

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 : - MERAT Abdelkader Bassim

- BENABDERRAHMANE Bilal

- DAHMAR Rabah

- CHEKAL Hammou

Sujet

Conception et réalisation d'un dispositif de dépôt

des couches minces

par procédé sol-gel (spin coater) commandé par arduino

Soutenu publiquement, le 30/06/2024 , devant le jury composé de :

M. DAOUD SALAH	Professeur	à Univ-BBA	Président
Mme. SLIMANI WAHIBA	Docteur	à Univ-BBA	Examineur
M.SAAD SAOUD MARWAN	Docteur	à Univ-BBA	Examineur
M. ROUABAH ZAHIR	Professeur	à Univ-BBA	Encadrant
M. BOUTAHAR LOTFI	Docteur	à Univ-BBA	Co-Encadrant

Remerciements

Ce travail est l'aboutissement d'un dur labeur et de beaucoup de sacrifices; nos Remerciements vont d'abord au Créateur de l'univers qui nous a doté d'intelligence, et nous a maintenu en santé pour mener à bien cette année d'étude.

Nous tenons à exprimer mon vif remerciement à Monsieur ZAHIR ROUABEH, Professeur à l'université de Bordj Bou Arreridj pour nous avoir fait l'honneur d'accepter d'encadrer ce travail. Nos remerciements infinis pour le soutien matériel que vous nous avez fourni pour la réalisation du projet.

Nous tenons particulièrement à remercier, mon encadreur Monsieur LOTFI BOUTAHAR qui nous a co-encadrés tout au long de la réalisation de ce projet, nous le remercions pour sa patience, ces précieux conseils, ses encouragements et son soutien continu.

Nous tenons aussi à remercier : le chef de département de génie mécanique de la Faculté des sciences et de la technologie de l'université de Bordj Bou Arreridj Mr B. BELFEGAS,

Nous remercions sincèrement tous mes camarades du Filière de génie mécanique, énergétique, tous mes collègues

Enfin, on remercie tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin dans l'élaboration de ce travail ;

Merci beaucoup.

Dédicaces

Malgré les obstacles qui se dressent sur notre chemin et malgré les difficultés rencontrées dans nos études, c'est avant tout notre unique et unique richesse. Avec notre gratitude.

Nous dédions cet humble travail à ceux qui nous ont soutenu et encouragé durant ces années des études.

A nos chers pères et mères, Vous avez toujours été là pour nous soutenir et nous encourager.

À la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui ne m'a jamais dit non Exigeante et qui n'a ménagé aucun effort pour me faire plaisir : notre bien-aimée la mère.

A nos frères pour leur soutien moral et leurs précieux conseils

À nos chères sœurs qui n'ont jamais cessé de nous offrir conseils, encouragements et soutien

Tout au long de nos études, à toutes nos familles Merat, Ben Abderrahmane, Dahmar et Chekal.

Sans oublier tous nos professeurs

A nos chers amis

Ils m'ont toujours encouragé et je leur souhaite encore plus de réussite.

Pour tous les étudiants du GM 2024

À tous ceux que nous aimons.

Table des matières

Liste des figure	I
Liste des tableaux.....	I
Abréviation.....	II

Sommaire:

<i>Introduction Générale.....</i>	<i>1</i>
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Techniques de dépôt des couches minces

<i>I.1 Introduction</i>	<i>4</i>
<i>I.2 Généralités sur les Couches minces.....</i>	<i>4</i>
<i>I.2.1 Définition d'une couche mince.....</i>	<i>4</i>
<i>I.2.2 Intérêt et caractéristiques des couches minces.....</i>	<i>4</i>
<i>I.2.3 Domaines d'applications des couches minces.....</i>	<i>5</i>
<i>I. 3 Différents types de substrats.....</i>	<i>6</i>
<i>I.4 Techniques de déposition des couches minces.....</i>	<i>6</i>
<i>I.4.1 Processus chimique (sous vide).....</i>	<i>7</i>
<i>I.4.1.1 Dépôt chimique (CVD).....</i>	<i>7</i>
<i>a. Dépôt assisté plasma (PECVD).....</i>	<i>8</i>
<i>b. Dépôt CVD à radiation laser (LCVD).....</i>	<i>9</i>
<i>c. Dépôt à basse pression (LPCVD).....</i>	<i>9</i>
<i>I.4.2 Processus chimique (sans vide).....</i>	<i>10</i>
<i>I.4.2.1 Dépôt par spray pyrolyse.....</i>	<i>10</i>
<i>I.4.2.2 Dépôt par bain chimique.....</i>	<i>10</i>
<i>I.4.2.3 Méthode de sol gel.....</i>	<i>10</i>
<i>a) La méthode de trempage ou "Dip coating".....</i>	<i>11</i>
<i>b) La méthode de tournette ou "Spin coating".....</i>	<i>11</i>
<i>I.4.3 Processus physique (PVD).....</i>	<i>12</i>
<i>I.4.3.1 Évaporation thermique.....</i>	<i>12</i>
<i>I.4.3.2 Pulvérisation cathodique.....</i>	<i>12</i>
<i>I.5 Conclusion.....</i>	<i>13</i>

Chapitre II : Dépôt de couches minces par sol gel

<i>II.1 Introduction.....</i>	<i>16</i>
<i>II.2 Procédé sol gel.....</i>	<i>16</i>
<i>II.3 Technique de dépôt.....</i>	<i>17</i>
<i>II.4 Principe du Centrifugation [Spin-coating].....</i>	<i>17</i>
<i>II.4.1 principe fondamental du spin coating.....</i>	<i>18</i>
1. Dépôt de la solution.....	18
2. Rotation du substrat.....	18
3. Effet de la force centrifuge.....	18
4. Formation du film.....	18
5. Épaisseur du film.....	18
<i>II.4.2 Applications de la centrifugation.....</i>	<i>19</i>
<i>II.5 Critères pour un spin-coating optimal.....</i>	<i>19</i>
<i>II.6 Avantages et inconvénients de la technique.....</i>	<i>19</i>
<i>II.6.1 Avantages.....</i>	<i>19</i>
<i>II.6.2 Inconvénients.....</i>	<i>20</i>
<i>I.7 Etapes pour l'élaboration des couches minces par Spin-coating.....</i>	<i>20</i>
<i>II.8 Traitement thermique des couches déposées.....</i>	<i>21</i>
<i>II.9 Contrôle de l'épaisseur de la couche mince.....</i>	<i>21</i>
<i>II.10 Conclusion.....</i>	<i>21</i>

Chapitre III : Conception du dispositif spin coater

<i>III.1 Introduction.....</i>	<i>24</i>
<i>III.2 Logiciels utilisés.....</i>	<i>24</i>
<i>III.2.1 Le logiciel de CAO AutoCAD2017 d'Autodesk.....</i>	<i>24</i>
<i>III.2.2 Le Slicer Creality slicer 1.2.3.....</i>	<i>24</i>
<i>III.2.3 Logiciel de Programmation et de Contrôle Arduino IDE.....</i>	<i>24</i>
<i>III.3 Pièces réalisés par l'impression 3D</i>	<i>24</i>
<i>III.4 Étapes de l'Assemblage des Composants d'une Spin Coater.....</i>	<i>27</i>
<i>III.5 Composants électrique et électronique utilisés.....</i>	<i>28</i>
<i>III.5.1 Liste des composants.....</i>	<i>28</i>
<i>III.5.2 Définitions des principaux composants électrique utilisés.....</i>	<i>28</i>
<i>III.5.2.1 Carte de contrôle Arduino Uno r3.....</i>	<i>28</i>
<i>III.5.2.2 Module driver moteur L298N.....</i>	<i>29</i>

III.5.2.3 Moteur à courant continu 12V 10000RPM.....	29
III.5.2.4 Le LCD2004I2C.....	30
III.5.2.5 Clavier matriciel 4x4.....	30
III.5.3 Cablage des composants.....	31
III.5.4 Organigramme de la commande d'un Spin Coater.....	32
III.6 Presentation du produit final.....	33
III.6.1 Caractéristiques du Produit.....	33
III.6.1.1 Design moderne.....	33
III.6.1.2 Performance.....	33
III.6.1.3 Flexibilité.....	33
III.7 Mise en marche et test.....	34
III.7.1 Préparation au Test.....	34
III.7.1.1 Préparation du Substrat.....	34
III.7.1.2Chargement du Substrat.....	34
III.7.1.3 Préparation de la Solution.....	34
III.7.2 Exécution du Test.....	34
III.7.2.1 Allumage d'appariel.....	34
III.7.2.2 Configuration des Paramètres de Rotation.....	34
III.7.2.3 Démarrage du Cycle.....	34
III.7.2.4 Surveillance.....	34
III.7.3 Analyse Post-Test.....	34
III.7.3.1 Récupération du Substrat.....	34
III.7.3.2Inspection du Dépôt.....	35
III.8 Conclusion	35
Conclusion Générale.....	37

Liste des figures

Chapitre I

<i>Figure I.1 : les étapes du procédé de fabrication de couches minces.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure I.2: Méthodes générales de dépôt des couches minces sous vide.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure I-3: Schéma de principe de dépôt en phase vapeur chimique (CVD), réacteur à parois chaudes.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I-4: Schéma de principe de la radiation Laser.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure I-5: Schéma représentant le principe de préparation de film mince par La méthode de trempage.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure I-6: Schéma représentant le principe de préparation de film mince par La méthode de tournette.....</i>	<i>11</i>

Chapitre II

<i>Figure II.1 : Techniques de dépôt Sol gel.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure II.2: Méthode spin coating.....</i>	<i>18</i>

Chapitre III

<i>Figure III.1:Impression du boîtier.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure III.2:Vue 3D des pièces imprimables dans Crealty.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure III.3 :Vue des pieces après l'impression.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure III.4 :Vue globale des différents éléments constituants.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure III.5 :Carte de contrôle Arduino Uno r3.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure III.6 :module driver moteur L298N.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure III.7 : Moteur à courant continu 12V 10000RPM.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure III.8 :Afficheur LCD 2004 I2C.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure III.9 :Clavier matriciel 4x4.....</i>	<i>30</i>
<i>Figure III.10: Cablage des éléments électroniques.....</i>	<i>31</i>
<i>Figure III.11 :Organigramme de la commande d'un Spin Coater.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure III.12 :Vue de produit fini.....</i>	<i>33</i>

Liste des tableaux

Chapitre III

<i>Tab III.1 : Liste des composants électroniques.</i>
--

Abréviations

Chapitre I

CVD : Chemical Vapor Deposition.

