux ayant un point de fusion très élevé.

1.4.2 Méthode chimique

Les méthodes utilisées pour le dépôt des couches minces peuvent être divisées en deux groupes basés sur la nature du processus physique ou chimique du dépôt. Les méthodes physiques incluent le dépôt à vapeur physique dite "**PVD**" (Eng. **Physical Vapor Deposition**), l'ablation laser, épitaxie par Jet moléculaire "**MBE**", et la pulvérisation Cathodique "**Sputtering**". Les méthodes chimiques incluent, les méthodes de dépôt en phase gazeuse et les techniques à solution (**Figure I.4**). Les méthodes en phase gazeuse sont le dépôt à vapeur chimique (**Chemical Vapor Deposition CVD**) et l'épitaxie à couche atomique (**Atomic Layer Epitaxy ALE**), tandis que les méthodes de spray pyrolysent, sol-gel, spin-coating, dip-coating et le processus hydrothermal emploient des solutions comme précurseurs [15].

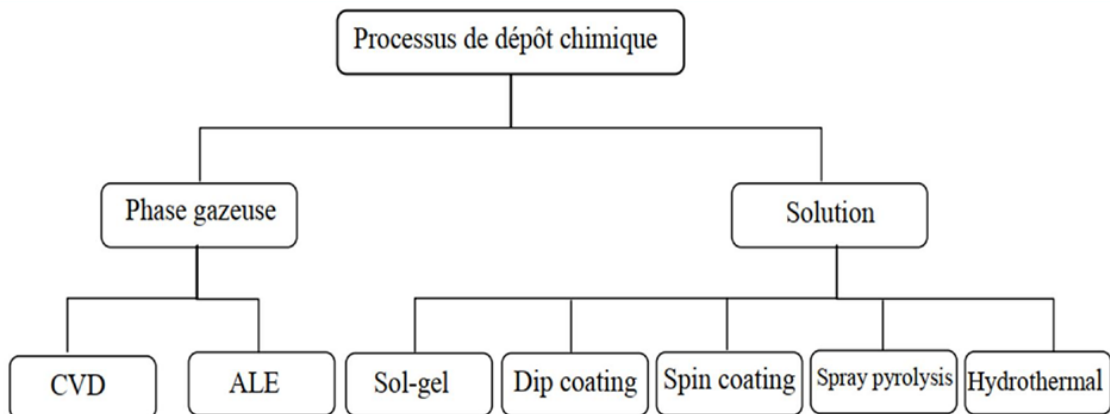


Figure I.4: Méthodes chimiques pour le dépôt des couches minces [15]

1.4.2.1 Dépôts chimique en phase liquide

Spray pyrolytique par ultrason

Le choix de cette technique pour notre travail a été motivé au regard de nombreux avantages:

- un large choix de précurseurs est envisageable, le composé doit être soluble dans un solvant, ainsi, la solution pourra être atomisée ;
 - Possibilité de déposer un large choix de matériaux ;
 - Méthode simple d'apport du précurseur par la voie d'un spray ;
 - Haute vitesse de croissance car le transport de masse du précurseur peut être très élevé
- Environnement de la réaction contrôlable simplement, sous gaz neutre ou sous air à pression atmosphérique :
- Facilité de réalisation des réacteurs de ce type.

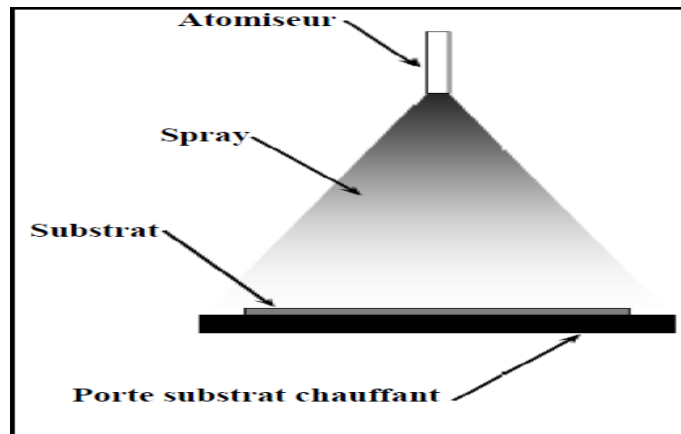


Figure I.5 Diagramme schématique d'un équipement de Dépôt par spray pyrolyse [16]

L'un des problèmes majeurs de cette technique est le contrôle de l'évaporation des gouttelettes générées. De fait, une évaporation trop rapide ou trop lente entraîne une réaction des précurseurs non désirée influant sur les propriétés du dépôt. En d'autres termes, si les gouttes atteignent le substrat chaud avant une complète évaporation, une réaction de spray pyrolyse prend la place du mécanisme de Spray attendu. En effet, selon la zone où l'évaporation arrive, quatre processus différents peuvent avoir lieu [13].

1.5 Méthode Sol gel

1.5.1 Description de la méthode sol-gel

La technique sol-gel est un procédé d'élaboration de matériaux permettant la synthèse de verres, de céramiques et de composé hybrides organo-minéraux, à partir de précurseurs en solution. Il permet de réaliser des couches minces constituées d'empilements de nanoparticules d'oxydes métalliques [17].

1.5.2 Le principe de la méthode sol-gel

L'appellation sol-gel est une contraction des termes « solution-gélification ». Avant que l'état de gel ne soit atteint, le système est dans l'état liquide : il est constitué d'un mélange d'oligomères colloïdaux et de petites macromolécules ainsi que, selon le degré d'avancement de la réaction de polymérisation, de différents monomères partiellement hydrolysés. Cette dispersion stable de particules colloïdales au sein d'un liquide est appelée « sol ». La taille des particules solides, plus denses que le liquide, doit être suffisamment petite pour que les forces responsables de la dispersion ne soient pas surpassées par la gravitation [17].

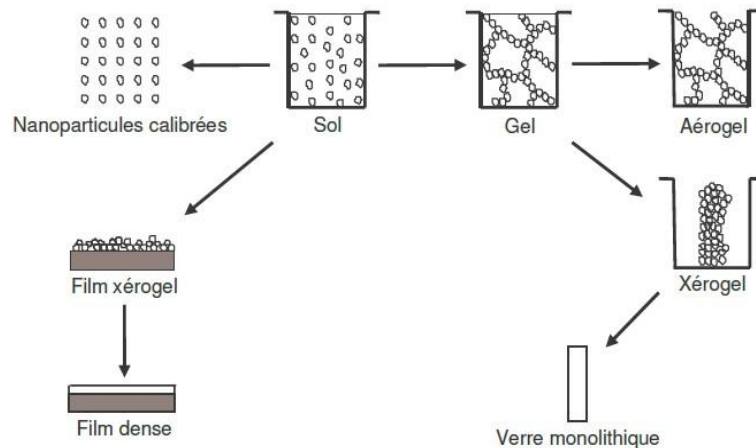


Figure I.6 Potentiel de la chimie sol-gel [18].

Il existe deux voies de synthèse sol-gel qui sont :

- **Voie inorganique** ou **colloïdale** : obtenue à partir de sels métalliques (chlorures, nitrates, oxychlorures...) en solution aqueuse. Cette voie est peu chère mais difficile à contrôler, c'est pour cela qu'elle est encore très peu utilisée. Toutefois, c'est la voie

privilegiée pour obtenir des matériaux céramiques [19].

- **Voie métallo-organique** ou **polymérique** : obtenue à partir d'alcoxydes métalliques dans des solutions organiques. Cette voie est relativement coûteuse mais permet un contrôle assez facile de la granulométrie [19].

1.5.3 Avantages et inconvénients du procédé Sol-Gel

Comme tout procédé de mise en œuvre, le procédé sol-gel présente des avantages et des inconvénients, nous allons essayer de les résumer dans le tableau [20].

Avantages	Inconvénient
Elaboration des matériaux à basse température	coût élevé pour la majorité des précurseurs
contrôle possible des cinétiques de réaction, donc des structures, des compositions et des propriétés	Le temps du procédé est long
Matériaux de grande pureté	La production est volatile
Homogénéité des produits finaux	
Elaboration de matériaux de différentes formes	

Tableau I. 1 : Avantages et inconvénients du procédé sol-gel [20].

1.5.4 Méthodes d'application du sol gel

La méthode d'application par laquelle la solution sol-gel est mise en œuvre affecte directement la qualité et la durabilité du revêtement. Les méthodes fréquemment utilisées sont dip-coating, spin-coating ; la pulvérisation (spray-coating) et le pinceau (brush coating). Ce choix se fait en fonction de l'épaisseur et la morphologie de la surface du film qu'on souhaite utiliser [21].

1.5.4.1 Dip-coating

La technique d'application des revêtements sur le substrat métallique par «dip-coating» consiste à immerger le substrat à revêtir dans le milieu liquide et à le retirer ensuite à une vitesse contrôlée [21].

Principe :

C'est la technique employée durant ce travail de thèse. En plus, de la facilité à mettre en œuvre, elle a la particularité de permettre des dépôts en couches sous champ

magnétique, ce qui permet d'orienter les nanoparticules magnétiques au sein de la matrice ainsi formée.

Son principe est illustré sur la figure I.7, est consisté à immerger le substrat dans le sol et à le retirer dans des conditions très contrôlées et stables, pour obtenir une couche d'épaisseur régulière. En effet, lors du retrait le liquide va s'écouler sur le substrat. A la fin de l'écoulement, le substrat sera recouvert d'une couche uniforme [22].

