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 الشهيد الشيخ العربي التبسي - تبسة
Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi – Tébessa
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Électronique et des Télécommunications

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

Filière : Électronique

Spécialité : Instrumentation

Par : - Brahmia Nada
- Mazouz Meriem

THEME

Étude et développement d'un dispositif de dépôt par centrifugation pour applications en synthèse de films minces nanostructurés.

Présenté et évalué, le 09/06/2026, par le jury composé de :

Nom et prénom		Grade	Qualité
Mme.	Soraya GOUDER	MCA	Présidente
M.	Seddik BOUABIDA	MCB	Rapporteur
M.	Hassene NEZZARI	MCA	Examinateur

Promotion : 2025/2026

Remerciement

Louange à Allah, une louange infinie et bénie, pour toutes les grâces qu'Il nous a accordées et pour nous avoir donné la force, la patience et la volonté nécessaires afin d'achever ce modeste travail. Nous Lui demandons de faire de cette œuvre un travail sincère et utile.

Nous adressons nos plus sincères remerciements, notre profonde gratitude ainsi que notre haute considération à notre encadreur, Monsieur **Bouabida Seddik**, *pour son accompagnement précieux, ses orientations scientifiques pertinentes, ses remarques constructives et ses conseils avisés, qui ont largement contribué à l'élaboration et à l'aboutissement de ce mémoire dans les meilleures conditions.*

Nous exprimons également notre profonde reconnaissance à l'ensemble de nos enseignants qui nous ont accompagnés tout au long de notre parcours universitaire, en nous transmettant leurs connaissances, leur expérience et leur passion du savoir avec générosité et dévouement.

Nos remerciements s'adressent aussi à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, par leur soutien, leurs encouragements, leur aide précieuse ou même par une simple parole bienveillante qui nous a motivés à persévérer et à surmonter les difficultés rencontrées.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude à toutes les personnes qui nous ont soutenus durant cette étape importante de notre parcours et qui ont participé à créer les meilleures conditions pour mener ce travail à terme.

Enfin, nous prions Allah le Tout-Puissant de faire de ce mémoire un travail bénéfique et d'accorder Sa meilleure récompense à toutes les personnes ayant contribué à sa réalisation.

Dédicace

بسم الله الرحمن الرحيم

﴿وَمَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ ۖ عَلَيْهِ تَوَكَّلْتُ وَإِلَيْهِ أُنِيبُ﴾

À ceux qui ont veillé les nuits pour mon confort,
et qui m'ont offert de leur vie ce qui ne peut être compensé,
à la source intarissable de tendresse et d'amour,
mes très chers parents,
que Dieu les garde et les protège.
À ceux qui ont été mon soutien dans les moments difficiles
et ma joie dans les moments heureux,
mes frères et sœurs.
Aux compagnons de route qui ont allégé le poids du chemin,
mes fidèles amis.
À ceux qui ont éclairé mon esprit de la lumière du savoir,
et n'ont jamais hésité à me guider et à me conseiller,
mes chers enseignants.
À tous ceux qui ont cru en moi
lorsque je doutais de moi-même.
À vous tous,
je dédie le fruit de mon effort et de mes années de labeur,
en espérant que ce travail soit utile
et constitue une modeste contribution sur le chemin de la science.

Mazouz Meriem

Dédicace

بسم الله الرحمن الرحيم

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, qu'Allah les protège et leur accorde une longue vie, en témoignage de ma profonde gratitude pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis, ainsi que pour leur amour, leur soutien et leurs encouragements constants qui m'ont permis d'arriver jusqu'à ce jour.

À mon cher mari **Hamza**, *qui a toujours été à mes côtés par son soutien, sa patience et ses encouragements tout au long de mon parcours, et qui m'a donné la force de persévérer et de surmonter les difficultés. Je lui adresse à travers ce travail toute mon estime et mon affection.*

À mes frères et sœurs, ainsi qu'à mes chères amies, et à toutes les personnes qui m'ont soutenue et encouragée durant mon parcours universitaire.

À tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation et m'ont transmis le savoir avec dévouement et générosité.

Je dédie ce travail en souhaitant à chacun réussite, bonheur et prospérité.

Brahmia Nada

Résumé

Ce travail de fin d'études porte sur la conception, la simulation et la réalisation d'un système automatisé de revêtement par centrifugation (Spin-Coating) intégré à une unité de séchage thermique, destiné au dépôt contrôlé de couches minces sur substrats à des fins de recherche et d'enseignement. L'objectif principal consiste à proposer une solution économique, précise et fiable, constituant une alternative accessible aux systèmes commerciaux utilisés dans les laboratoires de nanotechnologie et les établissements d'enseignement supérieur.

Le système développé repose sur un moteur à courant continu sans balais (BLDC), piloté par un contrôleur électronique de vitesse (ESC 50A) et commandé par un microcontrôleur Arduino Mega 2560 via des signaux PWM. L'interface utilisateur, composée d'un clavier matriciel 4×4 et d'un afficheur LCD 16×2 avec interface I2C, permet la programmation de jusqu'à quatre étapes de dépôt avec contrôle indépendant de la vitesse (100 à 5000 tr/min), de la durée et du taux d'accélération.

Le module de séchage intégré assure une régulation thermique contrôlée grâce à un capteur NTC associé à un circuit TRIAC, avec gestion automatique du support d'échantillon par moteur à courant continu et fins de course. La simulation réalisée sous Proteus ISIS a permis de valider le fonctionnement global du système avant sa réalisation physique.

Le prototype final, intégré dans un boîtier mécanique conçu et assemblé manuellement, est pleinement opérationnel et offre des performances comparables à celles des instruments commerciaux pour un coût nettement inférieur.

Mots-clés : Spin-Coating, couches minces, moteur BLDC, Arduino Mega 2560, PWM, séchage thermique, TRIAC, capteur NTC, nanotechnologie.

ملخص

يتناول مشروع التخرج هذا تصميم ومحاكاة وإنجاز نظام آلي للطلاء بالطرد المركزي (Spin-Coating) مدمج مع وحدة تجفيف حراري، مخصص لترسيب الأغشية الرقيقة على الركائز بطريقة محكمة لأغراض البحث والتعليم. ويتمثل الهدف الرئيسي في تقديم حل اقتصادي ودقيق وموثوق يشكل بديلاً متاحاً للأنظمة التجارية المستعملة في مخابر تكنولوجيا النانو ومؤسسات التعليم العالي.

يعتمد النظام المطور على محرك تيار مستمر عديم الفُرش (BLDC) يتم التحكم فيه بواسطة متحكم إلكتروني في السرعة (ESC 50A)، ويُقاد عبر المتحكم الدقيق Arduino Mega 2560 باستخدام إشارات PWM. وتتكون واجهة المستخدم من لوحة مفاتيح مصفوفية 4×4 وشاشة LCD 16×2 مزودة بواجهة I2C، مما يسمح ببرمجة ما يصل إلى أربع مراحل ترسيب مع التحكم المستقل في السرعة (من 100 إلى 5000 دورة/دقيقة) والزمن ومعدل التسارع.

تضمن وحدة التجفيف المدمجة تنظيماً حرارياً محكماً باستخدام حساس NTC مرتبط بدارة TRIAC، مع إدارة آلية لحامل العينة بواسطة محرك تيار مستمر ومفاتيح نهاية الشوط. وقد سمحت المحاكاة المنجزة باستعمال برنامج Proteus ISIS بالتحقق من الأداء العام للنظام قبل إنجازه الفعلي.

أما النموذج النهائي، فقد تم دمجه داخل هيكل ميكانيكي صُمم وجُمّع يدوياً، وهو يعمل بشكل كامل ويقدم أداءً مشابهاً للأجهزة التجارية بتكلفة أقل بكثير.

الكلمات المفتاحية: الطلاء بالدوران، الأغشية الرقيقة، محرك التيار المستمر بدون فرش، Arduino Mega 2560، تعديل عرض النبضة، التجفيف الحراري، الترياك، مستشعر NTC، تقنية النانو.

Abstract

This final-year project focuses on the design, simulation, and implementation of an automated Spin-Coating system integrated with a thermal drying unit, intended for the controlled deposition of thin films on substrates for research and educational purposes. The main objective is to provide an economical, accurate, and reliable solution that represents an accessible alternative to commercial systems used in nanotechnology laboratories and higher education institutions.

The developed system is based on a Brushless Direct Current (BLDC) motor driven by an Electronic Speed Controller (ESC 50A) and controlled by an Arduino Mega 2560 microcontroller through PWM signals. The user interface, composed of a 4×4 matrix keypad and a 16×2 LCD display with an I2C interface, allows the programming of up to four deposition stages with independent control of speed (100 to 5000 rpm), duration, and acceleration rate.

The integrated drying module ensures controlled thermal regulation using an NTC sensor associated with a TRIAC circuit, with automatic sample holder management through a DC motor and limit switches. The simulation carried out using Proteus ISIS validated the overall operation of the system before its physical implementation.

The final prototype, integrated into a mechanically designed and manually assembled enclosure, is fully operational and provides performances comparable to commercial instruments at a significantly lower cost.

Keywords: Spin-Coating, thin films, BLDC motor, Arduino Mega 2560, PWM, thermal drying, TRIAC, NTC sensor, nanotechnology.

Table des matières

Remerciement I
Dédicace II
Résumé IV
Table des matières VI
Liste des figures X
Liste des tableaux XIII
Liste des acronymes XIV
Liste des symboles XV
Introduction Générale 1

Chapitre I Généralités et techniques de fabrication des couches minces

Introduction 3
I.1.Généralités sur les couches minces 3
I.1.1. Historique et évolution des couches minces 3
I.1.2. Définition des couches minces 4
I.1.3. Classification structurale des couches minces 4
I.1.4. Mécanismes de croissance des couches minces 5
I.1.5. Étapes pour déposer une couche mince 5
I.1.6. Méthodes d'élaboration des couches minces 7
I.2. Techniques de dépôt des couches minces nanostructurées 8
I.2.1. Les méthodes physiques (PVD) 9
I.2.1.1. En milieu vide poussé 9
I.2.1.2. En milieu plasma 10
I.2.2. Les méthodes chimiques (CVD) 11
I.2.2.1. En milieu de gaz réactif 11
I.2.2.2. En milieu liquide 13
I.3. Techniques de caractérisation des couches minces nanostructurées 20
I.3.1. Diffraction des Rayons X (DRX) 20
I.3.2. Microscope électronique à balayage (MEB) 21
I.3.3. Microscopie à Force Atomique (AFM) 22
I.3.4. Spectrophotométrie UV-Visible-NIR 23
I.3.5. Mesures électriques par quatre pointes 24
I.4. Applications des couches minces 24
Conclusion 25

Chapitre II Étude et analyse des moteurs à courant continu sans balais (BLDC).