LPCVD: Low-Pressure Chemical Vapor Deposition.

PECVD : Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition.

CBD : Chemical Bath Deposition.

Sol-gel : solution-gélification.

PVD : Physical Vapor Deposition.

Chapitre III

CAO : conception assistée par ordinateur.

IDE : environnement de développement intégré

STL : stéréolithographie

PLA : un filament d'acide polylactique.

I2C : Inter-Integrated Circuit.

LCD : Liquid Crystal Display

Introduction————

———— **Générale**

Introduction Générale

La croissance rapide des technologies et des matériaux avancés a engendré une demande accrue pour des dispositifs capables de déposer des couches minces avec précision. Parmi les différentes techniques de dépôt de couches minces, le spin coating s'est imposé comme une méthode simple, efficace et économique. Ce mémoire se concentre sur la conception et la réalisation d'un spin coater basé sur la plateforme Arduino, une solution innovante qui combine la flexibilité et la modularité de l'Arduino avec l'efficacité du dépôt par spin coating, dans le cadre d'un projet start-up.

L'idée de ce projet start-up est de développer un appareil accessible et abordable pour les laboratoires de recherche et pédagogiques, les établissements éducatifs et les petites entreprises spécialisées dans les nanotechnologies et les matériaux avancés. En mettant en œuvre des solutions technologiques modernes et rentables, ce projet vise à démocratiser l'accès à des équipements de haute précision, traditionnellement réservés aux grandes institutions disposant de budgets conséquents.

Ce mémoire se compose de trois chapitres :

Le premier chapitre présente les diverses techniques de dépôt de couches minces techniques, à savoir l'évaporation, la pulvérisation cathodique, et le spin coating. Cette partie explore ces différentes techniques, en mettant un accent particulier sur le spin coating en raison de sa simplicité et de sa capacité à produire des films uniformes et de haute qualité. L'intégration de cette technique dans le projet start-up permet de proposer une solution innovante et compétitive sur le marché des équipements de dépôt de couches minces.

Le second chapitre présente le procédé sol-gel, qui est une méthode chimique permettant la formation de matériaux en céramique et en verre à partir de solutions liquides. Cette technique est largement utilisée pour le dépôt de couches minces, car elle offre un contrôle précis de la composition et de la microstructure des films. Le dépôt par sol-gel, combiné au spin coating, permet d'obtenir des couches minces uniformes avec une grande reproductibilité. Ce mémoire décrit le processus de dépôt par sol-gel, depuis la préparation des solutions précurseurs jusqu'au dépôt et au post-traitement des films. L'application de cette méthode dans le cadre du projet start-up vise à garantir une qualité supérieure des films déposés, tout en réduisant les coûts et en simplifiant le processus de fabrication.

Le dernier chapitre constitue l'objectif principal de ce mémoire, qui est de concevoir et réaliser un spin coater basé sur la plateforme Arduino, dans le cadre d'un

projet start-up. Le choix de l'Arduino se justifie par sa simplicité d'utilisation, sa communauté active et la disponibilité de nombreux modules et capteurs compatibles. Ce projet aborde les aspects techniques de la conception, y compris le choix des composants électroniques, la programmation du microcontrôleur, et la construction mécanique de l'appareil. Le spin coater conçu offre une interface utilisateur intuitive, permettant un contrôle précis des paramètres de dépôt tel que la vitesse de rotation.

En outre, le développement de ce spin coater au sein d'une start-up permet d'adopter une approche agile et itérative, favorisant l'innovation rapide et l'adaptation aux besoins spécifiques des utilisateurs finaux. La start-up ambitionne de rendre ces technologies de pointe plus accessibles, tout en fournissant un support technique et une personnalisation adaptés aux exigences de chaque client.

Ce mémoire se propose de fournir une solution accessible et innovante pour le dépôt de couches minces par spin coating, dans le cadre d'un projet start-up. En combinant les techniques avancées de dépôt par sol-gel avec la flexibilité de la plateforme Arduino, ce projet ouvre la voie à de nouvelles possibilités dans la fabrication de dispositifs à couches minces. Les chapitres suivants détailleront chaque étape de la conception et de la réalisation de ce spin coater, en offrant une analyse approfondie des techniques utilisées et des résultats obtenus. La vision start-up apporte une dynamique entrepreneuriale à ce projet, visant à transformer une idée technologique en un produit commercial viable et largement adopté.

Toutes les étapes de réalisation de dispositif l'impression, l'assemblage des pièces et le câblage des composants électrique ont été effectuées au niveau de laboratoire de recherche scientifique de l'université Mohamed El Bachir El Ibrahimy Bordj Bou Arreridj.

Chapitre I

Techniques de dépôt des couches minces

I.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons décrire quelques méthodes d'élaborations de couches minces qui sont nombreuses et variées. Après une brève description de ces techniques, nous allons présenter de manière assez détaillée la dernière voie développée, à savoir la méthode « spin-coating ». Le choix d'une technique particulière de synthèse dépend de plusieurs facteurs, nous citons en outres : le matériau à déposer, la nature du substrat et l'application désirée.

I.2 Généralités sur les Couches minces

I.2.1 Définition d'une couche mince

Une couche mince est une fine pellicule d'un matériau déposée sur un autre matériau, appelé "substrat" dont l'épaisseur a été fortement réduite.

Les couches minces sont principalement utilisées :

- Dans la fabrication de composants électroniques comme les cellules photovoltaïque en raison de leurs propriétés isolantes ou conductrices.
- Pour la protection d'objets afin d'améliorer les propriétés mécaniques, et de résistance à l'usure, et à la corrosion ou en servant de barrière thermique.
- Pour modifier les propriétés optiques d'objets. En particulier, on peut citer les revêtements décoratifs en modifiant le pouvoir réflecteur de surfaces tel les verres antireflets ou miroirs [1].

I.2.2 Intérêt et caractéristiques des couches minces

L'intérêt accordé aux couches minces provient essentiellement de l'utilisation économique des matériaux en rapport avec les propriétés physiques et de la simplicité des technologies mise en œuvre pour leur réalisation (élaboration facile, peu coûteuse...). Une grande variété de matériaux est utilisée pour produire ces couches minces, on peut citer les métaux, alliages, oxydes, les polymères...

La caractéristique essentielle d'une couche mince est quelle que soit la procédure employée pour sa fabrication, une couche mince est toujours solidaire au support sur lequel elle est construite (même s'il arrive parfois que l'on sépare le film mince du support). En conséquence, il est impératif de tenir compte de ce fait majeur dans la conception, à savoir que le support influence très fortement les propriétés structurales de la couche qui y est déposée. Ainsi, une couche mince d'un même matériau, de même épaisseur, pourra avoir des propriétés physiques sensiblement différentes selon qu'elle sera déposée sur un substrat isolant tel le verre, ou un substrat monocristallin tel le silicium [1].

I.2.3 Domaines d'applications des couches minces

Les applications les plus pointues se sont diversifiées dans les domaines suivants [1] :

- Microélectronique : elle a pu se développer à partir des années 1960 grâce à la mise en œuvre de couches de plus en plus minces conductrices ou isolantes, et on peut les trouver sous : jonction PN, diode, transistor, matériau piézoélectrique, LED...
- Optique : les applications optiques des couches minces ont permis de développer des capteurs de rayonnements plus efficaces, comme les couches antireflets dans les cellules solaires, photo détection, affichage-écrans plats, applications ophtalmiques...
- Chimie : les principales applications des revêtements de surface sont orientées vers une meilleure tenue à la corrosion par la création d'un film étanche (résistance à la corrosion), capteur à gaz, couches protectrices...
- Thermique : l'utilisation d'une couche barrière thermique diminue par exemple la température de surface du métal des ailettes des réacteurs permettant ainsi d'améliorer les performances des réacteurs (augmentation de la température interne)...
- Biologie : micro capteurs biologiques, bio puces, matériaux biocompatibles ...
- Médical : les verres anti reflet, les lentilles de contact et les électrodes ainsi que les biocapteurs...
- Micro et nanotechnologies : capteurs mécaniques et chimiques, micro fluidique, actionneurs, détecteurs...
- Magnétique: stockage d'information (mémoire d'ordinateur), dispositifs de sécurité, capteurs [1].

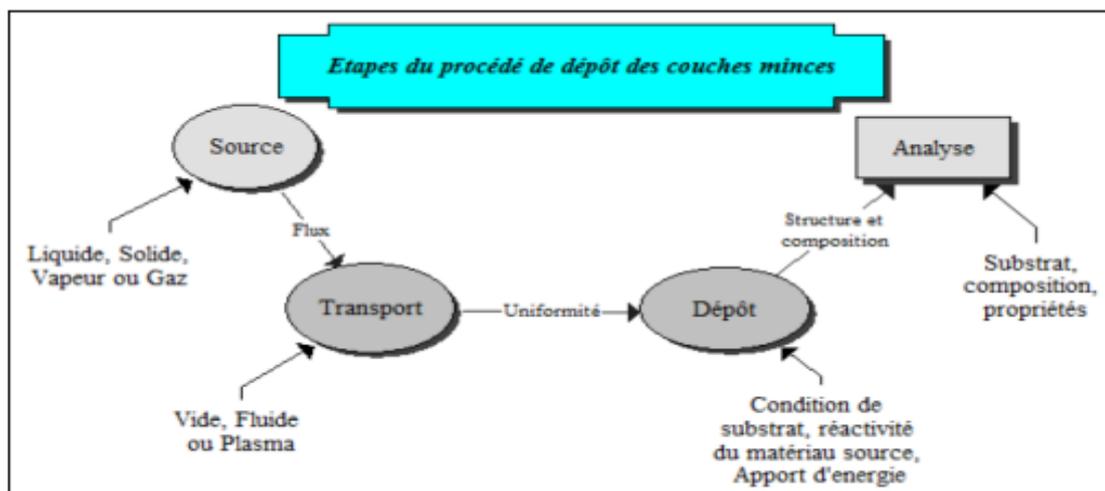


Figure I.1 : les étapes du procédé de fabrication de couches minces [1].