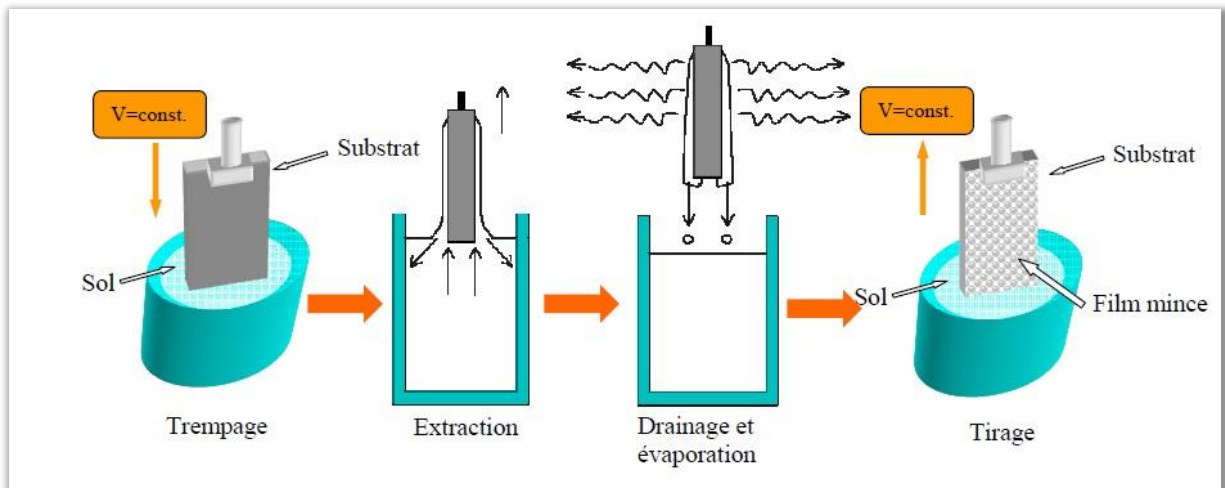


Figure I.7 : *Détail des étapes du dip-coating : Trempage du substrat dans le sol, formation de a couche pendant le retrait du substrat et gélotion du film par évaporation du solvant [23].*

1.5.4.2 Spin-coating

La technique « spin-coating » consiste à réaliser, par centrifugation, une couche mince à partir d'une solution déposée en excès sur un substrat. La préparation d'une couche passe donc par quatre phases essentielles :

- Le dépôt de la solution sur le substrat;
- L'accélération : c'est le début de la rotation, cette étape provoque l'écoulement du liquide vers l'extérieur du substrat ;
- La rotation uniforme : cette phase permet l'éjection de l'excès du sol sous forme de gouttelettes et la diminution de l'épaisseur de la couche de façon uniforme ;
- l'évaporation : durant cette étape, le substrat tourne toujours à une vitesse constante et l'évaporation des solvants les plus volatils est dominante ce qui diminue l'épaisseur du couche déposé

Son principe est illustré sur la figure I.8.

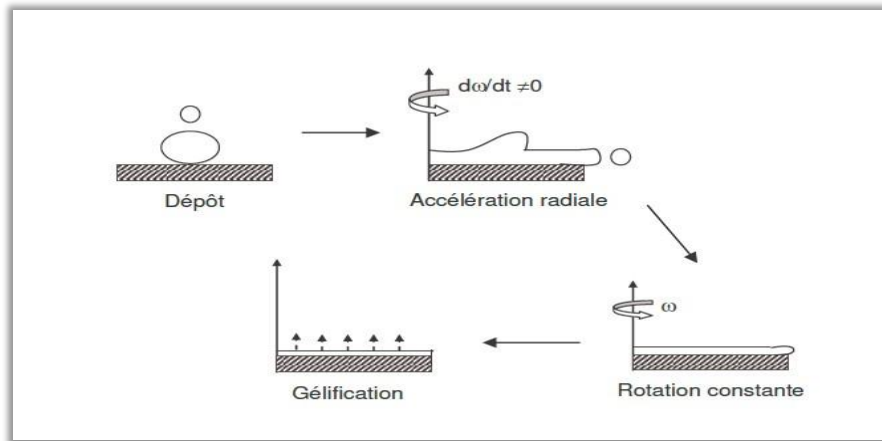


Figure I.8: Étapes du processus de dépôt par spin-coating [18].

1.5.4.3 Brush coating (pinceau)

Cette méthode est considérée comme étant la plus simple pour obtenir des revêtements et possède certains avantages par rapport aux autres méthodes, nécessité d'un volume faible de la solution à appliquer, facilité pour la réparation. Les revêtements obtenus par cette méthode sont souvent épais.

A cause de l'épaisseur importante du film, cette méthode n'est pas utilisée pour l'application d'une solution sol-gel dont le film ne présente une bonne qualité qu'à une faible épaisseur. Par contre, dans certains cas des revêtements sol-gel hybrides organique/inorganique épais sans fissures peuvent être obtenus par l'utilisation d'un pinceau [21].

Son principe est illustré sur la figure I.9.

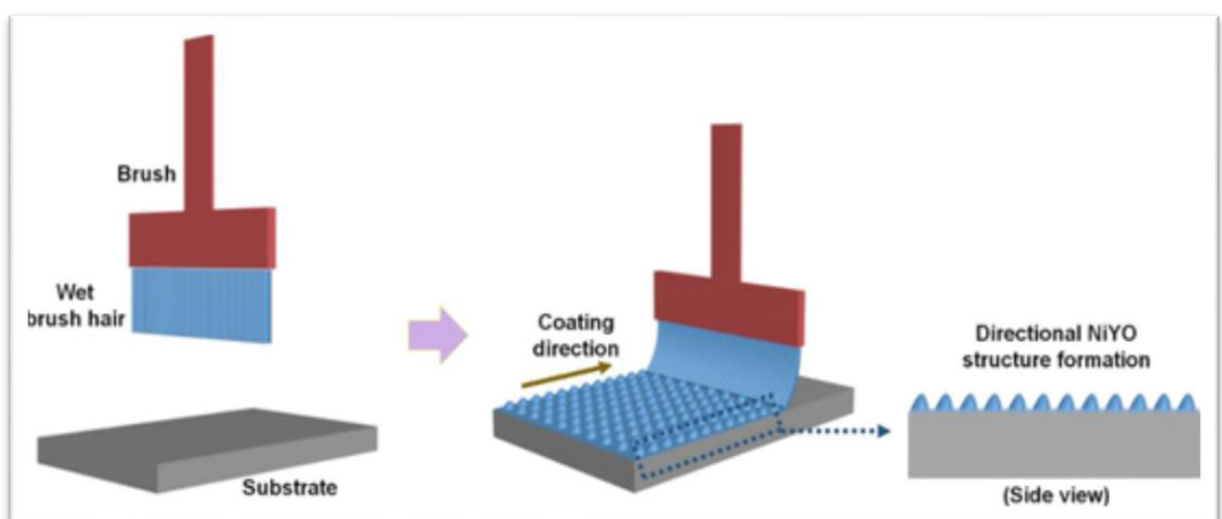


Figure I.9: Étapes du processus de dépôt par Brush coating [18]

1.5.4.4 Spray-coating

La méthode de pulvérisation (spray-coating) est souvent utilisée pour l'application du revêtement sur des charpentes métalliques. La solution à appliquer est atomisée en gouttelettes fines par l'air comprimé et projetée sur la surface à projeter où les gouttelettes ensuite se jointent pour former un film continu. L'application par spray-coating est plus rapide que les autres méthodes, par contre le gaspillage de la solution à appliquer est élevée à cause du fort brouillard (over spray) [21].

Son principe est illustré sur la figure I.10.

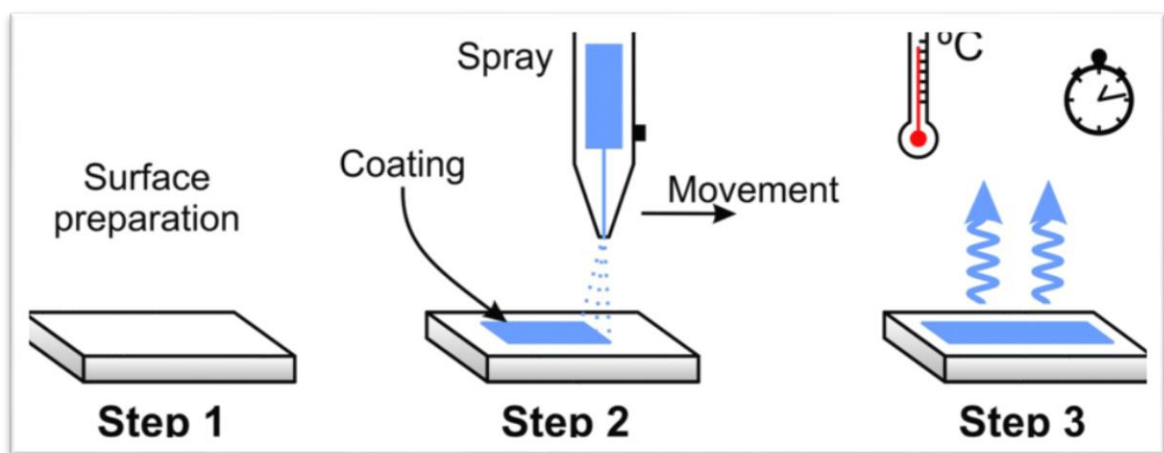


Figure I.10: Étapes du processus de dépôt par Spray-coating [18].

1.6 Conclusion

Le dépôt de couches minces représente une technique essentielle dans la fabrication de matériaux et de dispositifs avancés. Grâce à des méthodes variées et à un contrôle précis, cette technologie permet de produire des films de matériaux avec des propriétés spécifiques adaptées à une large gamme d'applications. Que ce soit dans le domaine de l'électronique, de l'optique, de l'énergie ou de la biotechnologie, le dépôt de couches minces joue un rôle crucial dans l'innovation technologique et continuera à être au cœur des progrès scientifiques et industriels à venir.

Chapitre 2

2.1	Introduction.....	17
2.2	Le contexte historique.....	17
2.3	Définition et Aperçu du Dip Coating Sol-Gel.....	18
2.3.1	Aperçu.....	18
2.3.1.1.	Processus.....	18
2.3.1.1	Principes.....	19
2.3.1.2	Applications.....	19
2.3.1.3	Avantage.....	19
2.4	Procédé Dip- coating :.....	20
2.5	Mécanismes réactionnels de la synthèse sol-gel :.....	22
2.5.1	L'hydrolyse :.....	22
2.5.2	La polycondensation :.....	22
2.5.3	La transition sol-gel :.....	23
2.6	Paramètres influençant la cinétique des réactions :.....	24
2.6.1	La température :.....	24
2.6.2	Le choix de précurseur et de sa concentration :.....	24
2.6.2.1	Le solvant.....	25
2.6.2.2	Le PH du sol (choix du catalyseur).....	25
2.6.3	Traitement Thermique séchage recuit.....	25
2.7	L'oxyde de zinc (ZnO) :.....	26
2.7.1	Introduction.....	26
2.7.2	Paramètres de déposition de films minces d'oxyde de zinc (ZnO) par la technique sol-gel :.....	26
2.7.3	Quelques applications de films minces de l'oxyde de zinc :.....	27
2.8	Conclusion.....	27

2.1 Introduction

Dip coating sol-gel est une technique de dépôt de films minces qui offre une grande flexibilité et une large gamme d'applications dans divers domaines tels que l'optique, l'électronique, la biomédecine et la protection de surface. Cette méthode, basée sur la chimie des solutions, permet de déposer des couches homogènes et uniformes sur des substrats de différentes formes et matériaux, offrant ainsi des propriétés spécifiques telles que la transparence, la conductivité électrique, la résistance à la corrosion et la catalyse.