Introduction 27

II.1. Historique des moteurs BLDC 27
II.2. Définition du moteur BLDC 28
II.3. Constitution du moteur à courant continu sans balais (BLDC) 29
II.3.1. Le stator 29
II.3.2. Le rotor 31
II.4. Comparaison entre les moteurs à balais et les moteurs sans balais 32
II.5. Différents types de BLDC 33
II.5.1. Le moteur BLDC à rotor extérieur (Outrunner) 33
II.5.2. Le moteur BLDC à rotor intérieur 34
II.5.3. Le moteur BLDC à entrefer axial (disques) 34
II.6. Principe de fonctionnement des moteurs BLDC 35
II.7. La commutation dans les moteurs BLDC 36
II.7.1. Commande par capteurs à effet Hall des moteurs BLDC 36
II.7.2. Commande sans capteurs des moteurs BLDC 39
II.8. Caractéristiques du moteur BLDC 40
II.9. Avantages et inconvénients du moteur BLDC 40
II.9.1. Les avantages du moteur BLDC ..... **Erreur ! Signet non défini.**
II.9.2. Les inconvénients de BLDC ..... **Erreur ! Signet non défini.**
II.10. Applications des moteurs BLDC 41
Conclusion 43

Chapitre III Conception et Simulation du Système de Revêtement par Centrifugation

Introduction 45
III.1. Architecture générale du système 46
III.1.1. Diagramme fonctionnel et flux de données 46
III.1.2. Choix de la topologie de contrôle 46
III.2. Présentation des composants utilisés 47
III.2.1. Microcontrôleur Arduino Mega 2560 (ATmega2560) 47
III.2.2. Driver demi-pont IR2101 et MOSFET IRF540N 48
III.2.3. Capteur NTC 220kΩ (système de séchage) 50
III.2.4. Plaque chauffante et optotriaque SOC1044 (système de séchage) 51
III.2.5. Moteur DC et pont L298N (gestion du support d'échantillon) 52
III.2.6. Interface utilisateur : LCD I2C et clavier matriciel 4×4 52
III.3. Schéma électronique du système 53
III.3.1. Bloc de puissance BLDC (pont triphasé) 53
III.3.2. Circuit de commande IR2101 (simulation Proteus uniquement) 53
III.3.3. Bloc de séchage (drying system) 54
III.4. Stratégie de commande PWM six pas (BLDC) 54

III.4.1. Principe de la commutation trapézoïdale 54
III.4.2. Contrôle de la vitesse par PWM 54
III.4.3. Profil d'accélération progressive 55
III.5. Système de séchage avec contrôle thermique 55
III.5.1. Mesure de température par capteur NTC 55
III.5.2. Contrôle du chauffage avec hystérésis thermique 56
III.5.3. Gestion mécanique du support d'échantillon 56
III.6. Développement du logiciel embarqué 56
III.6.1. Architecture logicielle : Machine à états finis (FSM) 56
III.6.2. Points clés de l'implémentation 57
III.7. Simulation sous Proteus ISIS 57
III.7.1. Environnement de simulation 57
III.7.2. Approche simulation vs expérimentation : avantages et différences 58
III.7.3. Résultats de simulation 58
III.7.4. Limitations de la simulation 61
III.8. Spécifications finales du système 62
Conclusion 62
Chapitre IV Réalisation matérielle du Système de Revêtement par Centrifugation
Introduction 63
IV.1. Réalisation du prototype du Système (Spin- Coating & Drying) 63
IV.1.1. Présentation des composants et outils utilisés 63
IV.1.2. Câblage et Intégration des Composants 64
IV.1.2.1. Connexion de la carte Arduino Mega 2560 (ATmega2560) 64
IV.1.2.2. Connexion du système de commande du moteur BLDC (ESC 50A) 65
IV.1.2.3. Connexion du moteur à courant continu et du Driver L298N 65
IV.1.2.4. Connexion du circuit thermique (TRIAC BCR5PM + SOC1044 + capteur NTC) 66
IV.1.2.5. Connexion de l'interface homme-machine (LCD + Clavier 4×4 + Buzzer) 68
IV.1.2.6. Connexion des dispositifs d'arrêt et de contrôle 68
IV.1.3. Structure Mécanique et Distribution des Composants 69
IV.1.4. Présentation du prototype finalisé du système 72
IV.2. Principe de fonctionnement du système 73
IV.2.1. Initialisation et interface utilisateur 73
IV.2.2. Exécution du cycle de centrifugation 74
IV.2.3. Cycle de séchage 75
IV.2.4. Organigramme général du système 77
IV.3. Défis techniques et solutions adoptées 78
Conclusion 78

Conclusion Générale 81
Références bibliographiques..... 82

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Schéma représentatif d'une couche mince déposée sur un substrat 4
Figure I.2: a) Film polycristallin, b) Film texturé, c) Film épitaxié polycristallin, d) Film épitaxié monocristallin 5
Figure I.3: Diagramme des étapes du procédé de déposition des couches minces 6
Figure I.4: Approches de synthèse nanostructurée 8
Figure I.5: Techniques de dépôt des couches minces 8
Figure I.6: Schéma du système du dépôt des couches minces par évaporation sous vide 9
Figure I.7: Principe de l'ablation laser 10
Figure I.8: Schéma conventionnel d'un pulvérisateur cathodique 10
Figure I.9: Schéma de principe du dépôt CVD – réacteur à parois chaudes 11
Figure I.10: Schéma de principe de la radiation Laser 12
Figure I.11: Étapes clés d'un procédé de PECVD 12
Figure I.12: Schéma de la technique de pulvérisation spray 13
Figure I.13: Schéma du système utilisé pour l'électrodéposition 13
Figure I.14: Schéma représentant les étapes du procédé sol-gel 14
Figure I.15: Dépôt de couches minces par trempage–tirage (Dip-Coating) 15
Figure I.16: Les quatre étapes du mécanisme de Spin-Coating 18
Figure I.17: Schéma d'un diffractomètre de rayons X 21
Figure I.18: Schéma représentant le principe de la diffraction des rayons X par les plans atomiques 21
Figure I.19: Schéma d'un microscope électronique à balayage typique (MEB) ; et schéma descriptif des types d'électrons mis en jeu lors d'irradiation 22
Figure I.20: Schéma descriptif AFM 23
Figure I.21: Principe de fonctionnement de la spectroscopie UV-visible-NIR 23
Figure I.22: Schéma d'un dispositif quatre pointes alignées 24

Chapitre II

Figure II.1: moteur BLDC 29
Figure II.2: Section transversale d'un moteur BLDC 29
Figure II.3: Stator d'un moteur BLDC 30
Figure II.4: Force contre-électromotrice (Back EMF) de forme trapézoïdale 30
Figure II.5: Force contre-électromotrice (Back EMF) de forme sinusoïdale 31
Figure II.6: les sections transversales de l'aimant du rotor 31
Figure II.7: Moteur BLDC à rotor extérieur 33
Figure II.8: Moteur BLDC à rotor intérieur 34
Figure II.9: Moteur BLDC à entrefer axial 35
Figure II.10 : Exemple de situation de commutation 35
Figure II.11: Fonctionnement de l'onduleur et du moteur brushless 36
Figure II.12: Séquence d'excitation des enroulements selon les signaux des capteurs Hall 37
Figure II.13: Signaux des capteurs à effet Hall, FEM inverse (Back EMF), couple de sortie et courant de phase 37

Figure II.14: Schéma bloc de commande 38
Figure II.15 : Schéma bloc de la commande sans capteurs (Sensorless Control) 39
Figure II.16 : Applications des moteurs BLDC dans divers secteurs 42

Chapitre III

Figure III.1: Schéma du driver IR2101 en configuration demi-pont avec circuit bootstrap 48
Figure III.2 : Pont triphasé à base de MOSFET IRF540N (Q1 à Q6) pour la commande du moteur BLDC 49
Figure III.3 : Structure du système de commande d'un moteur BLDC (Simulation Proteus : Driver et MOSFET / Pratique : ESC) 50
Figure III.4: Schéma de simulation sous Proteus du capteur de température NTC avec pont diviseur de tension 51
Figure III.5 : Schéma Proteus de commande de la plaque chauffante par optotriaque et TRIAC..... 51
Figure III.6 : Schéma Proteus du moteur DC avec pont en H L298N et fins de course 52
Figure III.7: Schéma électronique du système sous simulation Proteus ISIS 53
Figure III.8 : Écran de démarrage lors de l'exécution de la simulation sous Proteus 58
Figure III.9 : Écran de saisie des paramètres via clavier matriciel 4×4 58
Figure III.10 : Écran affichant l'étape en cours et le temps restant 58
Figure III.11 : Signaux PWM du moteur BLDC à une vitesse de 1000 tr/min observés sous simulation Proteus 59
Figure III.12: Signaux PWM du moteur BLDC à une vitesse de 2500 tr/min observés sous simulation Proteus 60
Figure III.13: Signaux PWM du moteur BLDC à une vitesse de 5000 tr/min observés sous simulation Proteus 60

Chapitre IV

Figure IV.1 : Connexion de l'ESC 50A avec le moteur BLDC 65
Figure IV.2 : Connexion du moteur DC avec le Driver L298N 66
Figure IV.3 : Carte PCB du circuit thermique 66
Figure IV.4: Schéma du circuit de chauffage et de mesure de température 67
Figure IV.5: Connexion du circuit de chauffage et de mesure de température 67
Figure IV.6: Vue d'ensemble du câblage et de l'intégration des composants du système 69
Figure IV.7 : Boîtier et structure externe du système 70
Figure IV.8: Dimensions du boîtier externe 70
Figure IV.9: Cuve et moteur BLDC 71
Figure IV.10: Face inclinée du système 71
Figure IV.11 : Face avant du système 71
Figure IV.12: Compartiment interne (chambre électronique du système) 72
Figure IV.13 : Prototype finalisé du système (Spin-Coater & Drying) 73
Figure IV.14 : Écran de démarrage affiché sur le LCD lors de la mise sous tension 73
Figure IV.15 : Saisie des paramètres via le clavier matriciel 74
Figure IV.16 : Affichage des paramètres sur le LCD avant confirmation 74
Figure IV.17 : Affichage de l'état d'exécution avec la vitesse et l'étape en cours sur le LCD 74
Figure IV.18: Affichage du message d'arrêt d'urgence sur le LCD 75

Figure IV.19 : Affichage de la question de démarrage du séchage sur le LCD 75
Figure IV.20 : Saisie des paramètres de séchage sur le LCD 75
Figure IV.21 : Support d'échantillon en position éjectée 76
Figure IV.22 : Affichage de la température et du temps restant durant le séchage 76
Figure IV.23 : Affichage de l'achèvement du cycle de séchage sur le LCD 76
Figure IV.24 : Organigramme général du système (Spin-Coating et Drying). 77