I. 3 Différents types de substrats

Les substrats sont en silicium, en céramique..., sur lesquels on dépose successivement les couches conductrices, résistives ou diélectriques. Différentes techniques sont employées pour réaliser ces dépôts, elles sont détaillées par la suite.

Les substrats doivent posséder :

- un coefficient de dilatation choisi en fonction de l'utilisation du circuit.
- un état de surface parfait.
- une résistivité très élevée.

Le choix est fait en fonction de leur destination :

- l'or, le cuivre : pour les connexions.
- l'oxyde d'étain : pour les résistances.
- le verre, la silice : pour les diélectriques.
- le silicium : pour les couches semi-conductrices[2].

I.4 Techniques de déposition des couches minces

Les principales méthodologies de fabrication utilisées par les fabricants de composants électroniques actifs ou passifs font appel à des procédures physiques de dépôt du matériau sur un substrat initialement dépourvu de dépôt. En pratique on peut distinguer deux grandes familles de méthodes, celles qui font appel à un gaz porteur pour déplacer le matériau à déposer d'un récipient au substrat et qui s'apparentent aux techniques de diffusion utilisées dans la fabrication des composants actifs, et celles qui impliquent un environnement à pression très réduite et dans lesquelles le matériau à déposer sera véhiculé grâce à une impulsion initiale de nature thermique ou mécanique[2].

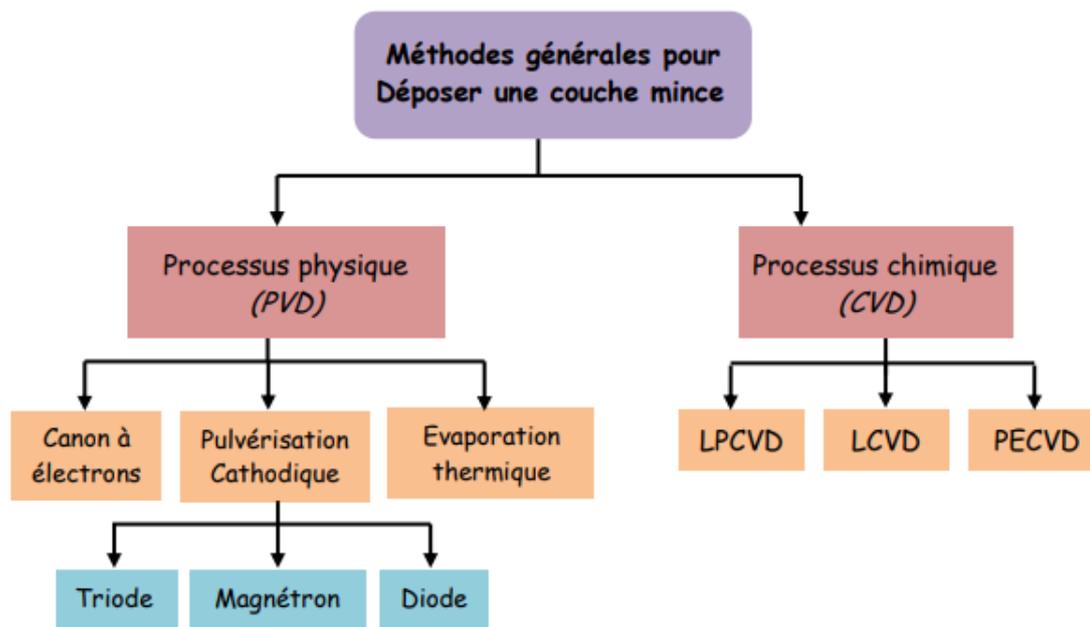


Figure I.2: Méthodes générales de dépôt des couches minces sous vide [2].

I.4.1 Processus chimique (sous vide)

I.4.1.1 Dépôt chimique (CVD)

Le dépôt en phase vapeur chimique (CVD) « Chemical Vapor Deposition » est une méthode dans laquelle le ou les constituants d'une phase gazeuse réagissent pour former un film solide déposé sur un substrat. Les composés volatils du matériau à déposer sont éventuellement dilués dans un gaz porteur et introduits dans une enceinte où sont placés les substrats.

Le film est obtenu par réaction chimique entre la phase vapeur et le substrat chauffé. Dans certains cas, une élévation de température est nécessaire pour maintenir la réaction chimique. Le CVD est un domaine interdisciplinaire, il comprend un ensemble de réactions chimiques, un processus thermodynamique et cinétique, un phénomène de transport.

La réaction chimique est au centre de ces disciplines: elle détermine la nature, le type et les espèces présentes

Tout système de CVD, quel que soit sa sophistication, comporte toujours trois parties :

- Un système d'alimentation en vapeur(s) de précurseur(s).
- Le réacteur CVD (four ou tout autre système de chauffage de substrat).
- Un système de traitement des effluents gazeux.

Il existe deux types de réacteurs: le réacteur à paroi chaude et le réacteur à paroi froide. Dans le cas du réacteur à paroi chaude, ce dernier est chauffé directement, ce qui permet d'opérer à plus faible pression, à peu près $7.5 \cdot 10^{-2}$ torr, pour les quels des dépôts se

produisent bien sur les substrats, mais aussi sur les parois (technique LPCVD: Low-Pressure Chemical Vapor Deposition).

Dans le cas du réacteur à paroi froide, seul le substrat est chauffé, si bien que la réaction n'est effective qu'au niveau du substrat chauffé; elle se produit à pression atmosphérique [2].

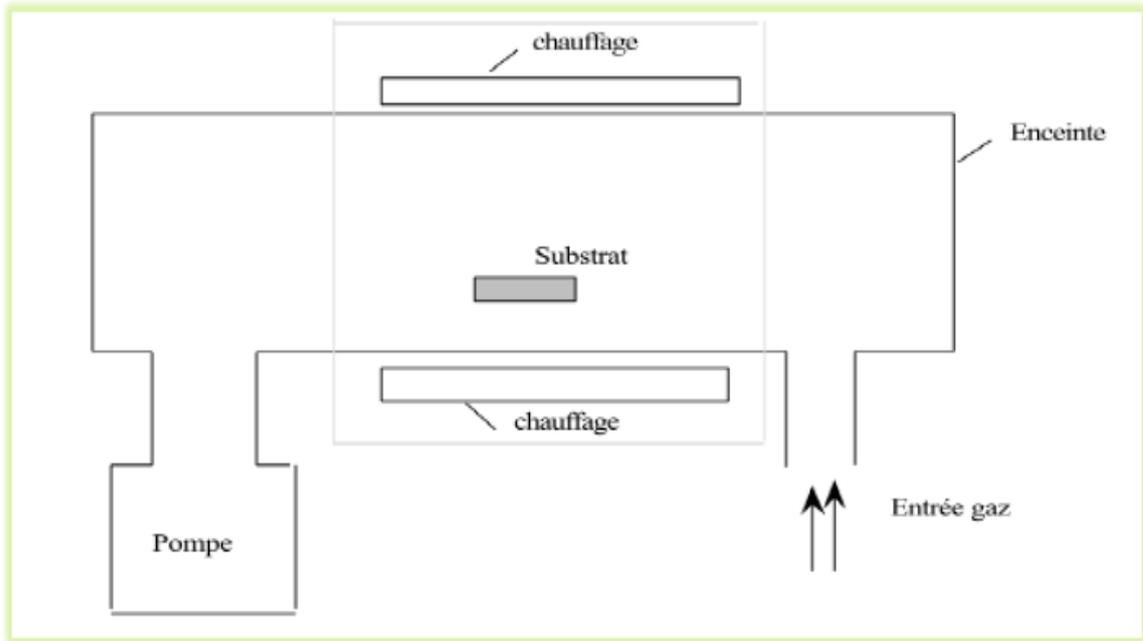


Figure I-3: Schéma de principe de dépôt en phase vapeur chimique (CVD), réacteur à parois chaudes [2].

a. Dépôt assisté plasma (PECVD)

La réaction chimique peut être activée à l'aide d'un plasma. Cette méthode s'appelle "CVD plasma" ou PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition).

Ce dépôt est donc fondé sur la création d'espèces ou d'éléments à déposer à basse température grâce à l'apport d'énergie sous forme électromagnétique (source radiofréquence en général). Cette technique évite donc des passages à haute température qui peut entraîner une redistribution des dopants par exemple. Toutefois, afin d'améliorer la qualité du matériau des couches déposées, il est nécessaire de chauffer "légèrement" les substrats (quelques centaines de degrés éventuellement). Industriellement, deux types de four sont proposés:

- Four à platine porte-substrat horizontale,
- Four à "mur chaud".

b. Dépôt CVD à radiation laser (LCVD)

L'énergie de la radiation laser est utilisée soit pour activer (ou casser) les espèces gazeuses (photolyse), soit pour chauffer le substrat afin de promouvoir la réaction de surface. Il est possible de restreindre la surface chauffée à des lignes submicroniques sur lesquelles seulement le dépôt aura lieu (circuits pour microélectronique) (figure I-4).

- La photolyse permet un chauffage minimal du substrat.
- De plus l'irradiation laser du substrat ne chauffe que la surface du substrat évitant d'éventuels dommages de la masse.[2].