Dans ce chapitre, nous explorons le processus de dépôt par immersion sol-gel pour fabriquer des revêtements d'oxyde de zinc sur différents substrats. Nous examinons également les paramètres clés qui influent sur la formation et les propriétés des films sol-gel, tels que la composition de la solution précurseur, les conditions de dépôt et les traitements thermiques post-dépôt.

2.2 Le contexte historique

Le contexte historique du dip coating avec des matériaux sol-gel trouve ses racines dans le développement de la chimie sol-gel, qui a débuté à la fin du XIXe siècle et a gagné un élan significatif tout au long du XXe siècle.

1. Premières Recherches (Fin du XIXe au Début du XXe Siècle)

- L'étude de la chimie sol-gel remonte à la fin du XIXe siècle avec les travaux pionniers de chimistes comme Ebelmen et Graham. Ils ont étudié la formation de gels colloïdaux et de sols, posant les bases de la compréhension des processus sol-gel.

2. Émergence de la Science Sol-Gel (Milieu du XXe Siècle)

- Au milieu du XXe siècle, des chercheurs tels que Kenneth Koeppen et William O. Baker ont commencé à explorer systématiquement les processus sol-gel. Ils se sont concentrés sur la synthèse de matériaux inorganiques à partir d'alkoxides métalliques ou de sels métalliques par hydrolyse et réactions de condensation en solution.

- Notamment, les années 1960 ont vu le développement de la méthode Stöber, qui a permis la synthèse contrôlée de nanoparticules de silice en solution. Cette méthode a posé les bases pour la production de sols colloïdaux utilisés dans le dip coating.

3. Application dans le Dépôt de Couches Minces (Fin du XXe Siècle)

- À la fin du XXe siècle, les chercheurs ont commencé à explorer l'application de la chimie sol-gel dans les techniques de dépôt de couches minces telles que le dip coating. Cette période a vu des avancées dans la compréhension des paramètres influençant la formation de films, tels que la concentration en précurseurs, le choix du solvant et les

conditions de dépôt.

- La polyvalence de la chimie sol-gel a permis le dépôt de divers revêtements fonctionnels, notamment des revêtements optiques, des couches de protection et des nanocomposites, par des procédés de dip coating.

4. Commercialisation et Adoption Industrielle (Fin du XXe Siècle à Aujourd'hui)

- À la fin du XXe siècle et jusqu'au XXIe siècle, le dip coating avec des matériaux sol-gel a été de plus en plus utilisé dans des applications industrielles. Sa polyvalence, son coût relativement bas et sa capacité à produire des revêtements uniformes sur des géométries complexes l'ont rendu attrayant pour des industries allant de l'électronique à l'automobile et l'aérospatiale.

Aujourd'hui, le dip coating avec des matériaux sol-gel reste une technique essentielle dans la fabrication de revêtements fonctionnels, de dispositifs optiques, de capteurs, et plus encore, avec une recherche continue axée sur l'amélioration des propriétés des films, l'efficacité du processus et la scalabilité.

Dans l'ensemble, le contexte historique du dip coating avec des matériaux sol-gel reflète l'évolution de la chimie sol-gel de la recherche fondamentale aux applications pratiques, soulignant son importance dans le dépôt de couches minces et la science des matériaux.

2.3 Définition et Aperçu du Dip Coating Sol-Gel

Le dip coating sol-gel est une technique utilisée pour déposer des films minces sur des substrats en les plongeant dans une solution sol-gel, suivie d'un retrait contrôlé. Cette méthode utilise la chimie sol-gel, qui implique la synthèse de matériaux à partir de précurseurs moléculaires via des réactions d'hydrolyse et de condensation en solution.

2.3.1 Aperçu

2.3.1.1. Processus : Le dip coating sol-gel implique plusieurs étapes

- Préparation de la solution sol-gel : Les alcoxydes métalliques ou les sels métalliques sont hydrolysés et condensés dans un solvant approprié pour former un sol, qui contient des particules colloïdales dispersées.
- Immersion : Le substrat est plongé dans la solution sol-gel, permettant au sol de mouiller la surface du substrat.
- Retrait : Le substrat est lentement retiré de la solution à un débit contrôlé, permettant à l'excès de solution de s'écouler et favorisant la formation uniforme du

film.

- Séchage et durcissement : Le substrat revêtu est séché pour éliminer le solvant, puis durci pour favoriser le réticulage et la densification du film.

2.3.1.1 Principes : Le mécanisme de dépôt dans le dip coating sol-gel est gouverné par divers facteurs, notamment :

- Mouillage et action capillaire : Le sol mouille la surface du substrat en raison de sa faible tension de surface et forme un film mince lorsqu'il est retiré.
- Mécanismes de formation de film : La formation de film se produit par le dépôt de particules colloïdales sur la surface du substrat, suivie de l'évaporation du solvant et de la condensation des particules pour former un film continu.
- Paramètres de contrôle : Des facteurs tels que la vitesse de retrait, la concentration en sol, et les propriétés du substrat influencent l'épaisseur, l'uniformité et la morphologie du revêtement.

2.3.1.2 Applications : Le dip coating sol-gel trouve des applications dans de nombreux domaines, notamment :

- Revêtements optiques : Tels que les revêtements antireflet, antibuée et les filtres optiques.
- Revêtements de protection : Contre la corrosion, l'abrasion et la dégradation environnementale.
- Revêtements fonctionnels : Y compris les revêtements catalytiques, les capteurs et les revêtements biomédicaux.
- Nano composites : En combinant des matériaux sol-gel avec des nanoparticules pour des propriétés améliorées.

2.3.1.3 Avantage

- Polyvalence : La chimie sol-gel permet le dépôt de divers matériaux, y compris des oxydes, des céramiques et des composés hybrides organo-inorganiques.
- Revêtement conforme : Le dip coating peut uniformément revêtir des géométries complexes et de grandes surfaces.
- Contrôle des propriétés du film : Les paramètres peuvent être ajustés pour adapter l'épaisseur, la composition, la porosité et la morphologie de surface du film.
- Rentabilité : Les précurseurs sol-gel sont relativement peu coûteux, et le processus peut être réalisé à l'aide d'un équipement simple.

En résumé, le dip coating sol-gel est une méthode polyvalente et économique pour

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, et au-delà.

2.4 Procédé Dip-coating :

Il consiste à tremper le substrat dans la solution à déposer et à le retirer [24].

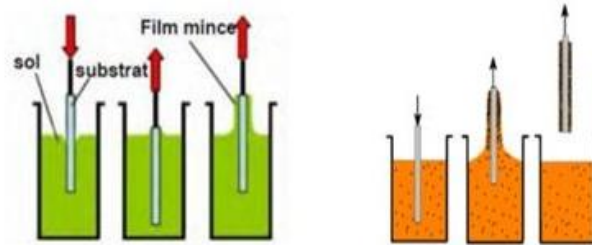


Figure II.1 : Schéma représentant la formation d'un film obtenu par dip-coating [25].

Du point de vue industriel, cette technique souffre de deux inconvénients majeurs, à savoir la faible épaisseur obtenue après une seule étape de dépôt et la courte durée de vie des solutions préparées. Nous citons qu'il y a aussi d'autres techniques de déposition utilisées telles que : Dépôt par bain chimique, LPCVD, PECVD, spray pyrolytique ou pneumatique...etc [24] .

Lorsque la viscosité du liquide et la vitesse de tirage du substrat sont assez importantes pour minimiser la courbure du ménisque, l'épaisseur du film déposé est donnée par la relation ci-dessous :

$$e = \left(\frac{\eta \cdot v}{\gamma}\right)^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

Avec une constante empirique, la viscosité de la solution de dépôt, la vitesse de tirage, la masse volumique de la solution et la constante de gravité. Cette équation a été modifiée par Landau et Levich [24], afin de tenir compte de la tension de surface liquide vapeur . L'épaisseur du film déposé est alors donnée par la relation ci-dessous .

$$e = 0.94 \left[\frac{\eta \cdot v}{\rho \cdot g}\right]^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

Le liquide déposé sur le substrat subit une évolution rapide représentée.

Les précurseurs sont tout d'abord concentrés à la surface du support par drainage et évaporation des solvants ce qui a pour conséquence de les rapprocher les uns des autres et d'augmenter les cinétiques de polymérisation. Il y a ainsi formation d'un réseau tridimensionnel de chaînes polymériques rempli de solvant qui sera éliminé par séchage du dépôt [26].

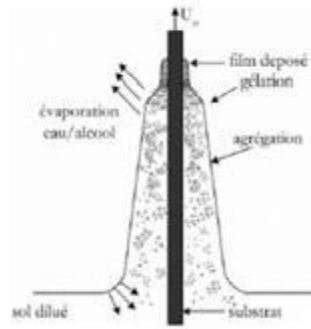


Figure II.2 : Le liquide déposé sur le substrat [26].

La physique du procédé de “dip-coating” a été largement étudiée par Brink et Scherer [26]. (La figure II.3) en rappelle les principaux aspects.

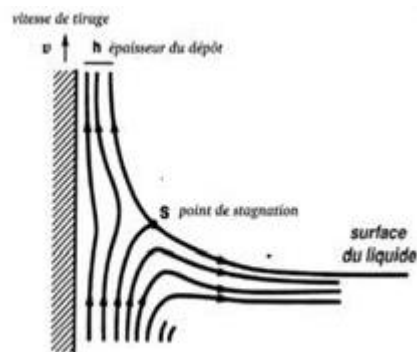


Figure II.3 : Aspect physique du dépôt du film par “dip-coating” [27].

Lors de son retrait, le substrat entraîne une partie du sol sous forme d'un film fluide qui se scinde en deux à l'approche du ménisque. La partie située au voisinage immédiat du substrat l'accompagne dans son ascension, tandis que l'autre retourne dans le récipient. L'intersection du ménisque avec la surface séparant les deux parties définit une ligne de stagnation traduisant l'équilibre entre l'entraînement visqueux et la gravitation. La position de cette ligne détermine l'épaisseur du film déposé [27].

2.5 Mécanismes réactionnels de la synthèse sol-gel :

Le mécanisme chimique de transformation se décompose en deux étapes[28-30] :

- L'hydrolyse qui correspond à la réaction d'activation.
- La polymérisation qui est l'étape de croissance des chaînes.
- Afin d'obtenir une vitesse de réaction appropriée, on ajoute à la formulation un catalyseur ou, au contraire, un inhibiteur de réaction.