Liste des tableaux

Chapitre I

Chapitre II

Tableau II.1 : Moteur DC à balais vs moteur DC sans balais 32
Tableau II.2 : Séquence de rotation du moteur dans le sens horaire (vue du côté opposé à l'entraînement) 37
Tableau II.3 : Séquence de rotation du moteur dans le sens antihoraire (vue du côté opposé à l'entraînement) 38

Chapitre III

Tableau III.1 : Spécifications techniques du microcontrôleur ATmega2560..... 47
Tableau III.2 : États des bras du pont triphasé durant les six étapes de la commutation six pas..... 54

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Typologie et rôle des composants du prototype 63

Liste des acronymes

Acronyme	Signification
AFM	Atomic Force Microscopy
Back EMF	Back Electromotive Force
BLDC	Brushless Direct Current Motor
BSE	Backscattered Electrons
CdS	Cadmium Sulfide.
CNC	Computer Numerical Control
CVD	Chemical Vapor Deposition
DC/AC	Direct Current / Alternating Current
DRX	Diffraction des Rayons X
DTC	Direct Torque Control
EMI	Electromagnetic Interference
ESC	Electronic Speed Controller
FEM	Force Électromotrice
FOC	Field Oriented Control
IEC	International Electrotechnical Commission
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
LACVD	Laser Chemical Vapor Deposition
LED	Light Emitting Diode
LPCVD	Low Pressure Chemical Vapor Deposition
MEB	Microscope Électronique à Balayage
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
MPPT	Maximum Power Point Tracking
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
PLD	Pulsed Laser Deposition
PVD	Physical Vapor Deposition
PWM	Pulse Width Modulation
SVPWM	Space Vector Pulse Width Modulation
SE	Secondary Electrons
TBC	Thermal Barrier Coating
TFTs	Thin Film Transistors

Liste des symboles

Symbole	Description	Unité
η	La viscosité dynamique du fluide	[Pa·s]
v	La vitesse radiale du fluide	[m/s]
z	La coordonnée verticale perpendiculaire au substrat	[m]
ρ	La masse volumique du fluide	[kg/m³]
r	La distance radiale par rapport au centre de rotation	[m]
ω	La vitesse angulaire de rotation	[rad/s]
h	L'épaisseur du film	[m]
t	Le temps	[s]
q	Débit volumique	[m³/s]
λ	La longueur d'onde du faisceau de rayon X incident	[Å]
n	L'ordre de diffraction	
d_{hkl}	La distance inter-réticulaire du réseau cristallin	[Å]
θ	Angle de Bragg	[°]
U	La tension	[V]
I	Le courant	[A]
R	La résistance	[Ω]
ρ	La résistivité de la couche mince	[Ω.m]
e	L'épaisseur de la couche	[m]
K	Une constante géométrique sans unité	
E	La force contre-électromotrice	[V]
Ke	La constante de Back EMF	
N	Nombre de spires par phase	
l	Longueur du rotor	[m]
r	Rayon interne du rotor	[m]
B	Densité du champ magnétique du rotor	[T]

Introduction Générale

Les dernières décennies ont été marquées par un développement rapide dans le domaine des sciences des matériaux, suscitant un intérêt croissant pour les couches minces en tant qu'éléments essentiels des technologies modernes. Des cellules solaires aux capteurs, en passant par les revêtements protecteurs et les circuits électroniques intégrés, les couches minces occupent aujourd'hui une place centrale dans de nombreux domaines technologiques. Cet intérêt s'explique par les propriétés physiques et chimiques particulières qu'un matériau acquiert lorsqu'il est déposé sous forme de couches dont l'épaisseur varie de quelques nanomètres à plusieurs micromètres, lui conférant un comportement différent de celui observé à l'état massif.

Afin d'obtenir les propriétés recherchées, le contrôle précis du procédé de dépôt revêt une importance majeure. Plusieurs techniques existent, allant des méthodes physiques, telles que l'évaporation sous vide et la pulvérisation cathodique, aux méthodes chimiques, telles que le dépôt chimique en phase vapeur et la technique sol-gel. Parmi ces techniques, le revêtement par centrifugation (Spin-Coating) suscite un intérêt particulier dans les milieux académiques et scientifiques grâce à sa simplicité de mise en œuvre et à sa capacité à produire des couches homogènes avec une bonne maîtrise de l'épaisseur déposée.

Cependant, les équipements commerciaux dédiés à cette technique demeurent coûteux et peu accessibles pour de nombreux laboratoires de recherche et établissements universitaires locaux. C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent travail, qui propose une solution alternative économique et performante basée sur la conception et la réalisation d'un système automatisé de Spin-Coating intégrant une unité de séchage thermique, à partir de composants électroniques accessibles et d'outils de développement open-source.

Ce projet repose sur une démarche d'ingénierie intégrée associant étude théorique, simulation numérique et réalisation expérimentale, dans le but de développer un dispositif fiable, fonctionnel et adapté aux besoins de la recherche et de l'enseignement.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres complémentaires. Le premier chapitre présente les bases théoriques relatives aux couches minces, à leurs mécanismes de croissance, aux techniques de dépôt ainsi qu'aux méthodes de caractérisation structurale, optique et électrique. Le deuxième chapitre est consacré à l'étude du moteur BLDC utilisé dans le système de centrifugation, en détaillant sa structure, son principe de fonctionnement, ses méthodes de commande et ses avantages. Le troisième chapitre traite de la conception détaillée du système ainsi que de sa simulation sous Proteus ISIS, avec une présentation de l'architecture matérielle et des algorithmes de commande du moteur et de régulation thermique. Enfin, le quatrième chapitre décrit la réalisation pratique du prototype, son fonctionnement automatisé, les contraintes techniques rencontrées ainsi que les solutions adoptées afin d'aboutir à un prototype pleinement opérationnel.

Chapitre I

Généralités et techniques de fabrication des couches minces.

Introduction

Les couches minces représentent aujourd'hui l'un des axes de recherche les plus dynamiques en science des matériaux, portés par les exigences croissantes des technologies de pointe. Grâce à leurs propriétés physiques et chimiques singulières, qui émergent dès lors que l'épaisseur du matériau est ramenée à l'échelle nanométrique ou micrométrique, ces structures trouvent des applications dans des secteurs aussi variés que l'électronique, l'optique, la conversion d'énergie et la détection.

L'optimisation des performances des dispositifs actuels est étroitement liée à la maîtrise des procédés de dépôt. À cet égard, la technique de Spin-Coating se distingue par son accessibilité, son coût réduit et sa capacité à produire des films uniformes avec un contrôle précis de l'épaisseur, ce qui en fait une méthode particulièrement adaptée aux applications en laboratoire comme en industrie.

Ce chapitre propose une vue d'ensemble structurée du domaine des couches minces. Il aborde successivement leur évolution historique, leur définition, leur classification structurale ainsi que les mécanismes régissant leur croissance. Les principales approches d'élaboration y sont ensuite présentées, en distinguant les méthodes physiques (PVD) des méthodes chimiques (CVD), avec une attention particulière portée à la technique Sol-Gel et notamment au procédé Spin-Coating. Une présentation des techniques de caractérisation usuelles telles que la diffraction des rayons X (DRX), la microscopie électronique à balayage (MEB), la microscopie à force atomique (AFM) et la spectrophotométrie UV-Visible vient compléter ce chapitre, avant d'en rappeler les principales applications technologiques.

I.1. Généralités sur les couches minces

I.1.1. Historique et évolution des couches minces

L'utilisation des couches minces remonte à plusieurs siècles, l'émaillage figurant parmi leurs premières manifestations connues. Dès cette époque, elles ont investi de nombreux domaines : l'optique avec les revêtements réfléchissants et antireflets, l'électrotechnique avec les couches conductrices, la mécanique avec les traitements de surface résistants à l'usure, et la chimie avec les couches protectrices à base de fluorures [1].

Au milieu du XX^{e} siècle, l'avènement de la microélectronique (marqué par l'invention du transistor à la fin des années 1940 puis l'apparition des premiers circuits intégrés en 1958) a constitué un tournant décisif pour ce domaine. Les matériaux en couches minces, qu'ils soient métalliques ou semi-conducteurs, se sont alors imposés comme des composants incontournables grâce à leurs propriétés favorables à la miniaturisation. C'est dans ce contexte que Weimer a développé, au début des années 1960, les premiers transistors à films minces (TFTs) à base de CdS, bien que leur instabilité ait freiné leur adoption industrielle [1].

À partir des années 1980, l'intérêt s'est orienté vers les couches minces nanostructurées, portées par la demande croissante en dispositifs plus compacts, légers et performants [2]. Aujourd'hui, une large palette de matériaux (métaux, alliages, oxydes, nitrures, carbures et polymères) est mise en œuvre pour leur fabrication, confirmant leur rôle stratégique et leur expansion continue dans les secteurs industriels et scientifiques [3].

I.1.2. Définition des couches minces

Une couche mince désigne un dépôt de matériau réalisé sur un support solide appelé substrat, dont l'épaisseur, dimension caractéristique par excellence, s'étend du nanomètre (nm) au micromètre (µm) [2]. Cette réduction dimensionnelle confère au matériau un caractère quasi-bidimensionnel, qui constitue l'une de ses caractéristiques fondamentales [4].

Cette nature quasi-bidimensionnelle amplifie les effets d'interface dans le comportement physique du matériau, contrairement aux matériaux massifs (bulk) pour lesquels ces effets demeurent négligeables [4]. Il en résulte que les couches minces peuvent exhiber des propriétés physiques, optiques et électriques sensiblement différentes de celles du matériau en volume, à composition chimique identique [2]. Par ailleurs, au-delà d'une épaisseur critique, le matériau tend à recouvrer ses propriétés volumiques [5], tandis que la nature du substrat (amorphe, monocristallin ou polycristallin) joue un rôle déterminant dans l'évolution microstructurale du film [6].

En définitive, les conditions d'élaboration et la nature du substrat constituent les paramètres fondamentaux régissant les propriétés physiques des couches minces.

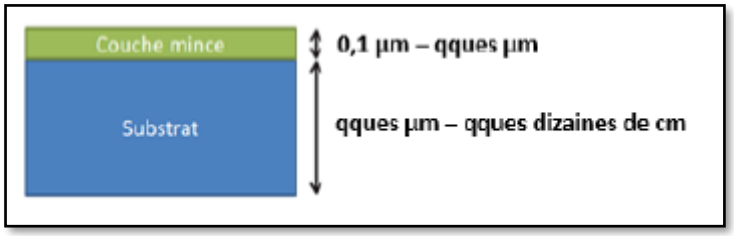


Figure I.1 : Schéma représentatif d'une couche mince déposée sur un substrat [6].

I.1.3. Classification structurale des couches minces

Les couches minces peuvent être classées selon leur structure cristalline en quatre catégories principales [7] :

- **Films amorphes :**

Les films amorphes se caractérisent par l'absence d'ordre à longue distance. Les atomes y sont organisés uniquement à courte portée, sans périodicité cristalline définie.