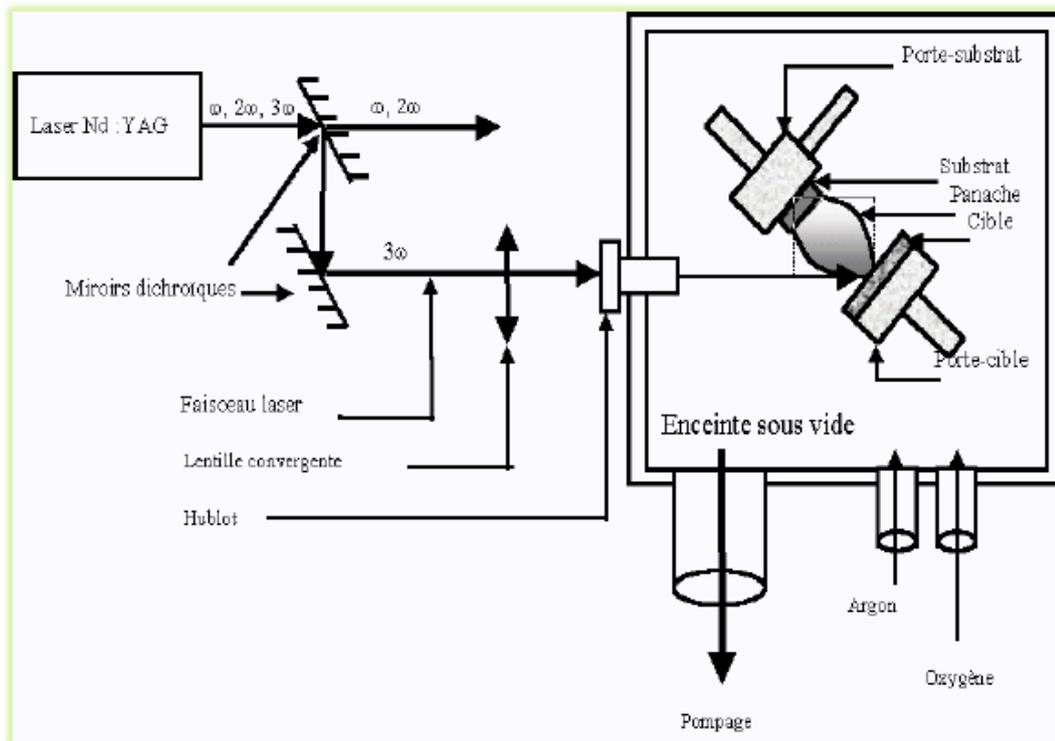


Figure I-4: Schéma de principe de la radiation Laser [2].

c. Dépôt à basse pression (LPCVD)

Une autre technique de dépôt comme évoquée ci-dessus est la technique LPCVD. Cette technique consiste à réaliser un dépôt chimique en phase vapeur à basse pression. Ce dépôt s'effectue normalement dans un four à mur chaud à des températures de l'ordre de 500 à 600°C. On injecte les gaz qui réagissent et qui synthétisent le matériau à déposer.

Pour ce type de dépôts les paramètres les plus importants sont la pression, la température et la type de gaz dopant utilisé. De ces paramètres, dépendent la morphologie du matériau qui conditionne aussi les propriétés électriques [2].

I.4.2 Processus chimique (sans vide)

I.4.2.1 Dépôt par spray pyrolyse

Le spray pyrolyse est une technique de dépôt utilisée pour préparer les films minces et épais. A la différence de beaucoup d'autres techniques de dépôt de film, le spray pyrolyse représente une méthode très simple, n'exige pas de produits chimiques de haute qualité.

Cette méthode a été utilisée pour le dépôt des films denses et poreux. Même des films multicouches peuvent être facilement préparés en utilisant cette technique. L'équipement typique du spray pyrolyse se compose d'un atomiseur, une solution de précurseur, réchauffeur de substrat et un régulateur de température.

Les atomiseurs ultrasoniques sont utilisés dans la technique de spray pyrolyse. Dans un atomiseur ultrasonique les fréquences ultrasoniques produisent les ondes courtes nécessaires pour l'atomisation fine [2].

I.4.2.2 Dépôt par bain chimique

Le dépôt par bain chimique (Chemical Bath Deposition ; CBD) se rapporte au dépôt des films sur un substrat solide par une réaction produite dans une solution aqueuse.

Le dépôt par bain chimique peut se produire de deux façons selon le mécanisme de dépôt : par nucléation homogène en solution ou par hétéronucléation sur un substrat.

Dans la nucléation hétérogène, les particules, ou même les ions individuels, peuvent adsorber sur le substrat. L'énergie exigée pour former une interface entre les particules et le substrat solide est souvent inférieure à celle exigée pour la nucléation homogène. La nucléation hétérogène est donc énergétiquement préférée à la nucléation homogène[2].

I.4.2.3 Méthode de sol gel

Le principe de base du procédé sol-gel (correspondant à l'abréviation de « solution-gélification » est le suivant: Une solution à base de précurseurs en phase liquide, se transforme en un solide par un ensemble de réactions chimiques de type polymérisation à température ambiante. Le processus sol-gel comprend trois étapes :

- Préparation de la solution de déposition.
- Formation des couches minces par la méthode de trempage ou bien par la méthode de tournette.
- Traitement thermique.

a) La méthode de trempage ou "Dip coating"

Le principe est de plonger le substrat dans une solution contenant le précurseur. Après chaque trempage, le substrat est séché et recuit sous air ou sous atmosphère d'oxygène, ces deux opérations (trempage et recuit) sont répétées plusieurs fois afin d'obtenir des couches épaisses.

Finalement, les échantillons sont recuits sous Argon à 550 °C ou sous hydrogène afin d'étudier l'effet de ce recuit sur les propriétés de photocatalyse [3].

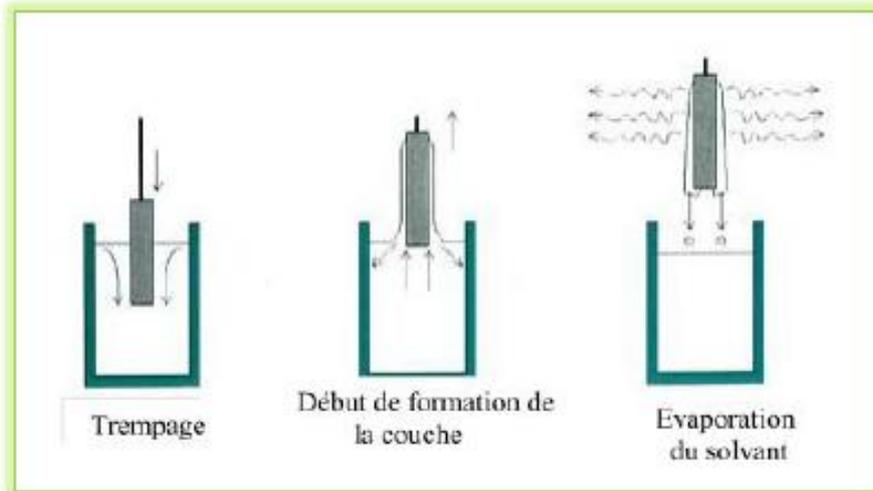


Figure I-5: Schéma représentant le principe de préparation de film mince par La méthode de trempage [4].

b) La méthode de tournette ou "Spin coating"

La méthode est basée sur le même principe que la précédente, sauf que la solution contenant le précurseur tombe goutte à gouttes sur un substrat en rotation sur un support [5].



Figure I-6: Schéma représentant le principe de préparation de film mince par La méthode de tournette [4].

I.4.3 Processus physique (PVD)

Le dépôt en phase vapeur physique (PVD) « Physical Vapor Deposition », présente beaucoup d'avantages par rapport au dépôt en phase vapeur chimique, par exemple les films sont denses, le processus est facile à contrôler et il n'y a pas de pollution.

I.4.3.1 Évaporation thermique

La technique d'évaporation thermique est très simple et consiste simplement à chauffer par effet Joule un matériau qui, vaporisé, va se déposer sur les substrats. La charge du matériau à déposer est placée dans un creuset (en tungstène).

Cette technique est applicable notamment pour le dépôt d'aluminium, la température d'évaporation de ce métal étant inférieure à la température de fusion du creuset (en tungstène). La figure I-6 montre le principe de cette technique ; le bâti est similaire à celui de la technique de dépôt par canon à électrons.

Afin d'améliorer l'homogénéité des couches déposées (très faibles variations d'épaisseur), on déplace en permanence les substrats. Dans le cas du bâti ci-dessous, le porte substrat est tournant.

Afin de contrôler l'épaisseur des couches déposées, on utilise une balance à quartz. Le principe de celle-ci consiste à détecter la dérive de la fréquence d'oscillation du quartz par la modification de sa masse lors de la croissance de la couche déposée (le dépôt s'effectue aussi sur le quartz). C'est donc une mesure électrique qu'il faut bien évidemment étalonner. A chaque début d'expérience, la fréquence de référence est redéfinie. En mesurant le décalage de fréquence en fonction du temps, on peut aussi déterminer la vitesse de croissance des couches déposées [2].

I.4.3.2 Pulvérisation cathodique

La pulvérisation cathodique consiste à bombarder une cible par des ions, à arracher les ions de la cible et à les envoyer se déposer sur le substrat, montrant de façon simplifiée le principe de cette technique, les ions argon, créés par l'excitation haute tension, arrachent de la cible les composés à déposer sur la surface des substrats.

Les systèmes de pulvérisation cathodique bénéficient d'une très grande popularité en milieu industriel. Ils sont moins performants que le procédé CVD au niveau du nombre de couches traitées simultanément et de la vitesse de dépôt, mais incontestablement, ils sont plus simples à mettre en œuvre et ils permettent le dépôt de n'importe quel matériau solide à température ordinaire, surtout des matériaux difficiles à évaporer[2].

Bien entendu, on ne peut pas pulvériser les solides organiques peu stables à cause de l'augmentation de la température. Les polymères, qui possèdent de très longues chaînes moléculaires, ne peuvent pas être pulvérisés non plus.

Les matériaux très volatils posent souvent des problèmes de déficience conduisant à des films non stœchiométriques à cause du système de pompage. Ces mêmes effets sont observés dans le cas de la méthode d'évaporation [2].

I.5 Conclusion

En conclusion, les techniques de dépôt de couches minces jouent un rôle crucial dans l'avancement de la technologie moderne. Elles permettent l'ingénierie précise des surfaces à des échelles nanométriques, ouvrant ainsi des possibilités innovantes dans divers secteurs industriels. La maîtrise des procédés comme le CVD, le PVD, la pulvérisation cathodique et le spin coating offre des solutions sur mesure adaptées aux exigences spécifiques des applications. Chaque méthode présente des avantages uniques, permettant de répondre aux défis de plus en plus complexes. L'évolution continue de ces techniques promet d'élargir encore davantage les horizons de la recherche et du développement technologique.