2.5.1 L'hydrolyse :

Pour que les alkoxydes puissent condenser à température ambiante, l'hydrolyse des groupements –OR doit débiter le processus réactionnel. Cette étape est nécessaire pour donner naissance aux groupements hydroxyles :

L'hydrolyse est une substitution nucléophile d'un ligand –OH à un ligand –OR. Elle s'accompagne d'une consommation d'eau et d'une libération d'alcool. Au cours de cette étape, on crée la fonctionnalité du précurseur vis à vis de la polycondensation.

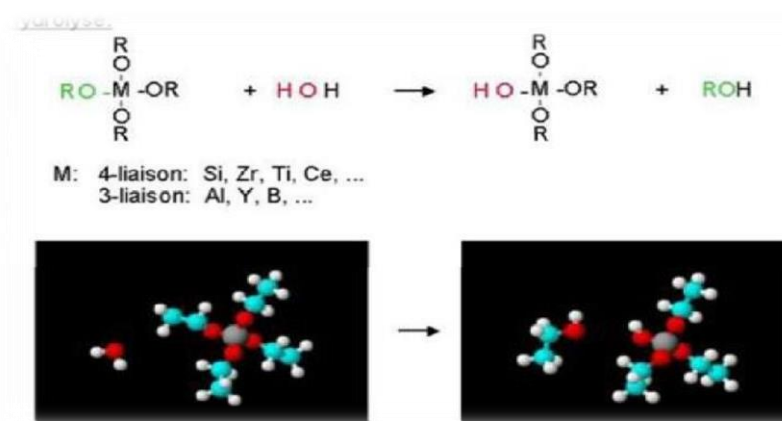
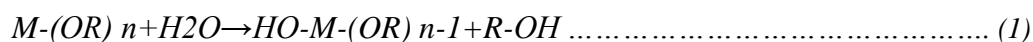
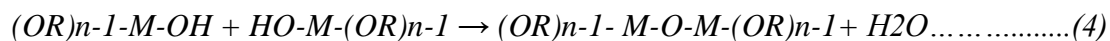
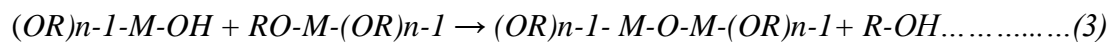


Figure II.4: processus d'hydrolyse

2.5.2 La polycondensation :

Les groupements (HO-M (-OR)_{n-1}) générés au cours de l'hydrolyse réagissent soit entre eux en donnant une molécule d'eau (réaction 2), soit avec une molécule de l'alkoxyde M(-OR) en donnant une molécule d'alcool (réaction 1) entraînant ainsi la création des ponts M-O-M ou chaque atome d'oxygène devient un pont reliant deux atomes du métal M. Ceci conduit à la formation d'un gel dont la viscosité augmente au cours du temps, ce gel contient des solvants et des précurseurs qui n'ont pas encore réagit[31].

Ce processus est régi par les réactions suivantes à température ambiante :



● Condensation

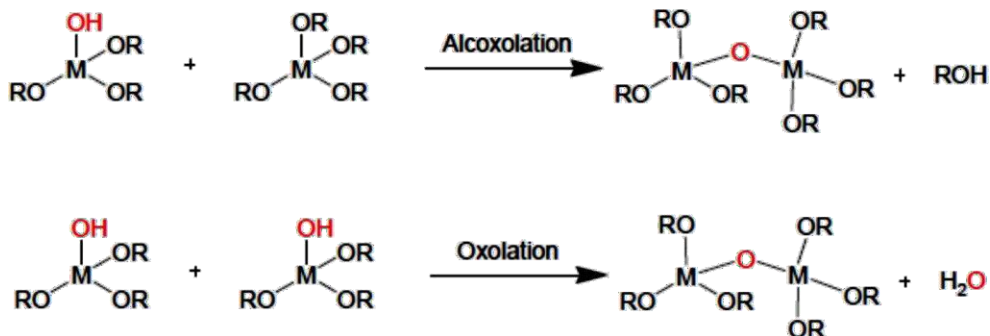


Figure II.5: processus de condensation

2.5.3 La transition sol-gel :

Au cours de la polymérisation il y a création d'amas polymériques dont la taille croit avec le temps, lorsque l'un de ces amas atteint une dimension infinie c'est-à-dire la taille du récipient la viscosité devient également infinie c'est le point de transition sol gel. (figure II.6). A partir de ce point l'amas continue à évoluer en incorporant les groupements polymériques plus petit. Une fois que toutes les liaisons ont été utilisées, le gel est formé [31].

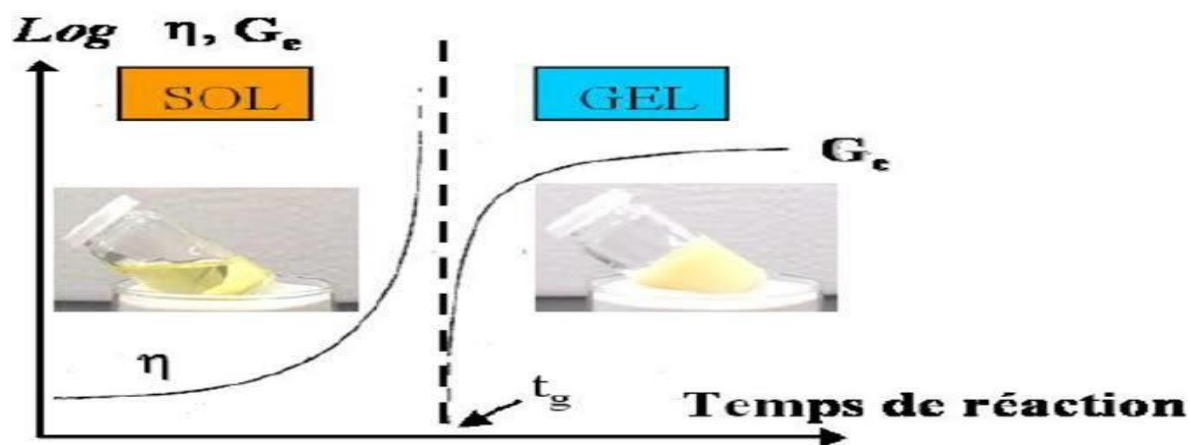


Figure II.6. Evolution de la viscosité de la solution et de la constante

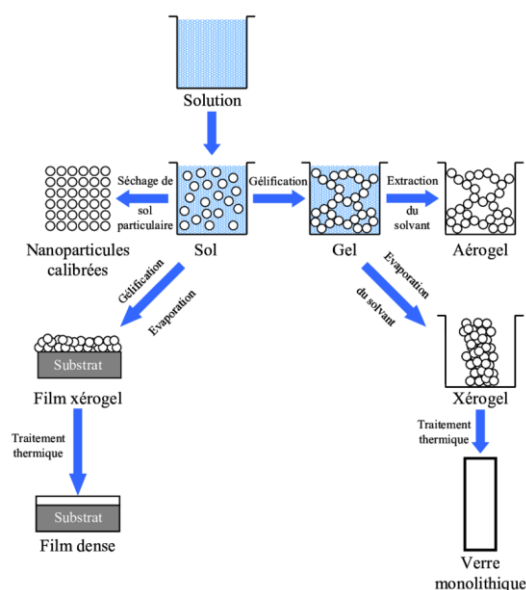


Figure II.7. Description schématique du processus de polymérisation sol-gel

2.6 Paramètres influençant la cinétique des réactions :

La structure finale du gel et ses propriétés dépendent des réactions d'hydrolyse et de condensation des précurseurs. Les cinétiques relatives de l'hydrolyse et de la condensation, responsables de la croissance des amas polymériques qui engendrent le réseau, vont imposer les caractéristiques du gel obtenu. Ces vitesses de réaction, et par suite la viscosité, dépendent de plusieurs paramètres dont il faudra donc tenir compte lors du choix d'un processus d'élaboration. Les paramètres influençant les réactions sont la température, le pH, la nature du précurseur et du solvant et les concentrations des réactifs [32,33].

2.6.1 La température :

C'est le premier paramètre à considérer, qui intervient dans toute réaction chimique. Dans notre cas, elle a une influence sur les vitesses d'hydrolyse et de condensation dès la préparation du sol, puis pendant le vieillissement ou le stockage. Evidemment, plus elle est élevée, plus les réactions sont rapides.

2.6.2 Le choix de précurseur et de sa concentration :

Ce choix se fait en fonction de la réactivité de l'alcoxyde et du type d'échantillon que l'on veut élaborer. Quant à la concentration dans le sol, elle est surtout importante lors de la condensation. En effet, plus elle est faible, plus les molécules aptes à se lier sont éloignées les unes des autres, ce qui retarde les réactions.

2.6.2.1 Le solvant

Les alcoxydes ne sont pas miscibles dans l'eau, il est donc nécessaire de mélanger les précurseurs, l'eau et éventuellement le catalyseur, dans un solvant commun. Il est alors préférable d'utiliser l'alcool correspondant au ligand $-OR$ de l'alcoxyde, ceci afin d'éviter d'éventuelles réactions entre les différents composants susceptibles de modifier les cinétiques de réactions. Le sol de départ est donc généralement une solution alcoolique.

2.6.2.2 Le PH du sol (choix du catalyseur)

Étant donné les mécanismes mis en jeu lors de la gélification, il semble évident que le pH va jouer un rôle important dans l'évolution des réactions ; en effet, les ions H_3O^+ et OH^- n'ont pas la même influence sur les deux types de réaction : le cation H_3O^+ , attiré par l'oxygène, facilite la substitution des groupes OR par OH^- (hydrolyse), tandis que l'anion OH^- , attiré par le métal M électro-négatif, privilégie la formation de liaison $M-O-M$ (condensation).

2.6.3 Traitement Thermique séchage recuit

L'étape du dépôt et de la formation des gels est suivie par deux autres opérations : le séchage et le recuit. Ces deux opérations nécessaires à l'obtention de matériaux de bonne qualité, changent les propriétés structurales des matériaux utilisés ; c'est pourquoi une étude approfondie de ces deux traitements thermiques a été réalisée afin d'obtenir les meilleures structures possibles [34].

Le séchage est une étape très importante dans la réalisation de matériaux de qualité, elle correspond à l'évaporation des solvants résiduels par diffusion à travers les pores. Le séchage s'effectue à basse température.

Il existe plusieurs types de séchage permettant d'obtenir des types de matériaux différents :

- ✓ Le gel peut être séché dans des conditions douces . Il durcit en se compactant : c'est un **xérogel** (formation des verres et céramiques denses).

- ✓ Le solvant peut être évaporé dans des conditions supercritiques (vitesse d'évaporation importante et constante) pour former un gel très peu compact : c'est un **aérogel**.

- ✓ Lorsque l'on n'en est encore qu'à l'étape du sol, il est possible de répandre le sol sur une surface pour former des films de xérogels en couches minces (par exemples les techniques de spin-coating ou dip-coating) .