- **Films polycristallins :**

Les films polycristallins sont constitués d'un ensemble de grains cristallins orientés aléatoirement, sans relation préférentielle entre leurs axes cristallographiques et ceux du substrat (figure I.2.a).

- **Films texturés :**

Les films texturés présentent une orientation préférentielle dans une direction donnée, généralement hors plan. Un axe cristallin du film est aligné avec celui du substrat, tandis que les orientations dans le plan demeurent aléatoires (figure I.2.b).

- **Films épitaxiés :**

Les films épitaxiés se distinguent par une organisation cristalline ordonnée à la fois dans le plan et hors plan, avec des axes cristallographiques bien définis par rapport au substrat. Selon

la qualité cristalline, ils peuvent être monocristallins (figure I.2.d) ou polycristallins (figure I.2.c).

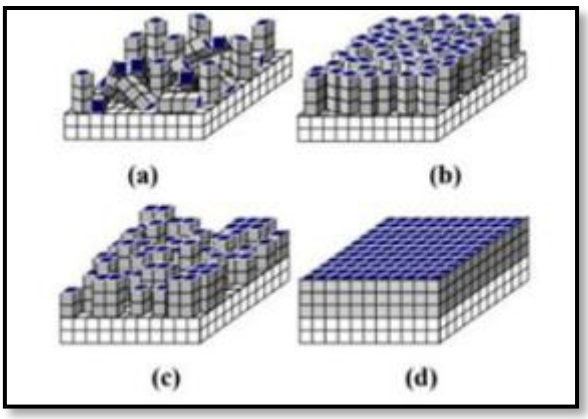


Figure I.2: a) Film polycristallin, **b)** Film texturé, **c)** Film épitaxié polycristallin, **d)** Film épitaxié monocristallin [7].

I.1.4. Mécanismes de croissance des couches minces

La formation d'une couche mince résulte d'une succession d'étapes physico-chimiques interdépendantes [8] :

- L'adsorption des atomes ou molécules incidents à la surface du substrat.
- La diffusion superficielle des espèces adsorbées, favorisant une distribution homogène du matériau déposé.
- L'établissement de liaisons stables entre les atomes déposés ou avec ceux du substrat.
- La nucléation, correspondant à l'agrégation initiale de la matière en germes stables.
- La croissance volumique à partir des noyaux formés.
- La diffusion en volume, assurant la cohésion et la stabilité structurale de la couche finale.

L'ensemble de ces mécanismes est régi par plusieurs paramètres procéduraux, notamment l'énergie des espèces déposées, la température de dépôt et la nature des matériaux en présence. Ces facteurs déterminent le mode de croissance adopté par le film au cours de son élaboration [8].

I.1.5. Étapes pour déposer une couche mince

Indépendamment du procédé de dépôt employé, l'élaboration d'une couche mince s'articule autour de quatre étapes fondamentales [9] :

1. La génération des espèces à déposer, sous forme d'atomes, de molécules ou d'agrégats.
2. L'acheminement de ces espèces depuis la source jusqu'au substrat.
3. La condensation sur le substrat et la croissance progressive de la couche.
4. Le contrôle et la caractérisation du revêtement obtenu.

Ces étapes sont schématiquement illustrées dans la figure I.3.

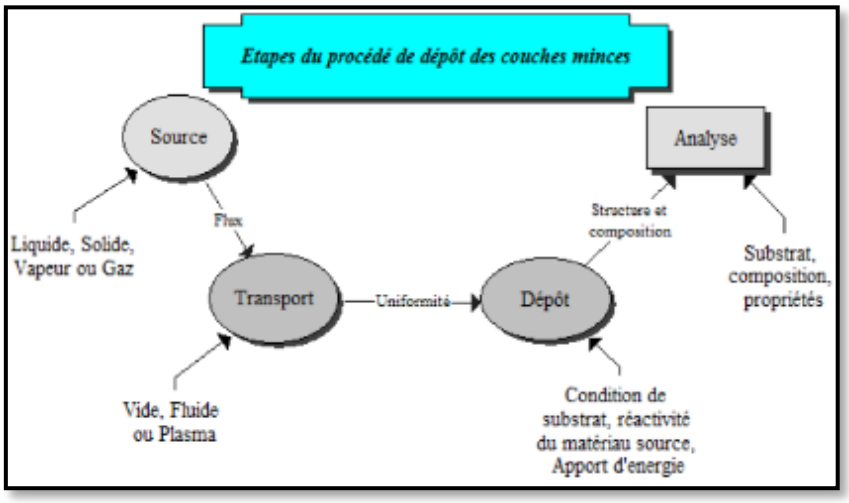


Figure I.3: Diagramme des étapes du procédé de déposition des couches minces [10].

I.1.5.1. La source

Le matériau source employé dans l'élaboration d'un film mince peut se présenter sous forme solide, liquide ou gazeuse. Lorsqu'il est solide, son acheminement vers le substrat nécessite une étape de vaporisation, réalisée par différentes techniques telles que l'évaporation thermique, le canon à électrons, l'ablation laser ou la pulvérisation ionique. Ces procédés sont regroupés sous l'appellation de dépôt physique en phase vapeur (PVD – Physical Vapor Deposition). Dans certains cas, la vaporisation de la source solide peut également s'effectuer par voie chimique [11].

Lorsque le matériau de base est un gaz, un liquide évaporé ou un solide transformé chimiquement en vapeur, le procédé est alors désigné sous le terme de dépôt chimique en phase vapeur (CVD – Chemical Vapor Deposition) [11].

I.1.5.2. Le transport

L'uniformité du flux des espèces acheminées vers le substrat représente un paramètre critique de l'étape de transport, fortement tributaire de la nature du milieu traversé. En milieu vide poussé, les espèces suivent des trajectoires rectilignes et l'uniformité du flux est essentiellement gouvernée par la géométrie du système. En revanche, en milieu fluide, les espèces subissent de multiples collisions, et l'uniformité dépend alors du débit gazeux et de la diffusion moléculaire [11].

De manière générale, les procédés PVD opèrent sous vide poussé, tandis que les procédés CVD fonctionnent à des pressions modérées, bien que des exceptions existent dans les deux cas. Par ailleurs, le milieu plasma constitue une alternative notable, offrant une densité d'énergie suffisante pour activer la formation des couches à basse température [11].

I.1.5.3. Le dépôt

L'étape de dépôt constitue le cœur du processus d'élaboration des couches minces. Elle englobe les phénomènes de nucléation et de coalescence, qui conduisent progressivement à la formation

d'un film continu sur la surface du substrat. Le comportement de cette étape est conditionné par les paramètres de la source, les conditions de transport ainsi que l'état de surface du substrat. Les facteurs les plus déterminants sont [11] :

- L'état de surface du substrat, défini par sa rugosité, son degré de contamination et son potentiel chimique vis-à-vis des espèces incidentes.
- La réactivité des espèces déposées, généralement quantifiée par le coefficient de collage.
- L'apport énergétique à la surface, pouvant être d'origine thermique, photonique ou ionique.

I.1.5.4. L'analyse

L'analyse constitue l'étape conclusive du processus d'élaboration, visant à évaluer les propriétés du film obtenu à travers des mesures expérimentales appropriées. Lorsque les résultats s'avèrent insuffisants ou ambigus, des investigations complémentaires sont entreprises afin d'affiner la compréhension des mécanismes mis en jeu [9].

I.1.6. Méthodes d'élaboration des couches minces

Les techniques d'élaboration des couches minces se regroupent en deux grandes approches, dites « Top-Down » et « Bottom-Up », dont la combinaison permet aujourd'hui d'atteindre des résolutions de plus en plus fines. L'assemblage des atomes, molécules ou agrégats s'effectue via des procédés physiques, chimiques ou mécaniques [12].

I.1.6.1. Approche Top-Down

L'approche descendante (Top-Down) est largement employée en microélectronique. Elle consiste à réduire progressivement la taille d'un matériau massif jusqu'à l'échelle nanométrique, en vue de réaliser des structures de plus en plus miniaturisées. Elle englobe des techniques telles que la lithographie, la nanolithographie et l'utilisation de faisceaux de rayons X, d'ions ou d'électrons, permettant la réalisation de substrats nanostructurés [12].

I.1.6.2. Approche Bottom-Up

L'approche ascendante (Bottom-Up), introduite par le physicien Richard Feynman en 1959, procède à l'inverse par ajout de matière sur une surface, atome par atome. Elle s'appuie sur des instruments de manipulation atomique, notamment le microscope à effet tunnel développé en 1982, et le microscope à force atomique conçu par Binnig et al. en 1986, permettant de manipuler et déposer les atomes individuellement [12].

Comme l'illustre la figure I.4, ces deux approches sont complémentaires : l'une part du matériau massif vers le nanométrique, tandis que l'autre construit progressivement la structure à partir d'unités élémentaires [13]

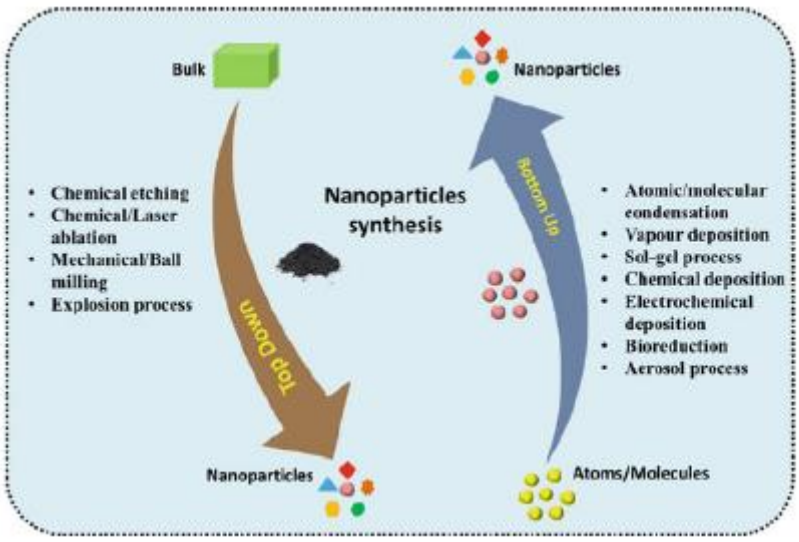


Figure I.4: Approches de synthèse nanostructurée [13].

I.2. Techniques de dépôt des couches minces nanostructurées

L'essor des techniques de dépôt des couches minces a été initialement motivé par les besoins de la microélectronique, avant de s'étendre rapidement à des domaines aussi variés que l'optique, les capteurs et les circuits imprimés. Outre leurs performances, ces techniques présentent l'avantage de réduire l'encombrement et la consommation de matériaux, souvent onéreux [4].