Chapitre II

Dépot des couches minces par sol gel

II.1 Introduction

La technique de dépôt de couches minces sol-gel est une méthode de fabrication de films minces largement utilisée en science des matériaux et en ingénierie. Elle repose sur la transformation d'une solution colloïdale (le sol) en un réseau solide (le gel), qui est ensuite séché et chauffé pour former une couche mince. Le présent chapitre va définir ce procédé et ses types en se concentrant sur la technique spin coating.

II.2 Procédé sol gel

La technique sol-gel est un procédé d'élaboration de matériaux permettant la synthèse de verres, de céramiques et de composés hybrides organo-minéraux, à partir de précurseurs en solution.

Il permet de réaliser des couches minces constituées d'empilements de nanoparticules d'oxydes métalliques. Ce procédé s'effectue dans des conditions dites de chimie douce, à des températures nettement plus basses que celles des voies classiques de synthèse.

Ces conditions offrent également la possibilité d'associer des espèces organiques et minérales pour former de nouvelles familles de composés hybrides organo-minéraux, possédant des propriétés inédites.

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.

Le gel est constitué d'un réseau d'oxyde gonflé par le solvant, avec des liaisons chimiques assurant la cohésion mécanique du matériau en lui donnant un caractère rigide, non déformable (un gel peut présenter un caractère élastique, mais pas de viscosité macroscopique).

Le gel correspond à la formation d'un réseau tridimensionnel de liaisons de Van der Waals[6,7].

II.3 Technique de dépôt

Les deux procédés les plus connus pour la réalisation de couches minces avec contrôle de l'épaisseur déposée sont le trempage-retrait (dip-coating) et l'enduction centrifuge (spin-coating). Tous deux sont utilisés à température ambiante et pression ordinaire.

Les épaisseurs des films sont contrôlées par variation de la vitesse de dépôt. Le trempage consiste à plonger la pièce à revêtir directement dans un bain d'alcoxyde. Les réactions d'hydrolyse-condensation se produisent ensuite spontanément à l'air. Cette technique permet de réaliser, en une seule opération, des dépôts sur les deux faces d'un vitrage de plusieurs m².

L'épaisseur des films peut varier de 100 nm à quelques micromètres. Dans le cas des dépôts à la tournette (spin-coating), les processus sont similaires à ceux intervenant pour le trempage et l'état xérogel est atteint en quelques minutes. Le sol n'étant souvent pas très visqueux, il est possible d'obtenir des dépôts fins et uniformes, qui peuvent être ensuite transformés en verres par traitement thermique[6,7].

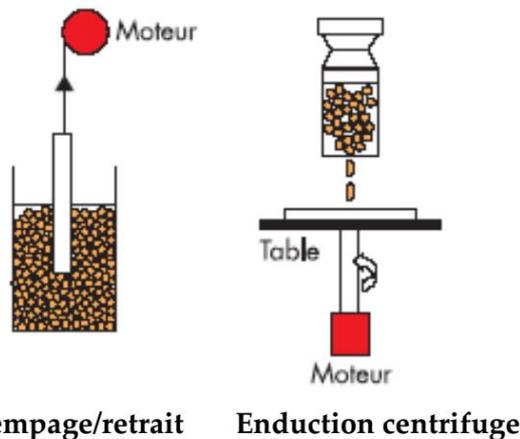
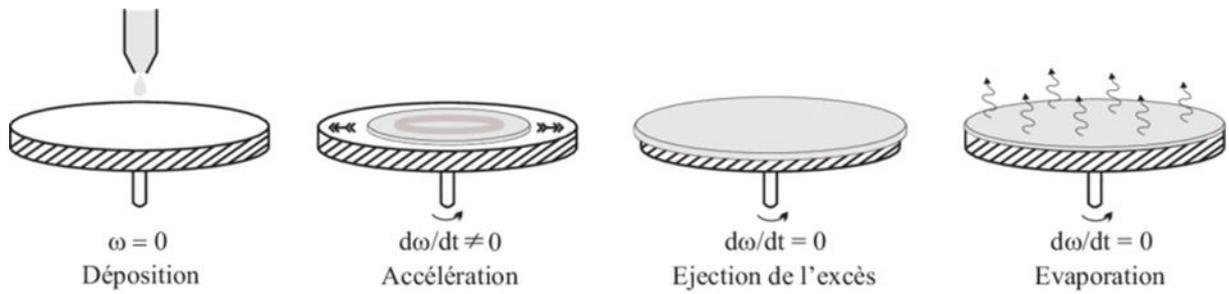


Figure II.1 : Techniques de dépôt Sol gel

II.4 Principe du Centrifugation [Spin-coating]

Le Spin Coating est une technique couramment utilisée pour déposer une couche mince et uniforme d'une solution sur une surface plane. Elle est largement employée dans la fabrication de semi-conducteurs, de cellules solaires, de composants optiques et électroniques, et dans de nombreux autres domaines [6,7].



ω : vitesse de rotation

Figure II.2: Méthode spin coating

II.4.1 principe fondamental du spin coating

6. Dépôt de la solution:

Une petite quantité de la solution à déposer (généralement mélangée à un solvant) est placée au centre du substrat[6,7].

7. Rotation du substrat:

Le substrat est placé sur un dispositif de rotation (spin coater) et mis en rotation à grande vitesse (généralement entre 500 et 5 000 tours par minute) [6,7].

8. Effet de la force centrifuge:

En raison de la rotation rapide du substrat, toutes les parties du substrat subissent une force centrifuge qui pousse le liquide vers l'extérieur.

Cette force centrifuge provoque l'étalement de la solution sur la surface du substrat en une couche mince et uniforme vers ses bords[6,7].

9. Formation du film:

Pendant que le substrat continue de tourner, le solvant présent dans la solution s'évapore dans l'environnement ambiant.

Au fur et à mesure que le solvant s'évapore, la concentration de la matière dissoute restante sur la surface du substrat augmente, formant ainsi une couche mince de la matière[6,7].

10. Épaisseur du film:

L'épaisseur finale de la couche de film dépend de plusieurs facteurs, tels que :

- La vitesse de rotation du substrat : plus la vitesse de rotation est élevée, plus la couche est fine en raison de l'augmentation de l'effet de la force centrifuge qui repousse la solution vers l'extérieur[6,7].

- La viscosité de la solution : plus la solution est visqueuse, plus la couche est épaisse car la solution plus visqueuse résiste davantage à l'effet de la force centrifuge.
- La concentration de la solution : La concentration de la matière dissoute dans la solution affecte indirectement l'épaisseur de la couche, car plus la concentration est élevée, plus la quantité de matière restante après l'évaporation du solvant est importante [6,7].

Après la fin du processus de revêtement, la couche mince peut nécessiter des étapes de traitement supplémentaires telles qu'un séchage final à l'aide d'un four ou un traitement thermique, en fonction de la matière et de l'application souhaitée.

II.4.2 Applications de la centrifugation

Les techniques de centrifugation sont aujourd'hui parmi les plus courantes dans l'industrie du revêtement, car ces revêtements sont polyvalent et peuvent être utilisés dans de nombreux types d'applications différents.

Le revêtement par rotation peut être utilisé sur des surfaces aussi petites que quelques millimètres ou aussi grandes que quelques mètres, selon l'équipement disponible. Certaines applications spécifiques pour lesquelles cette technique est utilisée incluent les métaux synthétiques, les nanomatériaux, les isolants et les semi-conducteurs [8].

II.5 Critères pour un spin-coating optimal

Le rôle de cette méthode est d'obtenir des films homogènes déposés sur différents types de substrats plats : verre, silicium...

Pour réussir le dépôt, il faut que :

- Le substrat soit fixé sur un plateau ayant la possibilité de tourner sur un axe.
- Le dépôt de la solution soit rapide afin d'éviter les bulles d'air.
- La solution doit couvrir toute la surface du substrat.
- Le matériau soit 100% dilué sinon l'utilisation d'un filtre est indispensable.

Cette technique de dépôt présente des avantages et quelques inconvénients :

II.6 Avantages et inconvénients de la technique

II.6.1 Avantages

- Faible coût du matériel utilisé.
- Possibilité de dépôt sur grande surface et de forme complexe.
- Facile à mettre en œuvre.
- La solution initiale réalisée est Pure et homogène.
- Température peu élevée.
- Les films obtenus sont homogènes.
- Contrôle de l'épaisseur du film mince.

II.6.2 Inconvénients

- Le matériau doit être en solution.
- Structures à plusieurs couches difficiles à réaliser.
- Stockage (dégradation et altération) .

I.7 Etapes pour l'élaboration des couches minces par Spin-coating

Cette technique est réalisée généralement en quatre étapes principales

- 1^{ère} étape : dépôt de la solution sur le substrat.

Cette étape consiste à déposer la solution au centre du substrat, ce dernier peut être immobile ou entraîné dans une rotation adéquate dans le but d'étaler le produit sur la surface du substrat. Habituellement, la quantité déposée sur le substrat est de quelques gouttes, l'utilisation d'un micro-filtre s'avère parfois nécessaire afin d'éliminer les particules qui sont précipitées dans la solution, et qui pourraient entraîner des défauts dans la couche déposée. Il est important dans cette étape de s'assurer que la quantité de sol déposée est suffisante pour recouvrir toute la surface du substrat, et par la suite éviter la présence des zones non recouvertes en matière[9,10].

- 2^{ème} étape : rotation accélérée du substrat (Spin –up).

La seconde étape consiste à accélérer le substrat dans son mouvement de rotation (début de la rotation) jusqu'à sa vitesse de rotation finale désirée (typiquement entre 300 et 4000 tr/min). Cette étape est caractérisée par l'expulsion de la solution de la surface vers l'extérieur par le mouvement de rotation. Au début, la solution s'étale lentement puis la force centrifuge générée par la rotation du substrat conduit le liquide à s'étaler radialement vers l'extérieur et à recouvrir la totalité du substrat. Lorsque le substrat atteint sa vitesse finale désirée, la couche devient très mince et les forces de viscosité équilibrent parfaitement les forces centrifuges[9,10].