Le recuit ou traitement thermique, est séparé de la phase de séchage ; cette phase est primordiale dans la formation du matériau. Le recuit a deux fonctions principales : l'élimination des espèces organiques présentes dans la solution de départ (groupements organiques de type Alkyles (-OR-)) et la cristallisation et densification du matériau. C'est uniquement après ce recuit que l'on peut obtenir le matériau désiré. Les recuits sont généralement réalisés à des températures comprises entre 300 °C et 700 °C.

2.7 L'oxyde de zinc (ZnO) :

2.7.1 Introduction

Les oxydes métalliques constituent une classe importante de matériaux du point de vue scientifique et technologique. Ils ont trouvé d'énormes applications intéressantes dans différents domaines technologiques.

Un oxyde métallique en générale est un corps constitué d'atomes métalliques et d'atomes d'oxygène. Les oxydes métalliques sont classés en deux grandes catégories : oxydes métalliques simples sont constitués par un métal comme : CuO, ZnO, SnO₂, TiO₂, SiO₂, et oxydes métalliques mixtes sont constitués par deux ou plusieurs métaux comme : BaTiO₃, CaTiO₃, Mg₂SiO₄. La plupart des oxydes métalliques sont des semi-conducteurs à grand gap, dont leurs propriétés sont liées fortement aux méthodes d'élaboration et aux conditions de préparation et de dépôt. La maîtrise de ces techniques et de ces paramètres permette l'obtention d'un oxyde métallique avec des propriétés physico- chimiques bien déterminées.

2.7.2 Paramètres de déposition de films minces d'oxyde de zinc (ZnO) par la technique sol- gel :

L'élaboration d'une couche mince à haut qualité de l'oxyde de zinc (ZnO) par la technique sol-gel est une étape très importante et délicate. Les principales étapes de la préparation de films minces par le procédé sol-gel sont : préparation de la solution de précurseur, déposition du sol préparé sur un substrat par la technique choisie, traitement thermique du xérogel. La fabrication de couches minces d'oxyde de zinc est influencée par plusieurs facteurs :

- La nature et la concentration de précurseurs.
- Le type de solvant et l'additif.
- Le temps de vieillissement de la solution.
- La nature du substrat.
- La méthode de coating de substrat et ses vitesses.
- Le séchage et le recuit des couches minces[28-34 ,35].

2.7.3 Quelques applications de films minces de l'oxyde de zinc :

Grâce à ses propriétés semi-conductrices, piézo-électriques, optiques et catalytiques, l'oxyde de zinc en couches minces a de multiples applications. Il occupe une place importante dans l'industrie électronique. En raison de leurs propriétés piézo-électriques, des films de ZnO peuvent être utilisés comme détecteurs mécaniques. Des couches minces d'oxyde de zinc peuvent servir également de capteurs chimiques très sensibles dans des détecteurs de gaz, oxydés ou réduits. Il peut servir aussi d'électrode transparente dans des dispositifs optoélectroniques (diodes émettant de la lumière), dans des cellules solaires et des photopiles [37-42].

2.8 Conclusion

En résumé, le dip coating et la méthode sol-gel offrent des approches efficaces pour le dépôt de couches minces, avec des applications significatives dans la fabrication de revêtements fonctionnels et de dispositifs avancés. L'utilisation de l'oxyde de zinc, avec ses propriétés uniques telles que sa large bande interdite, sa transparence optique et sa stabilité chimique, présente un grand potentiel dans ces techniques. Que ce soit pour des revêtements antibactériens, des dispositifs optoélectroniques ou des applications biomédicales, la combinaison du dip coating, de la méthode sol-gel et de l'oxyde de zinc ouvre la voie à des avancées technologiques prometteuses dans divers domaines industriels et scientifiques.

Chapitre 3

3.1	Introduction.....	29
3.2	Principes Fondamentaux du Dip-Coating	30
3.3	Innovations Récentes dans la Technologie du Dip-Coating	30
3.4	Conception de machine dip coating	31
3.4.1	List des composants :	31
3.4.2	Conception mécanique :.....	32
3.4.2.1	Mécanisme de mouvement :.....	32
3.4.2.2	Couplage	32
3.4.2.3	Guidage Linéaire.....	33
3.4.3	Conception électrique :	33
3.4.3.1	Système de contrôle :	33
3.4.3.2	Moteur pas à pas :	34
3.4.3.3	Le pilote L298N :.....	34
3.4.4	Câblage des composants.....	35
3.4.5	Interface utilisateur :	36
3.4.5.1	Interaction utilisateur :	36
3.4.6	Conception par 3D :	37
3.4.6.1	Support substrat :	37
3.5	Fabrication et assemblage :.....	38
3.5.1	Structure :.....	38
3.5.2	Assemblage :	39
3.6	Le prototype de machine dip coating :.....	40
3.7	Le prototype real de machine dip coating :.....	41
3.8	Conclusion	42

3.1 Introduction

Dans le cadre du développement technologique et industriel, les start-ups jouent un rôle crucial en apportant des innovations et des solutions pratiques aux défis contemporains. En Algérie, ce secteur est en pleine expansion, favorisé par un environnement entrepreneurial de plus en plus dynamique et des politiques incitatives. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre projet : la conception et la réalisation d'une machine de dip coating, un dispositif essentiel pour divers procédés de revêtement.

L'objectif de ce chapitre est de détailler le processus de réalisation d'une machine de dip coating qui répond aux besoins du marché algérien. Cette initiative vise non seulement à répondre à une demande croissante en équipements pédagogique et de recherche de haute précision, mais également à promouvoir l'innovation locale et à renforcer les capacités industrielles du pays.

Notre approche se divise en plusieurs étapes clés. Tout d'abord, une étude approfondie des besoins du marché et des spécifications techniques requises sera effectuée. Ensuite, la conception mécanique et électronique de la machine sera abordée, suivie par la phase de prototypage et de tests. Enfin, une analyse économique et une stratégie de mise en marché seront présentées pour assurer la viabilité et la pérennité du projet.

La conception et la réalisation de ce projet s'inscrit dans une vision à long terme de développement industriel en Algérie, en capitalisant sur les talents locaux et en créant des synergies entre la recherche académique et le secteur privé. Ce mémoire se veut donc une contribution substantielle à l'innovation technologique dans le secteur de fabrications des équipements scientifiques pédagogiques et de recherche. Ce dispositif consiste aussi à une application industrielle efficace de dépôt de couche mince. En effet, le secteur de fabrication de ce type d'équipements peut participer à l'enrichissement du secteur des industries innovantes et de développement, en créant des emplois et en réduisant la facture de devises.

Ce chapitre, exposera en détail chaque étape de la conception et de la réalisation de la machine de dip coating, mettant en lumière les défis techniques rencontrés et les solutions innovantes apportées. Il illustrera également l'impact potentiel de ce projet sur l'écosystème entrepreneurial et industriel algérien, soulignant l'importance de l'innovation locale dans le développement économique durable.

3.2 Principes Fondamentaux du Dip-Coating

Le processus de dip coating repose sur des principes physiques et chimiques précis. Il se déroule en quatre étapes principales :

1. Immersion : Le substrat est plongé dans une solution de revêtement.
2. Maintien : Le substrat est maintenu dans la solution pour un temps défini, permettant une interaction optimale entre le substrat et la solution.
3. Retrait: Le substrat est retiré à une vitesse constante, ce qui détermine l'épaisseur et l'uniformité du film formé.
4. Séchage/Recuit : Le revêtement est solidifié par séchage ou recuit pour obtenir les propriétés finales désirées.

Les paramètres clés influençant le processus incluent la vitesse de retrait, la concentration de la solution, la viscosité, et la température ambiante. Une maîtrise fine de ces paramètres est essentielle pour obtenir des revêtements de qualité avec les caractéristiques requises pour des applications spécifiques.

Applications et Avantages du Dip-Coating

Le dip coating trouve des applications dans une multitude de secteurs. En voici quelques exemples :

- Électronique : Dépôt de couches minces sur des circuits imprimés et des capteurs.
- Biomédical : Fabrication de dispositifs tels que des stents recouverts de médicaments ou des implants biomatériaux.
- Énergies renouvelables : Production de cellules solaires à couches minces et de supercondensateurs.
- Optique : Création de revêtements anti-reflets et de films protecteurs pour des lentilles.

Les principaux avantages du dip coating incluent sa simplicité et sa flexibilité. La technique permet de traiter des substrats de formes et de tailles variées avec une précision remarquable. De plus, elle est relativement économique et facilement adaptable à une production à grande échelle. La possibilité de contrôler finement les paramètres du processus permet d'obtenir des revêtements homogènes et d'épaisseur uniforme, essentiels pour les performances des dispositifs finaux.

3.3 Innovations Récentes dans la Technologie du Dip-Coating

Les avancées récentes dans la technologie du dip coating ont largement étendu ses capacités et applications. Voici quelques-unes de ces innovations :

- Intégration de technologies numériques : Des systèmes de dip coating assistés par ordinateur permettent un contrôle précis et automatisé du processus, garantissant une

régulation en temps réel des paramètres critiques pour une répétabilité et une uniformité optimales.

- Développements dans les matériaux de revêtement : L'utilisation de nanomatériaux et de solutions composites ouvre de nouvelles perspectives pour la fabrication de films aux propriétés spécifiques, comme une conductivité améliorée, une résistance accrue, ou des caractéristiques optiques distinctes.

- Optimisation des processus : Des recherches se concentrent sur l'amélioration de l'efficacité énergétique et la durabilité des procédés de dip coating, incluant la réduction de la consommation de matériaux et d'énergie, ainsi que le développement de solutions de revêtement écologiques.