Les méthodes de dépôt des couches minces se répartissent en deux grandes catégories [4] :

- Les méthodes physiques.
- Les méthodes chimiques.

La classification détaillée de ces méthodes est illustrée dans la figure ci-dessous.

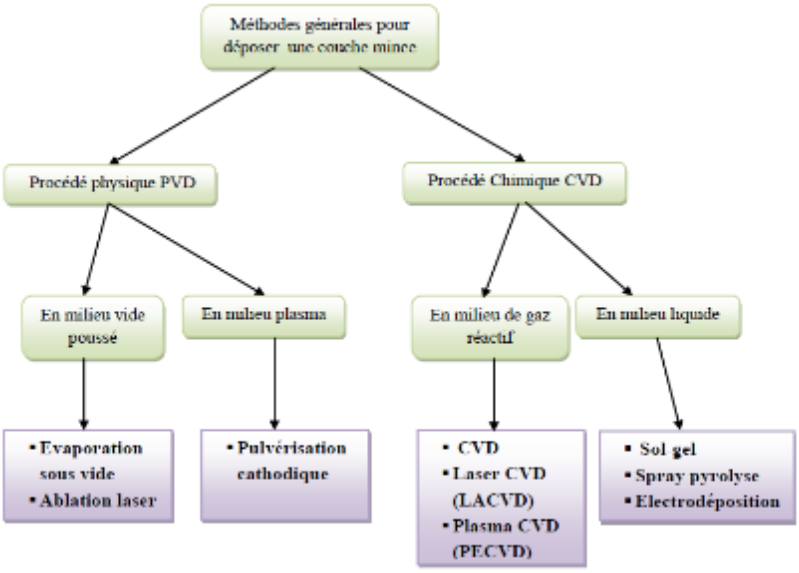


Figure I.5: Techniques de dépôt des couches minces [14].

- Les méthodes chimiques se distinguent par leur simplicité et leur faible coût, permettant néanmoins l'obtention de films de bonne qualité. Les méthodes physiques, quant à elles, offrent une meilleure fiabilité et reproductibilité, au prix d'un investissement plus élevé. Le choix entre ces deux approches dépend donc des exigences expérimentales et des moyens disponibles. Dans ce chapitre, une attention particulière est accordée à la technique Sol-Gel, notamment le **Spin-Coating**, ainsi qu'à d'autres techniques de dépôt en milieu liquide.

I.2.1. Les méthodes physiques PVD (Physical Vapor Deposition)

Les procédés de dépôt physique en phase vapeur (PVD – Physical Vapor Deposition) permettent l'élaboration de couches minces d'épaisseur nanométrique, éventuellement par croissance épitaxiale. Les techniques relevant de cette catégorie se distinguent selon trois critères principaux [6] :

- Le mode de génération de la vapeur.
- L'état électrique du substrat.
- La nature du gaz constituant le milieu.

Parmi les différentes techniques PVD, l'évaporation et la pulvérisation constituent les deux méthodes les plus couramment utilisées [6].

I.2.1.1. En milieu vide poussé

I.2.1.1.1. Évaporation sous vide

L'évaporation sous vide consiste à transformer le matériau source en phase gazeuse par sublimation ou évaporation, généralement induite par bombardement électronique. Les espèces vaporisées se condensent ensuite sur le substrat pour former un film mince homogène et de grande pureté. Cette technique se distingue par ses vitesses de dépôt élevées [15].

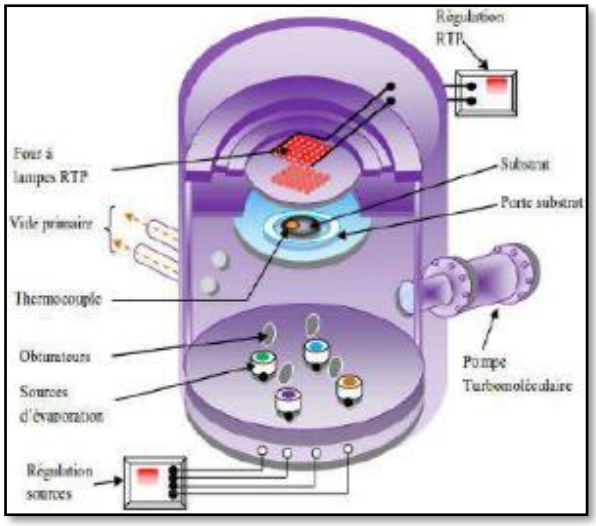


Figure I.6: Schéma du système du dépôt des couches minces par évaporation sous vide [15].

I.2.1.1.2. Ablation laser

Le dépôt par ablation laser pulsée (PLD – Pulsed Laser Deposition) repose sur la focalisation d'un faisceau laser pulsé sur une cible placée sous vide, provoquant l'éjection de matière sous forme de panache qui se condense sur le substrat. La qualité du film élaboré est conditionnée par plusieurs paramètres, tels que l'énergie du laser, la pression du gaz résiduel, la température du substrat et le contrôle du transport des espèces éjectées [16].

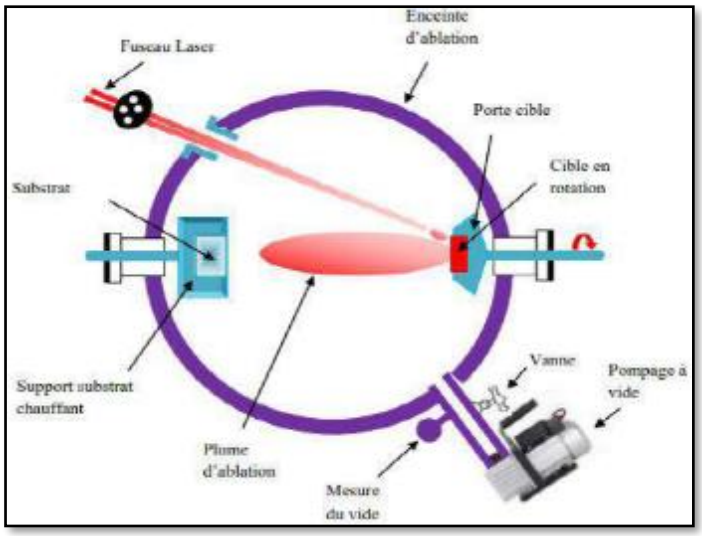


Figure I.7: Principe de l'ablation laser [15].

I.2.1.2. En milieu plasma

I.2.1.2.1. Pulvérisation cathodique

La pulvérisation cathodique repose sur l'ionisation d'un gaz rare, généralement l'argon, par décharge électrique dans une enceinte à basse pression. Les ions ainsi générés sont accélérés vers la cible, provoquant l'éjection d'atomes qui se condensent ensuite sur le substrat. L'introduction d'un gaz réactif permet d'obtenir des couches de composition souhaitée, présentant une faible résistivité et une bonne stœchiométrie. Néanmoins, le coût élevé du procédé et son faible rendement de production en limitent l'usage à des applications spécifiques [17].

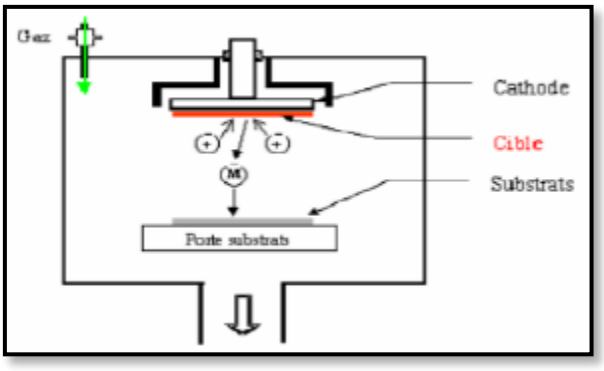


Figure I.8: Schéma conventionnel d'un pulvérisateur cathodique [18].

I.2.2. Les méthodes chimiques (CVD)

I.2.2.1. En milieu de gaz réactif

I.2.2.1.1. CVD (Chemical Vapor Deposition)

Le dépôt chimique en phase vapeur (CVD) est un procédé reposant sur la décomposition ou la réaction de précurseurs gazeux au contact d'un substrat chauffé, conduisant à la formation d'un film solide uniforme. Le dispositif expérimental comprend trois composantes fondamentales : un système d'introduction des précurseurs, un réacteur thermique et une unité de traitement des gaz résiduels. Selon les conditions opératoires, on distingue deux configurations de réacteurs : le réacteur à paroi chaude, opérant sous basse pression (LPCVD), et le réacteur à paroi froide, fonctionnant à pression atmosphérique, dans lequel le dépôt est strictement localisé à la surface du substrat [2].

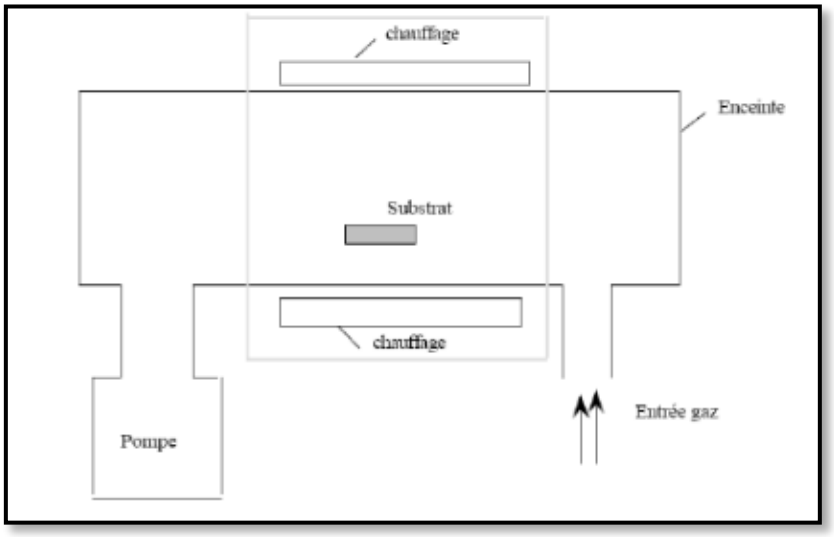


Figure I.9: Schéma de principe du dépôt CVD – réacteur à parois chaudes [2].

I.2.2.1.2. Laser CVD (LACVD)

Le LACVD utilise un faisceau laser pour irradier le substrat ou la phase gazeuse, décomposant les précurseurs par activation thermique locale ou excitation photochimique. Cette technique permet des dépôts hautement localisés à l'échelle micrométrique, ce qui la rend particulièrement adaptée à la microélectronique, bien que son coût élevé restreigne son usage industriel [15].