- 3^{ème} étape : rotation à vitesse constante (Spin- Off)

Dans la troisième étape, le substrat tourne à une vitesse constante (phase uniforme) et les forces visqueuses de la solution dominent le comportement d'amincissement de la couche liquide qui se fait graduellement (l'éjection de l'excès de liquide sous forme de gouttelettes). Le film liquide s'homogénéise en épaisseur et l'excès de liquide est évacué du substrat par la force centrifuge. En effet, les forces centrifuges agissent sur l'écoulement de la solution en amincissant celle-ci jusqu'au point où suffisamment de solvant est évaporé et la viscosité augmente à un niveau où l'écoulement cesse. L'étape « spin- off » prend place après environ quelques secondes de l'étape « spin-up » [9,10].

- 4^{ème} étape: Evaporation.

Dans cette dernière étape, le substrat tourne à vitesse décroissante (phase décélérée), et l'évaporation des solvants domine le comportement d'amincissement de la couche. L'évaporation du solvant active les réactions d'hydrolyse et de condensation menant à la formation d'un film gélifié. A ce stade, la solution est gelée sur place et l'effet de la viscosité sur l'écoulement de la solution devient négligeable. Il est clair que les étapes 3 et 4 décrivent deux processus qui doivent se produire simultanément (écoulement visqueux et évaporation). L'évaporation peut déjà prendre place en partie lors de ces deux derniers étapes [9,10].

II.8 Traitement thermique des couches déposées

Après dépôt, un traitement thermique est effectué. Il a deux fonctions essentielles :

- un premier séchage à température très basse : permet d'éliminer le solvant.
- une deuxième phase de recuit à plus haute température : permet de renforcer le réseau d'oxyde [10].

II.9 Contrôle de l'épaisseur de la couche mince

L'épaisseur de la couche déposée dépend de plusieurs facteurs, facteurs liés au spinner (L'augmentation de la vitesse angulaire, l'accélération et le temps de l'opération diminuent l'épaisseur de la couche) et facteurs liés au composé déposé (la quantité de solution déposée en général une ou quelques gouttes, la concentration des espèces dans le/les solvant(s), la masse molaire, la viscosité et la volatilité des solvants).

II.10 Conclusion

En conclusion, la technique de dépôt de couches minces sol-gel, combinée à la méthode de spin coating, se distingue par sa capacité à offrir un contrôle précis sur la composition chimique et la structure des films déposés. Le spin coating, en particulier, permet de déposer des couches uniformes et homogènes en utilisant la force centrifuge pour répartir la solution de sol-gel sur une surface.

Cette méthode flexible permet de produire une variété de matériaux, tels que des oxydes métalliques, des verres et des céramiques, et trouve des applications dans de nombreux domaines, y compris l'électronique, l'optique et la protection contre la corrosion. Grâce à la possibilité de déposer des couches uniformes sur des surfaces complexes, le procédé sol-gel, associé au spin coating, continue de jouer un rôle crucial dans l'avancement des technologies de matériaux.

Chapitre III

Conception et réalisation du dispositif spin coater

III.1 Introduction

Dans ce chapitre on va présenter la conception, la programmation et les étapes suivies qui nous ont permis de réaliser notre dispositif.

La conception mécanique et structurelle et la programmation d'un spin coater nécessitent l'utilisation de divers logiciels.

La conception assistée par ordinateur (CAO) permet de créer des modèles 3D détaillés des composants.

La programmation des microcontrôleurs et des systèmes embarqués qui contrôlent le spin coater nécessite des environnements de développement intégrés (IDE) et des langages de programmation spécifiques.

III.2 Logiciels utilisés

III.2.1 Le logiciel de CAO AutoCAD2017 d'Autodesk

Logiciel a été utilisé pour modéliser les pièces imprimées en 3D il crée des dessins techniques précis et détaillés.

III.2.2 Le Slicer Creality slicer 1.2.3

Le Slicer a été utilisé pour générer les fichiers GCode à partir des fichiers 3D Manufacturing Format (fichiers STL).

III.2.3 Logiciel de Programmation et de Contrôle Arduino IDE

Logiciel a été utilisé pour programmer les microcontrôleurs Arduino, souvent utilisés dans les prototypes de spin coater pour leur simplicité et leur large communauté de support.

III.3 Pièces réalisées par l'impression 3D :

Toutes les parties ont été imprimées avec une Creality Ender 3 Pro avec une buse de 0,2 mm en utilisant un filament d'acide polylactique (PLA) de 1,75 mm aux températures recommandées par le fabricant.