3.4 Conception de machine dip coating

3.4.1 List des composants :

List des composants
Clavier 4*4 touches Matrix
Afficheur LCD 16*4
Adaptateur I2C
Moteur pas à pas 5V
Module driver moteur pas à pas 5V
Coupleur flexible de moteur pas à pas
Fils de connexion adapté Arduino pack 40 fils
Carte Arduino Mega 2560 Rev3 avec
cableAlimentation à découpage 12V CC
5AModule abaisseur de tension 12V CC 5V
Capteur ultrasonic compatible Arduino
Alucobande pour fabrication de la carcasse du dispositif
Cable d'alimentation 220 V
Consommable pour imprimante 3D
Capteur de température compatible Arduino
Capteur d'humidité compatible Arduino
Plaque de jonction 90 degré
Vis trapézoïdale T8 500 mm avec écrouPièces
d'assemblage 90 degré
Système de guidage à base de roues
Roues de guidage
boulons et écrous

Tableau III.1 : List des composants

3.4.2 Conception mécanique :

3.4.2.1 Mécanisme de mouvement :

Pour le mécanisme de mouvement, nous avons utilisé une vis trapézoïdale de 8 mm de diamètre et 500 mm de longueur, ainsi qu'un écrou correspondant de 8 mm, afin de convertir le mouvement rotatif du moteur pas à pas en mouvement linéaire. Nous avons évité l'utilisation de poulies pour plusieurs raisons :

- Précision: La vis trapézoïdale offre une meilleure précision dans le positionnement.
- Capacité de Charge : Elle peut supporter des charges plus importantes.
- Durabilité : Elle assure une plus grande longévité du système.
- Sécurité : Elle contribue à une meilleure sécurité opérationnelle



Figure III.1 : *vis trapézoïdale*

3.4.2.2 Couplage

Nous avons utilisé un coupleur de dimensions 6.35 mm * 8 mm * 25 mm pour attacher l'axe du moteur à la vis trapézoïdale, assurant ainsi une transmission optimale du mouvement.



Figure III.2 : *coupleur 6.35mm*8mm*

3.4.2.3 Guidage Linéaire

Pour le guidage linéaire, nous avons opté pour des roues, une plaque de guidage Mini V, et un rail de guidage linéaire V-Slot de 20 mm * 20 mm. Ce choix permet d'assurer un guidage linéaire

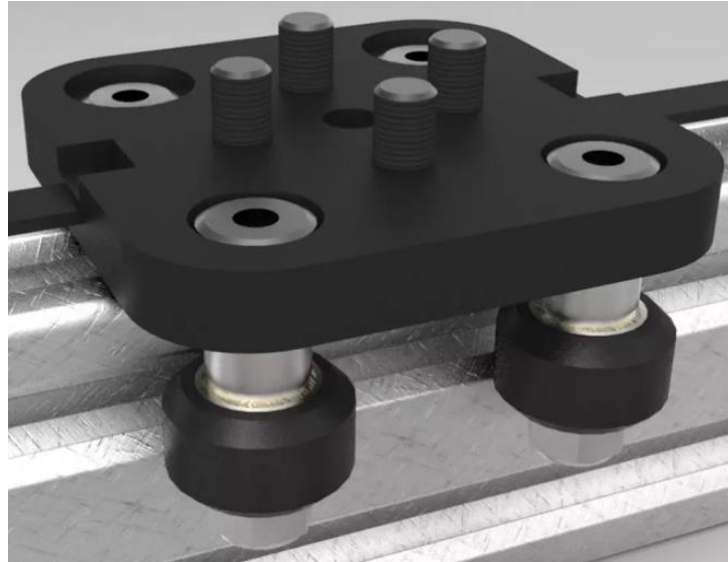


Figure III.3 : *guidage Mini V*

3.4.3 Conception électrique :

3.4.3.1 Système de contrôle :

Nous avons utilisé une carte Arduino pour commander et contrôler un moteur pas à pas de 5V, tirant parti de ses caractéristiques distinctives, qui sont particulièrement avantageuses dans des applications informatiques et robotiques. Voici un aperçu détaillé de ces caractéristiques et de leur mise en œuvre avec Arduino :

- Facilité d'Utilisation.
- Compatibilité Matérielle.
- Flexibilité et Extensibilité.



Figure III.4 : *Arduino*

3.4.3.2 Moteur pas à pas :

Nous avons utilisé un moteur pas à pas de 5V pour ses caractéristiques distinctives, qui sont particulièrement avantageuses dans des applications informatiques et robotiques nécessitant un contrôle précis et fiable. Voici un aperçu détaillé de ces caractéristiques :

Caractéristiques du Moteur Pas à Pas (5V) :

- Précision
- Contrôle de la Vitesse
- Maintien de la Position
- Fiabilité
- Facilité de Contrôle



Figure III.5 : *moteur pas à pas*

3.4.3.3 Le pilote L298N :

Le L298N est un pilote de moteur à double pont en H utilisé pour contrôler des moteurs CC et des moteurs pas à pas. Voici les points essentiels :

Caractéristiques :

- Deux canaux : Contrôle deux moteurs CC ou un moteur pas à pas bipolaire.
- Tension d'alimentation : 5V à 35V.
- Courant de sortie : Jusqu'à 2A par canal.
- Protection : Contre surchauffe et courts-circuits

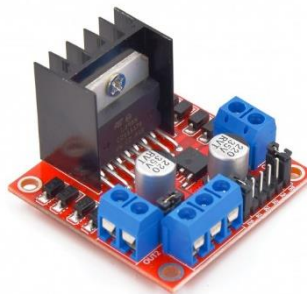


Figure III.6 : *Le pilote L298N*

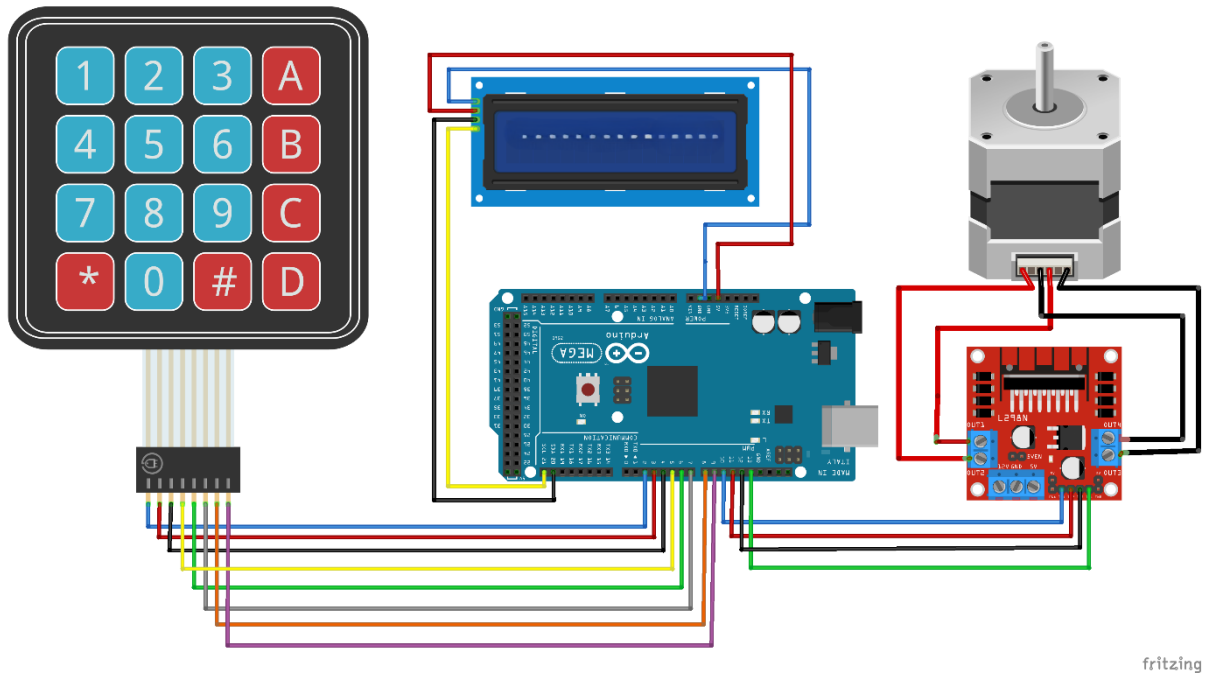
3.4.4 Câblage des composants

- Moteur Pas à Pas
 - Connecter les bobines du moteur aux sorties du driver L298N (OUT1, OUT2, OUT3, OUT4).

- Driver L298N
 - IN1 (Driver) -> Pin 10 (Arduino)
 - IN2 (Driver) -> Pin 11 (Arduino)
 - IN3 (Driver) -> Pin 12 (Arduino)
 - IN4 (Driver) -> Pin 13 (Arduino)
 - GND (Driver) -> GND (Arduino)
 - VCC (Driver) -> 5V

- Clavier Matriciel (4x4)
- Lignes (Row Pins)
 - R1 -> Pin 2 (Arduino)
 - R2 -> Pin 3 (Arduino)
 - R3 -> Pin 4 (Arduino)
 - R4 -> Pin 5 (Arduino)
- Colonnes (Column Pins)
 - C1 -> Pin 6 (Arduino)
 - C2 -> Pin 7 (Arduino)
 - C3 -> Pin 8 (Arduino)
 - C4 -> Pin 9 (Arduino)

- Afficheur LCD avec Module I2C
- Module I2C LCD
 - SDA -> SDA (Arduino,)
 - SCL -> SCL (Arduino,)
 - GND -> GND (Arduino)
 - VCC -> 5V (Arduino)



fritzing

Figure III.7 : *diagramme de câblage*

3.4.5 Interface utilisateur :

Afficheur LCD I2C : Affiche les informations et les instructions pour l'utilisateur.

Clavier matriciel : Permet à l'utilisateur de saisir la vitesse et de contrôler le sens de rotation du moteur.

3.4.5.1 Interaction utilisateur :

- Entrée de vitesse : L'utilisateur entre une vitesse en mm/s via le clavier.
- Sens de rotation : Utilisation des touches 'A' et 'B' pour définir le sens de rotation (horaire/anti-horaire).
- Affichage : Les informations saisies et les états (vitesse, sens) sont affichés sur le LCD.

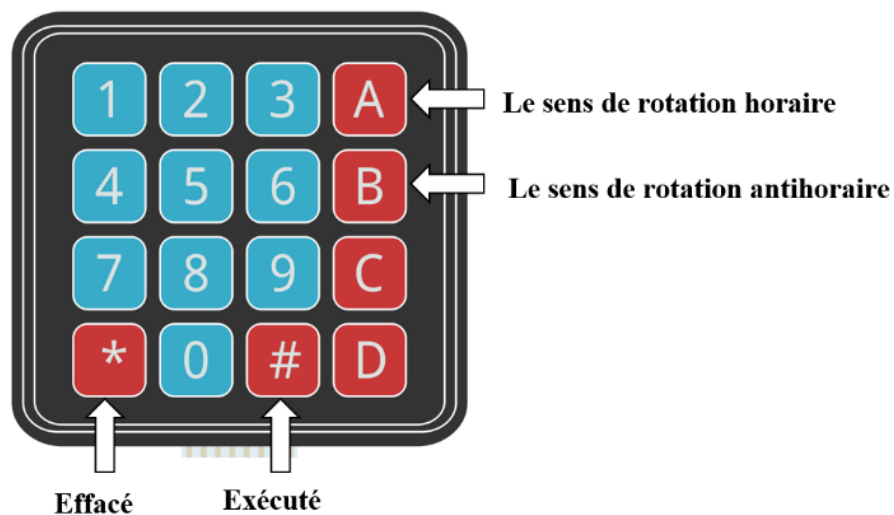


Figure III.8 : *Interaction sur le clavier*



Figure III.9: *Interface sur écran LCD*

3.4.6 Conception par 3D :

3.4.6.1 Support substrat :

Nous avons développé un support multi-substrat spécialement conçu pour le profilé en V de dimensions 20x20 mm. Ce support est capable de transporter une variété de substrats différents. La conception et la réalisation de ce support ont été effectuées en utilisant plusieurs outils logiciels.