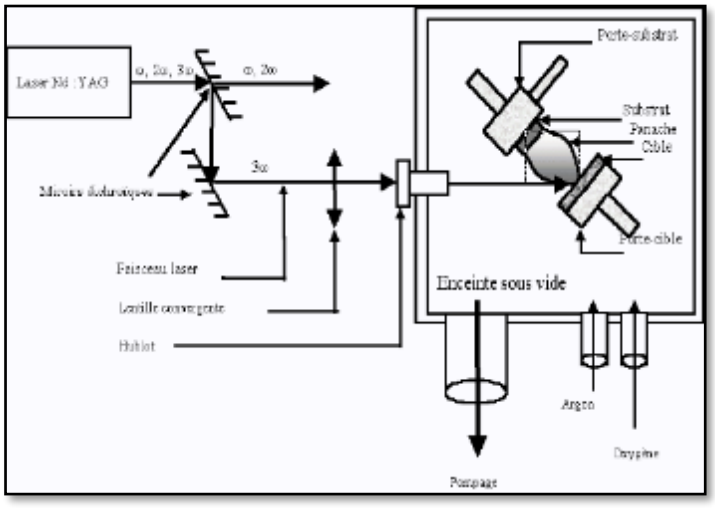


Figure I.10: Schéma de principe de la radiation Laser [19].

I.2.2.1.3. Plasma CVD (PECVD)

Le PECVD repose sur une décharge électrique qui dissocie les précurseurs gazeux en radicaux libres réactifs, lesquels se déposent sur le substrat pour former des films minces homogènes, avec une compétition permanente entre dépôt et gravure. À pressions élevées, des particules en suspension génèrent le phénomène des plasmas poudreux [21]. Ses atouts en termes de contrôle chimique, de qualité et de reproductibilité ont élargi ses applications à l'optique, l'aéronautique et le biomédical [20].

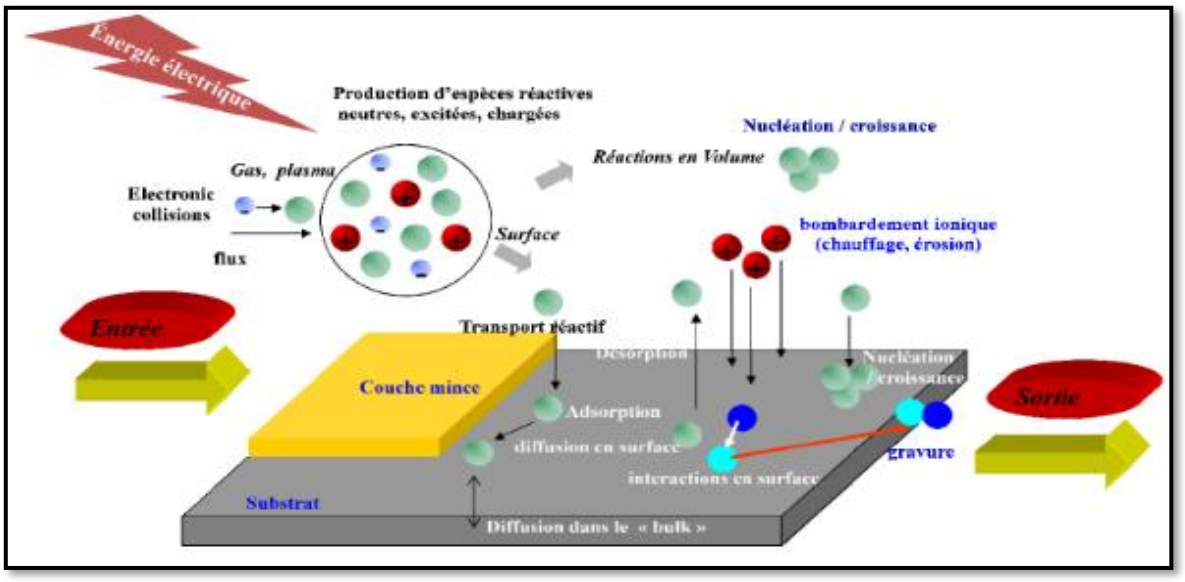


Figure I.11: Étapes clés d'un procédé de PECVD [21].

I.2.2.2. En milieu liquide

I.2.2.2.1. Spray Pyrolysis

La pyrolyse par spray est une technique économique et polyvalente, permettant d'élaborer des films de compositions chimiques variées sans contraintes sur la qualité des substrats ou des précurseurs. Elle repose sur la conversion d'une solution de précurseurs en fin aérosol dirigé vers un substrat chauffé, où les gouttelettes se décomposent thermiquement pour former le film souhaité. Cette technique trouve ses applications dans l'industrie du verre et la fabrication de cellules solaires [22]

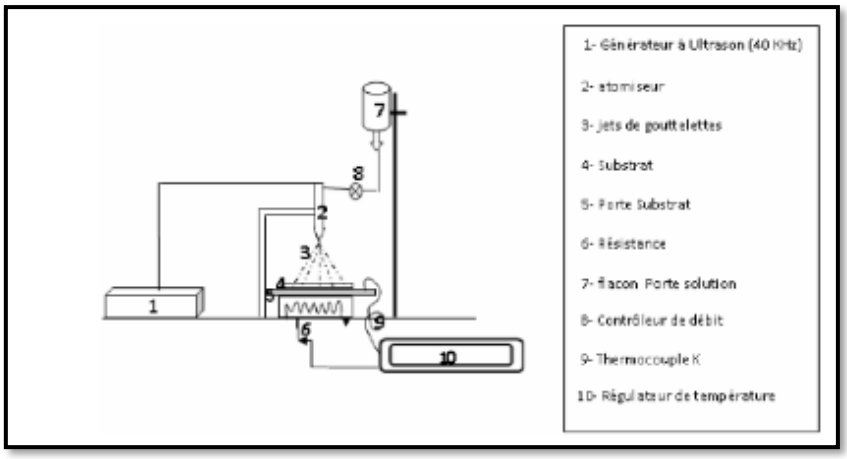


Figure I.12: Schéma de la technique de pulvérisation spray [22].

I.2.2.2.2. Électrodéposition

L'électrodéposition repose sur la réduction électrochimique d'ions métalliques dissous dans un électrolyte sous l'action d'un courant électrique, provoquant leur dépôt sous forme de couche solide à la surface du substrat. Elle permet d'élaborer des films minces d'épaisseur nanométrique dont les propriétés sont modulables par le contrôle des paramètres opératoires [6].

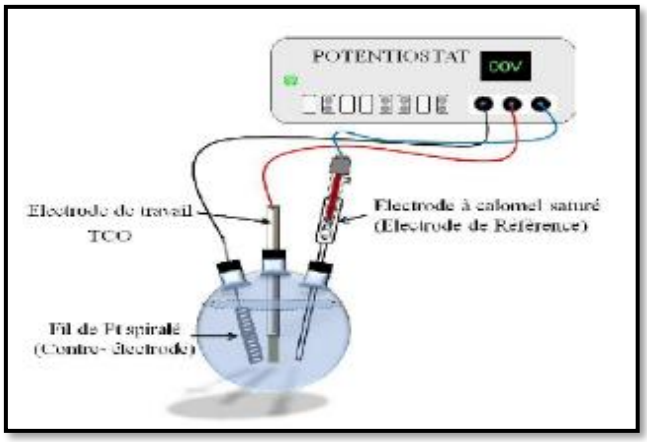


Figure I.13: Schéma du système utilisé pour l'électrodéposition [22].

I.2.2.2.3. Technique sol-gel

Le terme « sol-gel » fait référence au processus « solution-gélification ». Le sol se définit comme une suspension colloïdale stable de fines particules dans un solvant, tandis que le gel représente un système biphasique au sein duquel un réseau solide interconnecté emprisonne la phase liquide [1].

Cette technique permet de transformer des précurseurs moléculaires liquides en matériaux solides (le plus souvent des oxydes métalliques) à travers des réactions de polymérisation inorganique basées sur l'hydrolyse et la condensation. L'intérêt appliqué de cette méthode réside dans sa capacité à façonner des matériaux aux structures diverses (tels que les aérogels, les verres monolithiques, les nanoparticules et les couches minces) sous des températures relativement basses [1].

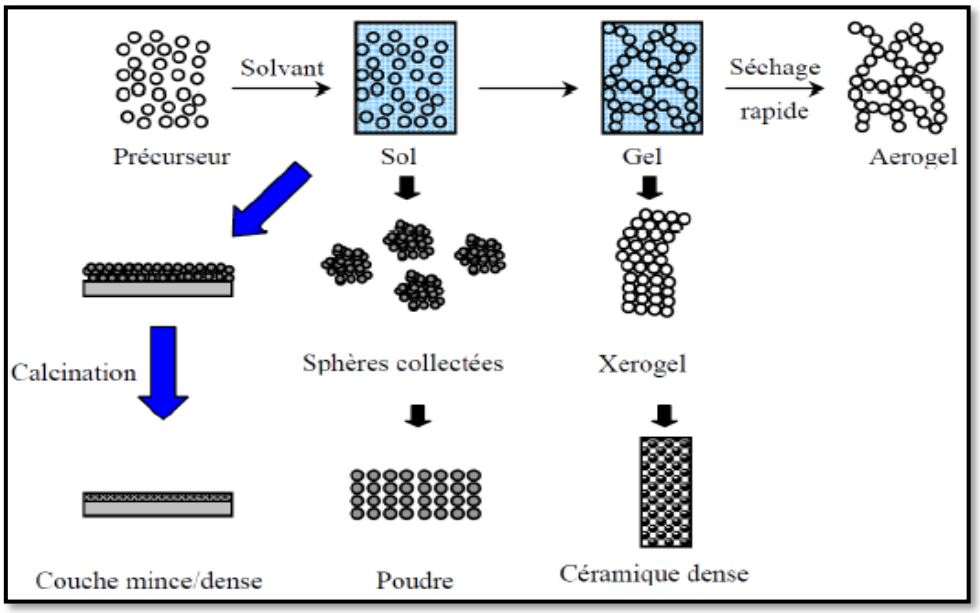


Figure I.14: Schéma représentant les étapes du procédé sol-gel [23].

De manière synoptique, le procédé sol-gel se résume en quatre étapes clés [22] :

1. **Formulation physico-chimique :** Préparation de la solution de dépôt, gouvernée par les paramètres chimiques.
2. **Dépôt du film :** Formation de la couche de gel, dictée par les interactions physico-chimiques.
3. **Séchage :** Évaporation thermique des solvants pour convertir le gel en un xérogel amorphe.
4. **Densification (traitement thermique) :** Traitement thermique final induisant la cristallisation et la fixation des propriétés définitives du matériau.

Le dépôt par centrifugation (Spin-Coating) et le dépôt par trempage-retrait (dip-coating) constituent les principales méthodes par voie liquide permettant un contrôle rigoureux de l'épaisseur des couches minces [23].

- **Le Spin-Coating :** Le sol-gel est dispensé sur un substrat en rotation rapide ; l'excédent de liquide est éjecté sous l'effet de la force centrifuge, et l'épaisseur finale du film dépend alors de la vitesse et de la durée de rotation [24].
- **Le Dip-Coating** : Le substrat est immergé dans la solution de départ puis retiré à vitesse constante. Le film ainsi entraîné subit ensuite un séchage et un traitement thermique afin d'obtenir une couche mince d'épaisseur homogène [24].