Figure III.1: Impression du boîtier

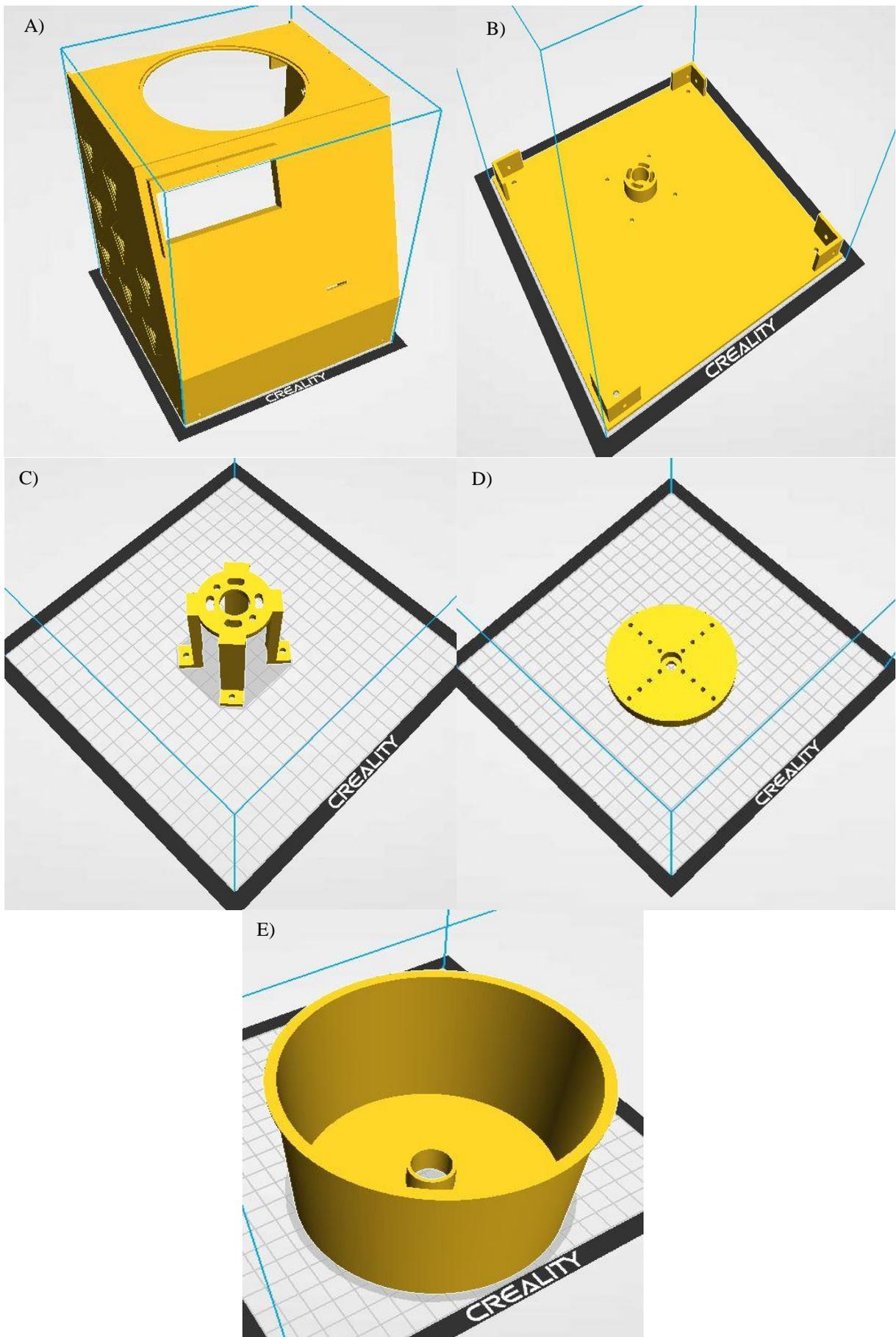


Figure III.2: Vue 3D des pièces imprimables dans Crealty

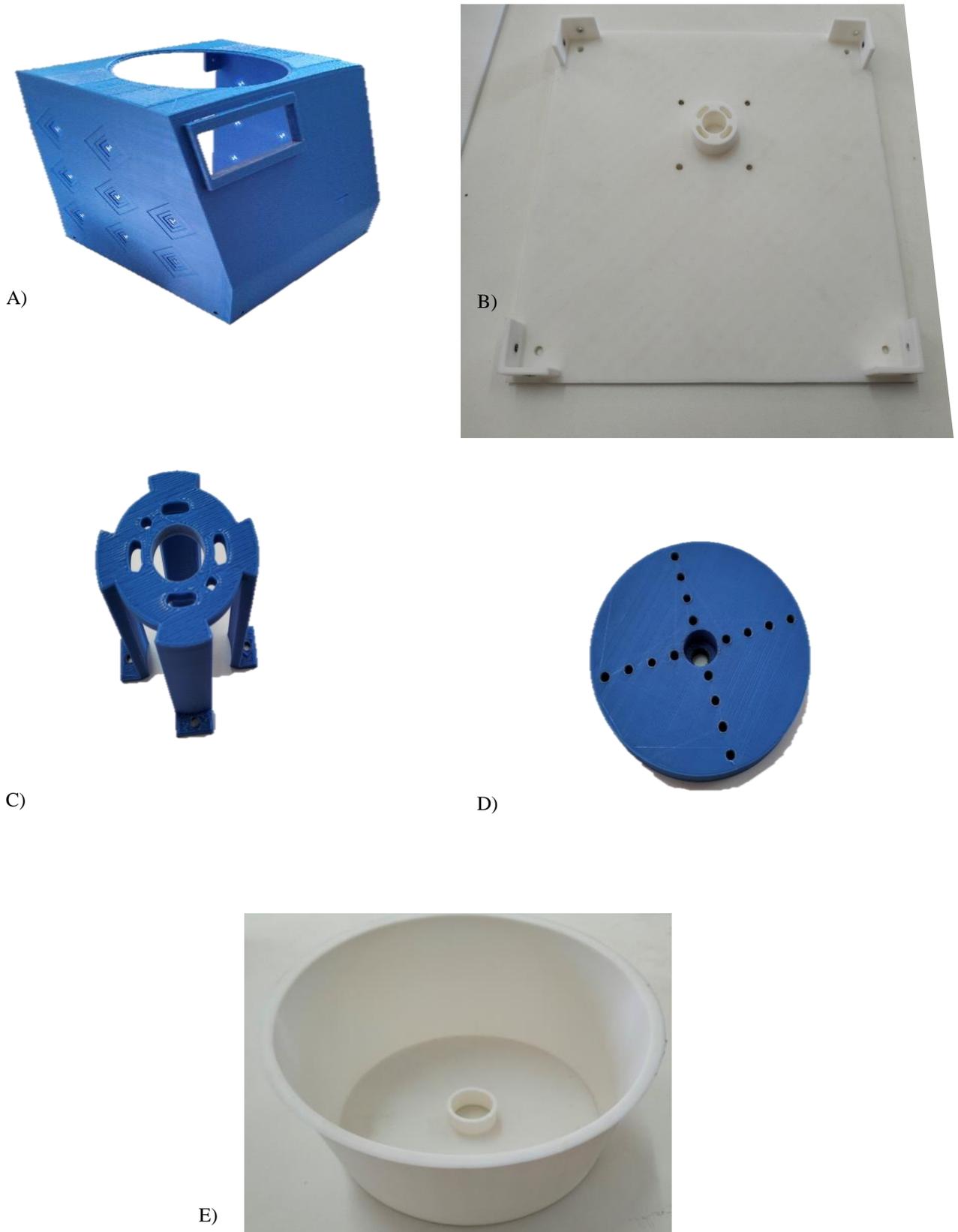


Figure III.3 : Vue des pieces après l'impression

A) Carcasse (le boîtier) : Pour loger les composants électroniques et fournir une base stable. Cette partie contient l'afficheur LCD, le clavier matriciel et le bain.

B) La base : Cette pièce maintient le moteur, l'électronique et le boîtier ensemble.

C) Support moteur : cette pièce est utilisée pour installer le moteur sur la base.

D) Disque porteur de substrat : Cette pièce est utilisée pour fixer le substrat de manière stable durant la rotation.

E) Bain : C'est le récipient pour les liquides déversés. Parfois, il est pratique de recouvrir l'intérieur de papier hygiénique pour faciliter son nettoyage.

III.4 Étapes de l'Assemblage des Composants d'une Spin Coater

Afin de connecter les câbles électriques du moteur au driver, on installe le moteur de rotation dans la base et assure sa fixation avec le support pour éviter les mouvements pendant le fonctionnement,

On assemble ensuite le bain, l'afficheur LCD et le clavier avec le boîtier, ensuite on fait visser le boîtier avec la base puis on fait monter le plateau de rotation sur l'axe du moteur avec un arbre d'accouplement rigide.

Enfin, on assemble le cache arrière et le couvercle en plexiglass avec une paumelle pour assurer l'ouverture et la fermeture et la sécurité des utilisateurs.



Figure III.4 : Vue globale des différents éléments constitutants

III.5 Composants électrique et électronique utilisés

III.5.1 Liste des composants

Voici une liste des principaux composants électriques pour concevoir et construire un spin coater fonctionnel.

En fonction des spécifications et des besoins, certains composants peuvent varier ou être ajoutés pour améliorer les performances et les fonctionnalités de la machine :

Tab III.1 : Liste des composants électroniques

Composant	Référence
Carte de contrôle	Arduino Uno r3
Moteur à courant continu	12V 10000RPM
Afficheur LCD	LCD 2004 I2C
Clavier matricielle 4x4	Clavier matriciel 4x4
Module driver moteur	L298N
Alimentation à découpage	Alimentation à découpage 24 VCC 5A
Module abaisseur de tension	Module abaisseur de tension LM2596
Fils de connexion	Fils de connexion adapté Arduino pack40 fils
Cable d'alimentation	Cable d'alimentation 220V

III.5.2 Définitions des principaux composants électrique utilisés

Voici les définitions des principaux composants utilisés dans une spin coater :

III.5.2.1 Carte de contrôle Arduino Uno r3

Arduino Uno r3, Cette dernière Utilisée pour gérer les commandes des différents périphériques, telle la commande du driver moteur, l'afficheur LCD et le clavier.



Figure III.5 : Carte de contrôle Arduino Uno r3

III.5.2.2 Module driver moteur L298N

Le module L298N est un circuit intégré qui permet de contrôler la vitesse et la direction rotation du moteur à courant continu.

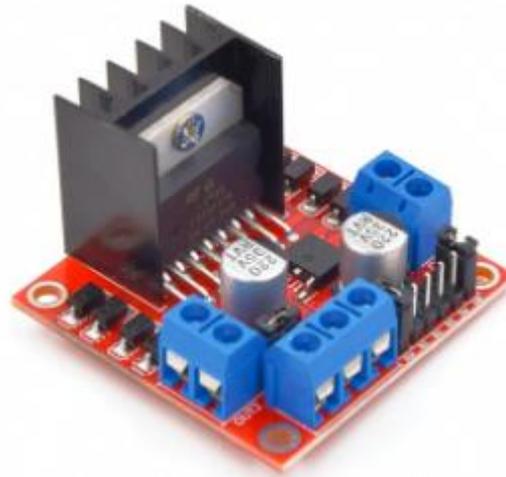


Figure III.6 : module driver moteur L298N

III.5.2.3 Moteur à courant continu 12V 10000RPM

Le moteur utilisé pour le dispositif à réaliser est un moteur à courant continu en raison de leur contrôle précis de la vitesse, leur simplicité d'utilisation, leur réactivité, et leur coût abordable. Ces caractéristiques en font une solution idéale pour obtenir des résultats uniformes dans le processus de dépôt par rotation.



Figure III.7 : Moteur à courant continu 12V 10000RPM

III.5.2.4 Le LCD2004I2C

Le LCD2004I2C est un module d'affichage LCD de 20 colonnes et 4 lignes, équipé d'une interface I2C (Inter-Integrated Circuit) pour une connexion facile avec l'Arduino. Utiliser un affichage LCD avec une interface I2C réduit le nombre de broches nécessaires pour le contrôle, ce qui simplifie le câblage et laisse plus de broches libres pour composants. Écran LCD couramment utilisés pour afficher les informations de fonctionnement (vitesse, durée).



Figure III.8 :Afficheur LCD 2004 I2C

III.5.2.5 Clavier matriciel 4x4

Le clavier matriciel 4x4 est un périphérique d'entrée composé de 16 boutons disposés en une grille de 4 ligne et 4 colonnes. Chaque bouton représente une intersection unique entre une ligne et une colonne, ce qui permet de réduire le nombre de connexions nécessaires pour lire plusieurs boutons. les claviers matriciels sont couramment utilisés dans les dispositifs pour ajouter une interface de saisie des données.

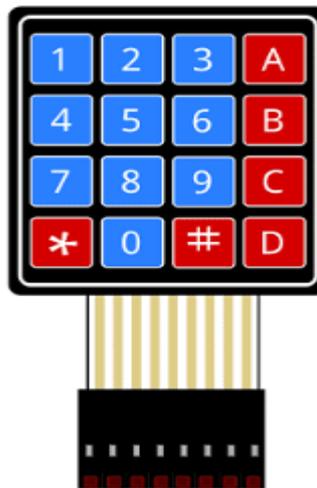


Figure III.9 :Clavier matriciel 4x4

III.5.4 Organigramme de la commande d'un Spin Coater

La commande d'une spin coater implique plusieurs étapes, qui peuvent être représentés sous forme d'un organigramme. Cet organigramme montre comment les différentes parties interagissent pour contrôler et réaliser le processus de dépôt de films minces.