Pour commencer, le logiciel SolidWorks a été utilisé pour dessiner et modéliser le support. SolidWorks est un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) qui permet de créer des dessins techniques précis et détaillés. Grâce à ses nombreuses fonctionnalités, il a été possible de concevoir un support robuste et fonctionnel répondant parfaitement aux exigences du projet. Une fois la conception terminée, le fichier de dessin au format STL a été exporté et importé dans le logiciel Creality Slicer. Ce dernier a pour rôle de convertir le fichier STL en un fichier G-code, qui est un langage de programmation utilisé par les imprimantes 3D pour réaliser des impressions. Le G-code contient toutes les instructions nécessaires à l'imprimante 3D, telles que les coordonnées de déplacement, les températures de la buse et du lit d'impression, ainsi que les vitesses de déplacement.

Enfin, le fichier G-code généré par Creality Slicer a été envoyé à une imprimante 3D, en l'occurrence une Ender 3 Pro, pour fabriquer physiquement le support multi-substrat. L'imprimante 3D, grâce aux instructions contenues dans le G-code, a pu produire un support précis et conforme à la conception initiale.

Ainsi, grâce à l'utilisation combinée de SolidWorks et Creality Slicer, il a été possible de concevoir, de convertir et de fabriquer un support multi-substrat adapté au profilé en V de 20x20 mm, capable de transporter divers substrats avec efficacité.

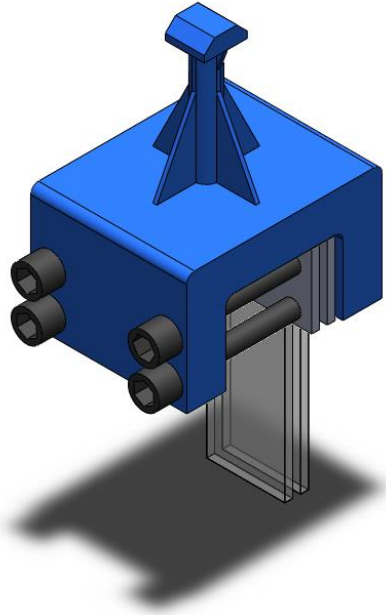


Figure III.10 : *Support substrat*

3.5 Fabrication et assemblage :

3.5.1 Structure :

Nous avons utilisé un profilé en V de dimensions 20x20 mm pour réaliser la carcasse de la machine de dip coating. Ce choix de matériau et de design présente plusieurs avantages notables. La structure ainsi créée comporte une place spécialement conçue pour monter le support du moteur pas à pas, de type NEMA 23. Cette configuration permet de garantir une installation robuste et stable du moteur, essentiel pour le bon fonctionnement et la précision de la machine.

En plus de l'emplacement pour le moteur pas à pas, la structure intègre également un rail de guidage pour le mini V. Ce rail de guidage est crucial pour assurer un mouvement fluide et précis des composants mobiles de la machine, ce qui est indispensable pour obtenir des résultats de dip coating uniformes et de haute qualité.

La structure réalisée avec le profilé en V de 20x20 mm se caractérise par plusieurs avantages :

- Facilité d'installation : Le design modulaire et les dimensions standardisées du profilé en V permettent une installation rapide et facile. Les composants peuvent être assemblés et ajustés avec une grande flexibilité, ce qui facilite les modifications et les mises à jour de la machine.
- Dureté : Le profilé en V est fabriqué à partir de matériaux robustes et durables, offrant une excellente résistance à l'usure et à la déformation. Cette dureté garantit que la structure peut supporter des charges importantes et résister à des conditions de fonctionnement rigoureuses sans compromettre la précision ou la stabilité.

- Poids léger : Malgré sa robustesse, le profilé en V est relativement léger. Cette caractéristique est particulièrement avantageuse pour les applications nécessitant des mouvements rapides et précis, car elle réduit l'inertie et permet un contrôle plus facile des déplacements de la machine

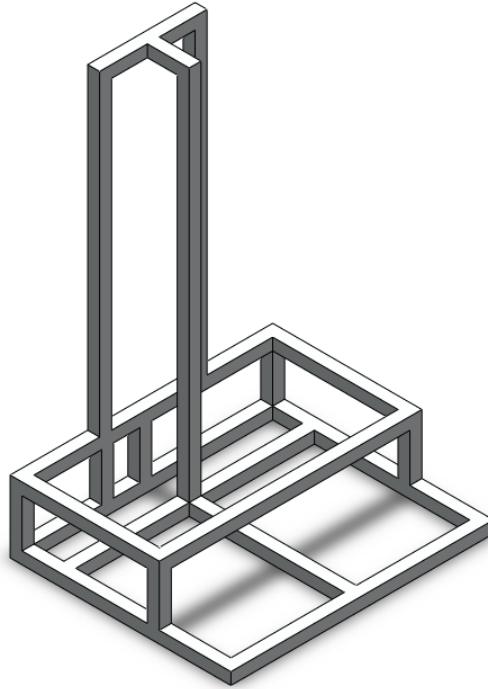


Figure III.11 : carcasse de la machine de dip coating

3.5.2 Assemblage :

Pour l'assemblage de la carcasse de la machine, nous avons utilisé des cast corners. Ces cast corners sont spécifiquement conçus pour fournir une résistance et une stabilité accrues à la structure. En utilisant des cast corners, nous avons pu garantir que les jonctions entre les différentes parties de la carcasse sont solides et bien alignées, ce qui est crucial pour le bon fonctionnement et la durabilité de la machine. Les cast corners aident également à absorber les vibrations et les chocs, réduisant ainsi l'usure et prolongeant la durée de vie de l'ensemble de la machine. Cette méthode d'assemblage assure que chaque composant est fermement maintenu en place, ce qui permet à la machine de fonctionner de manière optimale sous des charges et des conditions de travail variées.

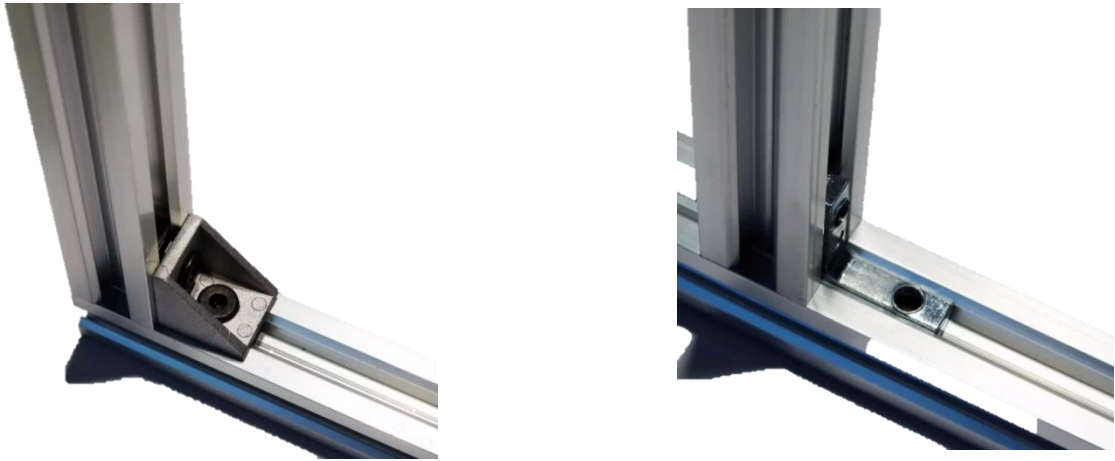


Figure III.12 : *cast corners*

3.6 Le prototype de machine dip coating :

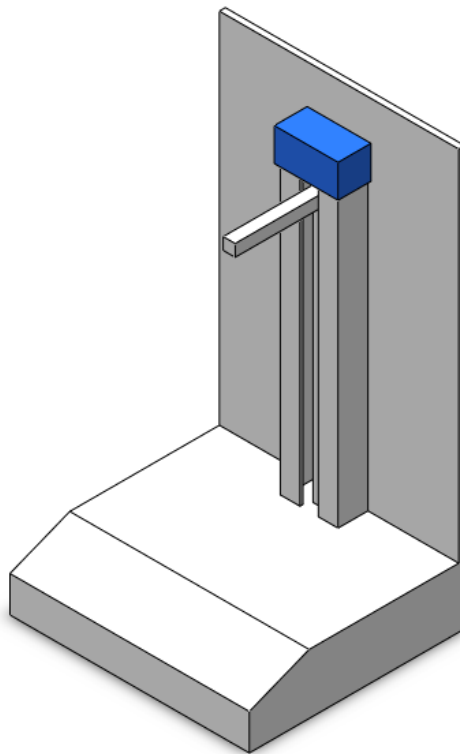


Figure III.13 : prototype de machin dip coating sur SOLIDS

3.7 Le prototype real de machine dip coating :



Figure III.14 : prototype de machin dip coating real

3.8 Conclusion

La conception et la réalisation d'une machine de dip-coating pour la fabrication de couches minces par la méthode sol-gel a permis de développer un dispositif précis et fiable. Ce projet a inclus la conception minutieuse, la sélection des matériaux adéquats, et l'optimisation des paramètres de dépôt pour garantir des films homogènes et de haute qualité. Malgré les défis rencontrés, notamment en termes de calibration et de contrôle des processus, les résultats obtenus démontrent une excellente uniformité et adhérence des revêtements produits. Cette machine constitue un atout majeur pour les applications industrielles, pédagogique et de recherche nécessitant des couches minces de haute performance.

Conclusion

Générale

Conclusion **Générale**

Ce travail de fin d'étude start-ups avait pour objectif, la conception, la réalisation et la mise en œuvre d'un dispositif sol-gel dip coating, en mettant l'accent sur les innovations technologiques et les améliorations apportées pour augmenter la précision et l'efficacité du processus. Pour se faire, nous avons organisé notre mémoire en trois chapitres, le premier chapitre a fourni une compréhension approfondie des diverses techniques de dépôt des couches minces, en examinant les avantages et limitations de chaque méthode. Le deuxième chapitre s'est concentré sur le procédé sol-gel dip coating, détaillant le processus de transition de la solution liquide au gel solide et l'importance de cette méthode dans la fabrication de couches minces uniformes. Enfin, le troisième chapitre a illustré la conception et la réalisation d'un dispositif de dip coating, mettant en avant les innovations technologiques et les améliorations apportées pour optimiser le processus de dépôt de couche mince par immersion.