A. Dip-Coating

A.1. Technique de revêtement par trempage-retrait « Dip-Coating »

Le Dip-Coating est un procédé simple et économique permettant de déposer, à température ambiante, des couches minces homogènes (conductrices, isolantes ou semi-conductrices) aux diverses morphologies nanométriques. Cette technique offre une grande flexibilité pour revêtir des substrats variés, de grande surface ou de géométrie complexe, avant une étape de séchage thermique pour consolider le film [13].

Cependant, le contrôle de l'épaisseur et de la structure du film dépend de variables physico-chimiques complexes, notamment les paramètres opératoires (vitesse de retrait, nombre de cycles), les propriétés rhéologiques de la solution (viscosité, tension superficielle) et les conditions d'évaporation. De plus, l'affinité de surface du substrat (caractère hydrophile ou hydrophobe) régit les mécanismes d'adsorption, nécessitant parfois un prétraitement (activation ou création de centres de nucléation) pour garantir l'adhésion du dépôt [13].

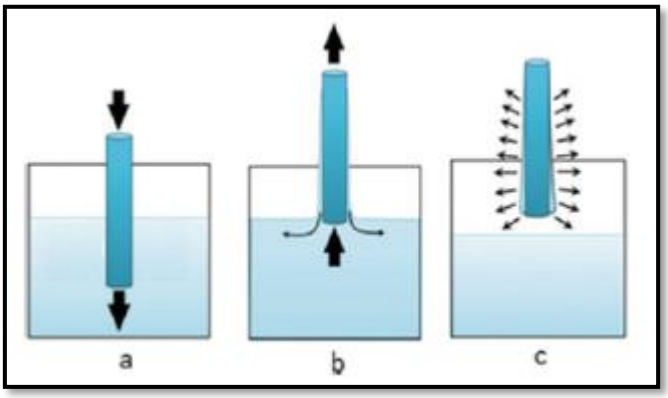


Figure I.15: Dépôt de couches minces par trempage-tirage (Dip-Coating) [13].

La structure, la morphologie ainsi que l'épaisseur de la couche mince synthétisée par cette technique dépendent de manière critique de plusieurs paramètres interconnectés, notamment [25] :

- La nature intrinsèque des précurseurs et du solvant mis en œuvre, et par conséquent les propriétés physico-chimiques de la solution préparée.
- La viscosité et le comportement rhéologique de ladite solution.
- La vitesse cinétique de retrait du substrat hors du bain de dépôt.

- La température imposée ainsi que la durée du cycle de séchage thermique, entre autres facteurs.

A.2. Avantages et inconvénients de la méthode Dip-Coating

Cette technique présente à la fois des avantages et des limites [25] :

Avantages :

- Faible coût d'investissement.
- Coût de production réduit.
- Possibilité d'obtenir différentes épaisseurs de couches.
- Bonne homogénéité des couches minces ;
- Dépôt sur les deux faces du substrat, ce qui peut être avantageux pour certaines applications.
- Aptitude au dépôt sur de grandes surfaces.

Limites :

- Procédé relativement lent.
- Difficulté de contrôle précis de l'épaisseur des couches déposées.

B. Spin-Coating

B.1 Technique de revêtement par centrifugation « Spin-Coating »

Développée dans les années 1920, la technique de dépôt par centrifugation, communément appelée Spin-Coating, est devenue l'une des méthodes les plus prometteuses en génie des matériaux. Elle est aujourd'hui largement exploitée, tant dans la recherche scientifique que dans l'industrie, en raison de sa simplicité, de son faible coût et de sa grande efficacité pour l'obtention de couches minces hautement homogènes [26].

Le principe fondamental de ce procédé repose sur l'étalement centrifuge d'une solution liquide sur un substrat en rotation rapide. Cette méthode permet ainsi le dépôt contrôlé d'une grande variété de matériaux, tels que les polymères, les semi-conducteurs, les oxydes ou encore les nanoparticules [26].

B.2. Les étapes clés du Spin-Coating

La dynamique du procédé de Spin-Coating peut être décrite en le subdivisant en quatre étapes principales, à savoir : le dépôt de la solution, l'accélération (spin-up), l'étalement avec éjection (spin-off) et l'évaporation du solvant, comme illustré sur la figure I.16. Les trois premières étapes se déroulent généralement de manière successive, tandis que l'évaporation du solvant intervient tout au long du processus de dépôt. Il convient de souligner que les étapes d'étalement (contrôlée par l'écoulement visqueux) et d'évaporation (contrôlée par la volatilité du solvant) jouent un rôle déterminant dans la définition de l'épaisseur finale du film :

1. Dépôt (Deposition)

Au cours de cette étape, le substrat est fixé sur le dispositif de Spin-Coating, puis une solution contenant le matériau à déposer est appliquée sur sa surface, comme illustré sur la figure I.16.a. Le dépôt peut être réalisé soit en condition statique, lorsque le substrat est immobile, soit en condition dynamique, lorsque celui-ci est mis en rotation à faible vitesse [27].

Dans le cas du dépôt statique, une quantité déterminée de solution est déposée sous forme de gouttes, en fonction de la surface du substrat et de la viscosité du fluide. En revanche, lors du dépôt dynamique, la solution est appliquée pendant la rotation du substrat à faible vitesse (de l'ordre de 500 tr/min), ce qui permet d'améliorer l'uniformité du revêtement tout en réduisant les pertes de matériau. Sous l'effet de la force centrifuge, la solution s'étale progressivement sur le substrat, avec une diminution continue de son épaisseur jusqu'à atteindre une valeur critique [27].

2. Accélération (Spin-up)

Cette étape débute immédiatement après le dépôt de la solution. Le substrat est alors accéléré jusqu'à atteindre la vitesse de rotation souhaitée. Durant cette phase, les forces centrifuges croissantes induisent un écoulement radial du fluide vers les bords du substrat, comme illustré sur la figure I.16.b. Ce phénomène entraîne l'éjection d'une partie du fluide excédentaire et contribue à la réduction de l'épaisseur de la couche. Les paramètres tels que la vitesse de rotation, le taux d'accélération et la durée de rotation influencent fortement les caractéristiques finales du film [27].

3. Étalement (Spin-off)

Lorsque la vitesse de rotation devient constante, le procédé entre dans une phase d'étalement contrôlée principalement par les forces visqueuses, correspondant à un régime d'écoulement stable. Au cours de cette étape, la solution se répartit de manière homogène sur la surface du substrat, tandis que l'excès de fluide est évacué vers les bords sous l'effet de la rotation, comme illustré sur la figure I.16.c. Des effets de bord peuvent apparaître, se traduisant par la formation de petites gouttelettes au niveau des extrémités du substrat. L'épaisseur finale du film dépend alors de plusieurs paramètres, notamment la viscosité du fluide, la tension de surface et la vitesse de rotation. Une légère non-uniformité peut être observée au niveau des bords [27].

4. Évaporation du solvant (Evaporation)

L'évaporation du solvant constitue l'étape finale du processus de formation du film, bien qu'elle intervienne tout au long du dépôt. Son influence devient toutefois prédominante dans les phases finales. Dans cette étape, le substrat continue de tourner à vitesse constante, tandis que l'amincissement du film est principalement gouverné par l'évaporation du solvant, comme illustré sur la figure I.16.d. La diminution progressive de la quantité de solvant entraîne une augmentation de la concentration et de la viscosité de la solution, ce qui conduit à la solidification de la couche déposée. Il est donc essentiel de maîtriser les conditions d'évaporation, notamment la température et la durée du procédé, afin d'assurer l'obtention de films homogènes et présentant des propriétés optimales [27].

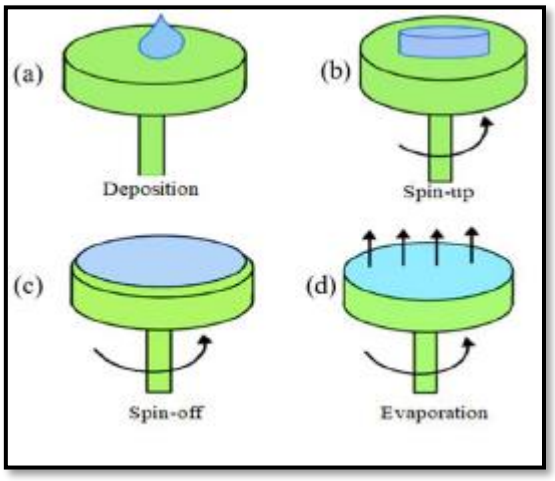


Figure I.16: Les quatre étapes du procédé de spin-coating [27].

- La vitesse de rotation du substrat détermine la force centrifuge appliquée au fluide ainsi que la turbulence de l'air au-dessus de celui-ci. Elle contrôle principalement l'épaisseur finale de la couche, et de petites variations de ±50 rpm peuvent entraîner jusqu'à 10 % de différence [26].

B.3 Modélisation et lois physiques

La description du comportement du fluide dans le procédé de spin-coating repose sur une modélisation physique fondée sur les principes de la mécanique des fluides. L'analyse de l'écoulement dans une couche mince soumise à la rotation met en évidence l'existence d'un équilibre entre deux forces principales : les forces visqueuses, liées à la résistance interne du fluide à la déformation, et les forces centrifuges générées par la rotation du substrat.

Dans ce cadre, la modélisation repose sur certaines hypothèses simplificatrices, notamment que le fluide est newtonien et incompressible, que l'écoulement est laminaire, que l'épaisseur du film est faible devant le rayon du substrat, et que les effets de la gravité ainsi que de l'évaporation sont négligeables dans la phase initiale du processus.

Cet équilibre peut être exprimé par l'équation suivante, reliant le gradient de la vitesse dans la direction verticale z à la force centrifuge [28] :

$$-\eta \frac{d^2 v}{dz^2} = \rho r \omega^2$$

Où :

- **η** représente la viscosité dynamique du fluide **(Pa·s),** caractérisant la résistance du fluide à l'écoulement,
- **v** désigne la vitesse radiale du fluide **(m/s),**
- **z** est la coordonnée verticale perpendiculaire au substrat **(m),**
- **ρ** correspond à la masse volumique du fluide **(kg/m³),**
- **r** est la distance radiale par rapport au centre de rotation **(m),**

- **ω** représente la vitesse angulaire de rotation **(rad/s).**

Le terme $\frac{d^2v}{dz^2}$ correspond au gradient de la vitesse selon la direction verticale, traduisant la variation du profil de vitesse à l'intérieur de la couche fluide. Cette relation montre que la distribution de la vitesse dans le film résulte directement de la compétition entre les effets visqueux et la force centrifuge.