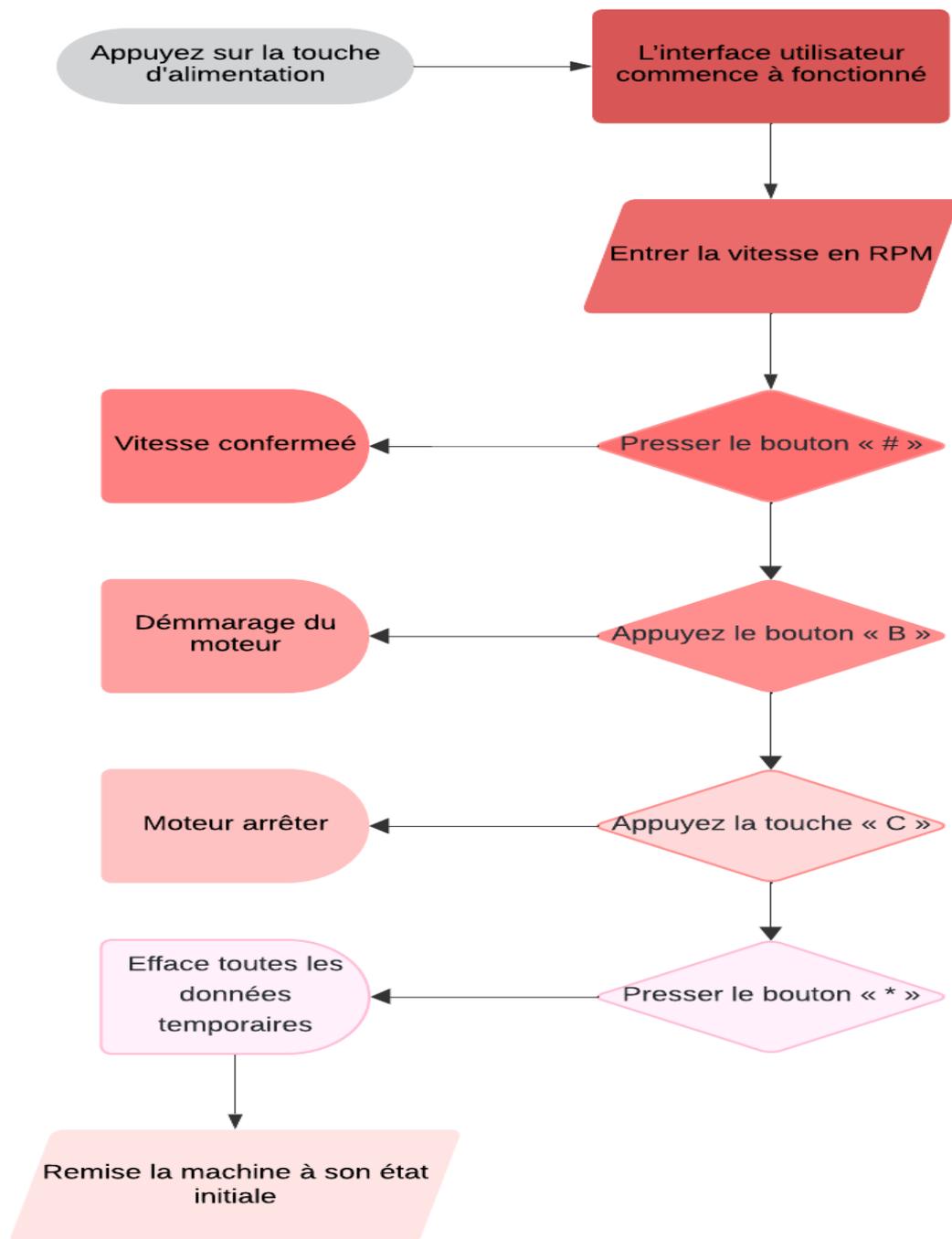


Figure III.11 : Organigramme de la commande d'un Spin Coater

III.6 Présentation du produit final

SONALAB spin coater que nous proposons représente un outil essentiel pour les laboratoires de recherche et les industries de haute technologie. Sa conception moderne, ses performances élevées et sa flexibilité en font un choix de premier ordre pour ceux qui recherchent des solutions de dépôt de couches minces efficaces et précises.

Notre spin coater offre une meilleure uniformité de dépôt grâce à son contrôle précis de la vitesse et Compatibilité avec une plus large gamme de matériaux et de substrats, augmentant ainsi les possibilités d'application.

III.6.1 Caractéristiques du Produit

III.6.1.1 Design moderne

- Interface utilisateur intuitive avec écran LCD et clavier matriciel 4x4
- Facile à nettoyer et à entretenir.

III.6.1.2 Performance

- Vitesse de rotation réglable de 0 à 10000 tr/min.

III.6.1.3 Flexibilité

- Compatible avec une large gamme de substrats (silicium, verre, polymères).
- Adaptateurs disponibles pour différentes tailles de substrats.



Figure III.12 : Vue de produit fini.

III.7 Mise en marche et test

III.7.1 Préparation au Test

III.7.1.1 Préparation du Substrat

- Nettoyez soigneusement le substrat pour éliminer toute contamination.
- Séchez le substrat avec de l'azote ou un autre gaz inerte.

III.7.1.2 Chargement du Substrat

- Placez le substrat sur le porte-substrat.
- Assurez-vous qu'il est bien centré pour éviter les déséquilibres pendant la rotation.

III.7.1.3 Préparation de la Solution

- Préparez la solution à déposer en respectant les consignes de sécurité et de manipulation des produits chimiques.
- Versez une quantité appropriée de solution sur le substrat.

III.7.2 Exécution du Test

III.7.2.1 Allumage d'appareil

- Appuyez sur le bouton d'alimentation pour allumer l'appareil.
- Attendez que l'interface utilisateur s'initialise.

III.7.2.2 Configuration des Paramètres de Rotation

- Réglez la vitesse de rotation

III.7.2.3 Démarrage du Cycle

- Fermez le couvercle de sécurité.
- Lancez le cycle de rotation en appuyant sur le bouton de démarrage.

III.7.2.4 Surveillance

- Surveillez le processus

III.7.3 Analyse Post-Test

III.7.3.1 Récupération du Substrat

- Une fois le cycle terminé, ouvrez le couvercle de sécurité.
- Retirez délicatement le substrat du porte-substrat.

III.7.3.2 Inspection du Dépôt

- Inspectez visuellement le dépôt pour vérifier son uniformité.
- Utilisez des outils d'analyse comme un microscope ou un ellipsomètre pour mesurer l'épaisseur de la couche et sa qualité.

III.8 CONCLUSION

La conception et la réalisation d'un spin coater impliquent plusieurs étapes, allant de la compréhension du principe de fonctionnement jusqu'à la construction et le test de l'appareil.

La conception et la réalisation d'un spin coater nécessitent une planification minutieuse et une attention aux détails techniques. Grâce à l'impression 3D, on a pu fabriquer les composants à structures spécifiques du spin coater .

On a pu concevoir un appareil personnalisé et fonctionnel à moindre coût. Ce projet nécessitait des compétences en conception 3D, en impression 3D, en programmation et en assemblage électronique, mais il nous a offert une grande flexibilité et un prototypage rapide.

Conclusion————— ————— **Générale**

Conclusion Générale

La conception et la réalisation d'un spin coater commandé par Arduino marquent une avancée significative dans le domaine de l'ingénierie des matériaux et de la microfabrication. Tout au long de ce mémoire, nous avons exploré les aspects cruciaux de cette technologie, démontrant comment un spin coater peut être utilisé pour appliquer des couches minces de matériaux sur des substrats de manière uniforme, une technique essentielle pour la fabrication de dispositifs électroniques, optiques et biomédicaux. La création d'un spin coater abordable et personnalisable grâce à l'Arduino, offre une solution accessible et flexible, particulièrement bénéfique pour les laboratoires de petite échelle et les projets de recherche individuels.

Ce mémoire s'est articulé autour de trois chapitres principaux. Dans le premier chapitre, nous avons passé en revue les techniques de dépôt des couches minces, en soulignant leur diversité et leur importance dans l'industrie moderne. Le deuxième chapitre a été consacré au dépôt de couches minces par sol-gel, une méthode remarquable par sa simplicité et son efficacité. Nous y avons détaillé les principes de cette technique, son processus de transformation d'une solution colloïdale en un réseau intégré, et son rôle crucial dans la formation de films minces et homogènes.

Enfin, le troisième chapitre a porté sur la conception et la réalisation d'un spin coater commandé par Arduino. Nous y avons décrit en détail les composants nécessaires, notamment le moteur à courant continu pour le contrôle de la rotation et les interfaces utilisateur pour la configuration des paramètres de revêtement. Ce chapitre a illustré comment l'innovation et la technologie peuvent transformer des idées en solutions pratiques et efficaces, en combinant l'électronique, la programmation et la mécanique.

Ce mémoire représente un projet start-up avec des objectifs clairs et ambitieux. Parmi ces objectifs, citons :

1. **Réduction des coûts** : Développer un spin coater performant et économique, rendant cette technologie accessible aux laboratoires de petite échelle et aux chercheurs individuels.
2. **Flexibilité et Personnalisation** : Offrir une solution qui permet une personnalisation facile des paramètres de fonctionnement pour répondre aux besoins spécifiques des différents projets.
3. **Innovation Technologique** : Intégrer l'Arduino dans le contrôle des spin coaters pour ouvrir de nouvelles perspectives en recherche et développement dans le

domaine des couches minces ; cependant les spin coater présents sur le marché sont à base de carte mère munie de microcontrôleurs qui diffèrent de l'arduino.

4. **Opportunités d'Industrialisation** : Créer des opportunités industrielles pour le développement de nouveaux produits et technologies dans divers secteurs grâce à l'innovation apportée par ce projet.

En conclusion, ce projet start-up démontre qu'il est possible de révolutionner la manière dont les couches minces sont appliquées, en rendant la technologie plus abordable et accessible. L'innovation apportée par ce projet peut non seulement bénéficier à la communauté scientifique, mais également ouvrir des opportunités commerciales pour le développement de nouveaux produits et technologies dans divers secteurs. Ce mémoire met en évidence que, grâce à l'utilisation d'une plateforme Arduino, les objectifs d'innovation, de réduction des coûts et de démocratisation de la technologie peuvent être atteints, propulsant ainsi cette start-up vers de nouvelles réussites.

Références

- [1] : Farida TALBI et Lynda FERHAT « conecption et réalisation d'un spin coater pour le dépôt en couches mines »,mémoire de fin d'étude, Universite Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou,2016.
- [2] :K.KAMLI, « Elaboration et caractérisations physico-chimique des couches mincesde sulfure d'étain par spray ultrasonique: Effet des sources d'étain », Mémoire de Magister spécialité Physique, Université Mohamed Khider-Biskra, 2013.
- [3] : M. Dolata, P. Kedzierzawski, J. Augustynski., *Electrochimica Acta.* 41(7/8) (1996) PP. 1287-1293.
- [4]: H. Barkahoum, «Etude des propriétés optiques des nanocristaux du semi-conducteur CdS dispersés dans des films minces du polymère polystyrène et de la silice SiO₂», Mémoire de Magister, Université de Mentouri-Constantine, 2006.
- [5]: A. Shiga, A. Tsujiko, T. Ide, S. Yae, Y. Nakato., *J. Phys. Chem. B* 102 (1998) 6049-6055.
- [6] The physics of thin film by S.K.Mahajen and D.R.Pashley
- [7] NanoQAM: <https://nanoqam.ca/wp/en/services-2/spin-coating/>
- [8] Spin Coating: Principles and Techniques" by Paul S. West: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-5342-3_20
- [9] M.MAACHE, « Elaboration de films minces d'oxydes semi-conducteurs par voie Sol-Gel. En vue d'application aux Optoélectroniques capteurs et biomédicaux » Université Mohamed Khider-Biskra, 2014
- [10] BORDES Guilhem « Élaboration et caractérisation d'un solide hydrophobe pour l'étude de la condition de glissement hydrodynamique à l'interface solide-liquide »Mémoire de fin d'étude en Physique, Université Claude Bernard Lyon1,2006.