Notre approche comprend plusieurs étapes clés. Tout d'abord, nous avons réalisé une étude approfondie des besoins du marché et des spécifications techniques requises. Ensuite, nous avons abordé la conception mécanique et électronique de la machine, suivie par la phase de prototypage et de tests. Enfin, nous avons présenté une analyse économique et une stratégie de commercialisation afin d'assurer la viabilité et la durabilité du projet.

En somme, ce travail présente une description détaillée du processus de développement d'un dispositif de dip coating répondant aux exigences du marché de l'équipement pédagogique et de recherche en Algérie. En effet, ce dispositif représente une solution abordable et adaptable pour la recherche en nanotechnologie et le développement de revêtements fonctionnels, pertinents dans divers domaines industriels et scientifiques tels que l'électronique, les capteurs, et la biomédecine.

Cette initiative vise à répondre à une demande croissante en équipements de haute précision destinés à des fins pédagogiques et de recherche, tout en favorisant l'innovation locale et en renforçant les capacités industrielles du pays.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références

Chapitre 1

- [1] Belouadah Widad et Bradcha Aicha, Étude des Propriétés Des Couches minces à base De ZnO Par Evaporation, université Mohamed Boudiaf - Msila, 2018.
- [2] Daranfad Ouarda, Elaboration et caractérisation des couches minces de Sulfure de Zinc préparées par spray ultrasonique, Mémoire Présenté pour obtenir le diplôme de Magister en Physique Université Mentouri-Constantine. (2017) .
- [3] Kirdous Arezki et Bouche Khchoukh Athmane, «élaboration et caractérisation des couches minces d'oxyde de cuivre : application électro-catalytique sur l'acide ascorbique,l'obtention du diplôme de Master en Chimie,» Université A. MIRA, Bejaïa, (2012).
- [4] Ait Braham Jugurtha, et Yaici Sofiane, , «Elaboration des couches minces de TiO₂, TiO₂ dopé Ag,et nano-composites Ag/TiO₂ par voie sol-gel, Caractérisations structurales et optiques, Mémoire de master,,» Université Abderrahmane .Mira de Béjaia, (2016).
- [5] Elhelli Saliha, «Contribution à l'étude structurale et physique des couches minces deTiO₂ Obtenues avec la méthode sol-gel, Mémoire de master,,» Université Kasdi Merbah, Ouargla, ,(2014).
- [6] B. J. Lokhande, I P.S. Pati et M.D, Uplane, Materials Letters 57 (2002).
- [7] Pere Rocai Cabarrocas, Thèse de Doctorat, Paris VII (1988).
- [8] Yan-mei Jiang, Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud (1992).
- [9] L. Tomasini (Sollac, Groupe Usinor), La Revue de Métallurgie-CIT (2001).
- [10] Jan Frederik Suyver. Synthesis, Spectroscopy and Simulation of doped Nanocrystals. (2003).
- [11] Attallah Mourad, Elaboration et caractérisation des couches minces d'oxyde de silicium,obtenues par voie sol-gel, Mémoire de master, Université Mentouri Constantine, 2010.
- [12] Nait Salem Naima et Guettafi Fahima, «Dépôt de couches minces, à taille de grainsnanométriques, de ZnS et ZnS dopées Mn par la méthode CBD, diplôme de Master en Chimie,» Université A. MIRA – Bejaïa, (2012-2013).
- [13] Kais Daoudi, Élaboration et caractérisation de films minces d'oxyde d'indium dopé à l'étainobtenus par voie Sol-Gel », Thèse de doctorat, université Claude Bernard-Lyon 1, 2002.
- [14] Fayssal Ynineb, Thème : Contribution à l'élaboration de couches minces d'Oxydes Transparents Conducteurs (TCO), Mémoire présente pour obtenir le diplôme de magister en physique, Université Mentouri Constantine, 2010.
- [15] BENKARA SALIMA, Etude des propriétés électroniques et photoniques des couches minces à base d'oxydes nanostructures, doctorat, Université du 20 Août 1955 Skikda, 2014.
- [16] Boulmelh Salah, «Élaboration et caractérisation d'un dépôt de couches mincesd'oxyde de zinc par spray pyrolyse), Université de Frères Mentouri Constantine, (2015).

- [17] Selma Kebaili, «Effet de dopage à l'erbium sur les propriétés physique et photocatalytique de couches minces de TiO₂ Mémoire de master,,» Université M'hamed Bougara-Boumerdes, (2017).
- [18] Manuel Houmard , «Revêtements sol gel TiO₂-SiO₂ naturellement super hydrophiles visant à développer des surfaces à nétoyabilité accure, Thèse de Doctorat, p.35.,» (2009).
- [19] Certech asbl, «Sol-Gel, Cahier technologique, Centre de ressources technologique en chimie la page 7,» BELGIUM,(2016).
- [20] Azizi Houda , «Effets de l'irradiation laser sur les propriétés des films d'oxyde de titane obtenus par la méthode sol-gel, Mémoire de master,» Université Larbi Ben M'hidi D'oum El Bouaghi, (2013).
- [21] Thi Trang Phan , «Elaboration et caractérisation électrochimique de revêtements sol-gel hybrides pour la protection d'un acier au carbone contre la corrosion» (2015).
- [22] Elhelli Saliha, «Contribution à l'étude structurale et physique des couches minces deTiO₂ Obtenues avec la méthode sol-gel, Mémoire de master,» Université Kasdi Merbah Ouargla,, (2014).
- [23] Ghazzal Mohamed Nawfal, « Développement et validation d'un test pour déterminer les propriétés photo catalytiques de surfaces autonettoyantes : application aux couches minces de TiO₂, Thèse de doctorat,(2008)».

chapitre 2

- [24] Équation Landau-Levich:
 <https://fr.wikipedia.org/wiki/Probl%C3%A8me_de_Landau-Levich> [En ligne]
- [25] Thi Trang Phan, « Thème : Elaboration et caractésation électrochimique de revêtements sol –gel hybrides pour la protection d'un acier au carbone contre la corrosion) Pour obtenir le grade de docteu,» L'Université lille1(2015).
- [26] Selma Kebaili , «Ecet de dopage à l'erbium sur les propriétés physique et photo catalytique de couches minces de TiO₂, Mémoire de Master,» Université m'hamed bougara- boumer, 02 juillet (2017).
- [27] Attallah Mourad , «Elaboration et caractérisation des couches minces d'oxyde de silicium, obtenues par voie sol-gel, Mémoire présente pour obtenir LE diplôme de magister en physique,» Université Mentouri-Constantine, (2010).
- [28] Brinker C.J., et Sherrer G.W, «Academic Press,» San Diego, (1989).
- [29] Livage J. Barboux , P. Navabi et M. Judeinstein, «Solid State Ionics, p135,» (1989).
- [30] H. Cattey, « thèse de doctorat,» Université de Franche-Comté, Besançon, (1997).
- [31] B. Hannane, «mémoire de magister, université de constantine (2007)».
- [32] «Cahier technologique sol-gel : www.certtech.be,» [En ligne].
- [33] «Dossier Technique : Le Procédé Sol-Gel : <https://rescoll.fr/wp>,» [En ligne].
- [34] A. MAHROUG, these de doctorat,, université de constantine (2015).

- [35] L. Znaidi, A review, *Materials Science and Engineering* p174 (2010).
- [36] L. Xune, *Appl. Surf. Materials Science* p 257 (2011).
- [37] M. Sharma, *Appl. Materials Science* 255 (2008).
- [38] K. Actuators. *Eléments de chimie Physique*, p 161 (2012) .
- [39] J. Kulandaisamy, *J. Alloys Compna*, p 422-429 (2016).
- [40] J.Y. Lee, *chimie Physique* p 517 (2009).
- [41] S Ilican, *Eléments de chimie Physique*, p 675-683 (2018).
- [42] M. Wraback, *Apply Physque Lett.* 74 p 507–509 (1999).
- [43] M. Schaadt, H.-T. Grahn, *Apply Physque* (2007).

ملخص: يصف هذا المشروع تصميم وتنفيذ جهاز لترسيب الطبقات الرقيقة باستخدام تقنية السول-جل، والذي يتم التحكم فيه بسبب بساطتها وفعاليتها في ترسيب الأفلام الرقيقة. يتألف dip-coating تم اختيار تقنية الـ Arduino بواسطة منصة Arduino ، وجهاز للتسخين لتبخير المذيبات. يقوم Arduino النظام من حوض للسول-جل، وآلية رفع محرك تتحكم بها بتنظيم العملية عن طريق مزامنة رفع وخفض الركيزة وفقاً لمعاملات محددة مسبقاً، مما يضمن ترسيباً متساوياً وقابلاً للتكرار للأفلام الرقيقة. يوفر هذا الجهاز حلاً ميسراً وقابلاً للتكيف للبحث في مجال التكنولوجيا النانوية وتطوير الطلاءات الوظيفية في مختلف المجالات الصناعية والعلمية

Résumé : Ce projet présente la conception et la réalisation d'un dispositif de dépôt de couches minces par la technique sol-gel, utilisant le dip-coating et commandé par une plateforme Arduino. La méthode de dip-coating est choisie pour sa simplicité et son efficacité dans le dépôt de films minces. Le système comprend une cuve de sol-gel, un mécanisme de levage motorisé, un dispositif de chauffage pour l'évaporation du solvant, tous contrôlés par Arduino. Ce microcontrôleur assure la régulation du processus, synchronisant le mouvement du substrat selon des paramètres prédéfinis, assurant ainsi un dépôt uniforme et reproductible des couches minces. Ce dispositif représente une solution abordable et adaptable pour la recherche en nanotechnologie et le développement de revêtements fonctionnels, pertinents dans divers domaines industriels et scientifiques tels que l'électronique, les capteurs, et la biomédecine.

Abstract: This project describes the design and implementation of a thin film deposition device using the sol-gel technique, controlled by an Arduino platform. Dip-coating was chosen for its simplicity and effectiveness in thin film deposition. The system consists of a sol-gel chamber, a motorized lifting mechanism controlled by Arduino, and a heating device to evaporate the solvent. Arduino regulates the process by synchronizing the lifting and lowering of the substrate according to predefined parameters, ensuring uniform and reproducible deposition of thin films. This device offers an affordable and adaptable solution for research in nanotechnology and the development of functional coatings across various industrial and scientific fields.