Après détermination du profil de vitesse, l'évolution de l'épaisseur du film au cours du temps est étudiée à l'aide du principe de conservation de la masse, décrit par l'équation de continuité suivante [28] :

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{1}{r}\frac{\partial (rq)}{\partial r}$$

Où :

- h désigne l'épaisseur du film (**m**, généralement exprimée en **nm** en pratique),
- t représente le temps **(s),**
- r est la distance radiale par rapport au centre de rotation **(m),**
- q correspond au débit volumique par unité de longueur **(m^2/s).**

Cette équation traduit le fait que la variation de l'épaisseur du film est directement liée au déplacement radial du fluide sur la surface du substrat sous l'effet de la rotation.

En résolvant ces équations en tenant compte des propriétés du fluide et des conditions de rotation, on obtient la relation finale décrivant l'amincissement du film durant le procédé. Il apparaît que l'épaisseur est inversement proportionnelle à la vitesse de rotation selon la loi suivante [28] :

$$h \propto \omega^{-2/3}$$

Cette relation indique que l'augmentation de la vitesse de rotation entraîne une diminution de l'épaisseur du film, en raison de l'intensification de la force centrifuge qui favorise l'étalement du fluide vers les bords, tandis que les effets visqueux tendent à limiter cet écoulement et à stabiliser la couche formée.

B.4. Traitement thermique des couches déposées

Après le dépôt, les couches subissent un traitement thermique indispensable, qui remplit deux fonctions principales [29] :

- ✓ **Première phase :** séchage à très basse température, visant à éliminer le solvant résiduel.
- ✓ **Deuxième phase :** recuit à température plus élevée, destiné à renforcer et stabiliser le réseau d'oxyde de la couche déposée.

B.5. Contrôle de l'épaisseur de la couche mince

L'épaisseur d'une couche mince déposée est influencée par plusieurs facteurs [29] :

- ✓ **Facteurs liés au spinner :** l'augmentation de la vitesse angulaire, de l'accélération ou de la durée de l'opération entraîne une diminution de l'épaisseur de la couche déposée.
- ✓ **Facteurs liés au composé déposé :**
    - Quantité de solution déposée (en général une ou quelques gouttes)
    - Concentration des espèces dans le ou les solvants
    - Masse molaire des composés
    - Viscosité de la solution
    - Volatilité des solvants

Tous ces paramètres doivent être optimisés afin d'obtenir une épaisseur de couche contrôlée et uniforme.

B.6. Avantages et inconvénients de la méthode spin-coating

La méthode spin-coating permet d'obtenir des films homogènes sur différents types de substrats plats tels que le verre ou le silicium. Pour un dépôt réussi, il est nécessaire que le substrat soit fixé sur un plateau rotatif, que la solution soit déposée rapidement pour éviter les bulles d'air, qu'elle recouvre toute la surface et que le matériau soit entièrement dilué ou filtré si nécessaire [29] :

Avantages :

- Faible coût des équipements.
- Mise en œuvre facile, films homogènes avec épaisseur contrôlée.
- Température de traitement peu élevée.

Inconvénients :

- Le matériau doit être soluble.
- Réalisation de structures multicouches difficile.
- Problèmes de stockage (dégradation ou altération).

I.3. Techniques de caractérisation des couches minces nanostructurées

I.3.1. Diffraction des Rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X (DRX) est une méthode d'analyse non destructive essentielle pour étudier la structure cristalline. Elle repose sur l'irradiation de l'échantillon par un faisceau X monochromatique, où un détecteur enregistre l'intensité diffractée en fonction de l'angle de balayage 2θ [30]. Cette technique permet de déterminer les paramètres de maille, de calculer la taille moyenne des cristallites et d'évaluer les contraintes internes des couches déposées [5].

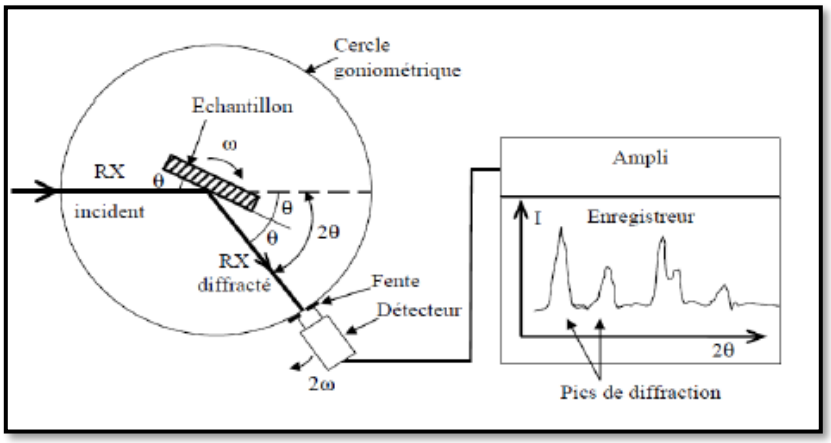


Figure I.17: Schéma d'un diffractomètre de rayons X [30].

Le phénomène a lieu lorsque les rayons subissent une interférence constructive sur les plans atomiques parallèles ; un pic est alors enregistré dès que la loi de Bragg est satisfaite [30] :

$$\boldsymbol{n\,\lambda = 2d_{hkl}\,sin\theta}$$

Où :

$\boldsymbol{\lambda}$: la longueur d'onde du faisceau de rayon X incident **(Å),**

$\boldsymbol{n}$: l'ordre de diffraction (nombre entier),

$\boldsymbol{d_{hkl}}$: la distance inter-réticulaire du réseau cristallin **(Å),**

$\boldsymbol{\theta}$: angle de Bragg **(°),** correspondant à l'angle d'incidence des rayons X.

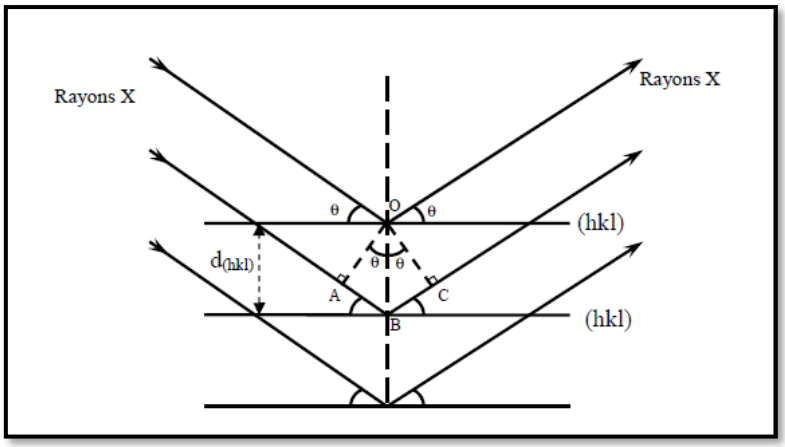


Figure I.18: Schéma représentant le principe de la diffraction des rayons X par les plans atomiques [30].

I.3.2. Microscope électronique à balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage (MEB) repose sur la détection des électrons secondaires émis suite à l'interaction d'un faisceau électronique focalisé avec l'échantillon. Cette technique permet d'obtenir des images à grande profondeur de champ, offrant ainsi la possibilité de caractériser la topologie et la morphologie de surface des échantillons étudiés (forme et taille des grains) [30].

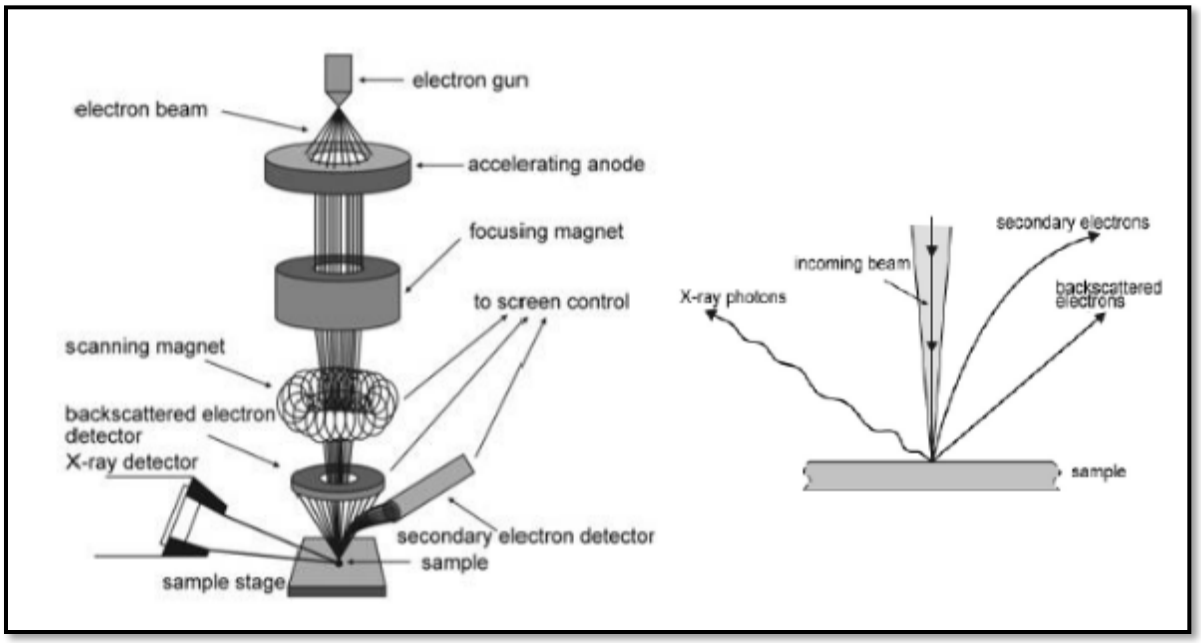


Figure I.19: Schéma d'un microscope électronique à balayage typique (MEB) [30] ; et schéma descriptif des types d'électrons mis en jeu lors d'irradiation [30].

Principe de fonctionnement et signaux exploités :

Lors de l'impact du faisceau électronique avec l'échantillon, plusieurs types de signaux sont générés et captés par des détecteurs spécifiques [31] :

- **Les électrons secondaires (SE)** : produits par des chocs inélastiques, ils fournissent des informations détaillées sur la topographie de la surface.
- **Les électrons rétrodiffusés (BSE) :** leur intensité est sensible au numéro atomique des éléments présents, ce qui permet de générer des images contrastées selon la composition chimique.
- **Les rayons X :** ils sont produits lors de la désexcitation des atomes, permettant ainsi de déterminer la composition chimique élémentaire de l'échantillon.

I.3.3. Microscopie à Force Atomique (AFM)

L'AFM repose sur la mesure des forces d'interaction (attraction et répulsion) entre une pointe nanométrique et la surface de l'échantillon, avec une précision de l'ordre du nanonewton. Son rôle principal est de caractériser la topographie de surface avec une très haute résolution, agissant comme un profilomètre de haute précision [32].

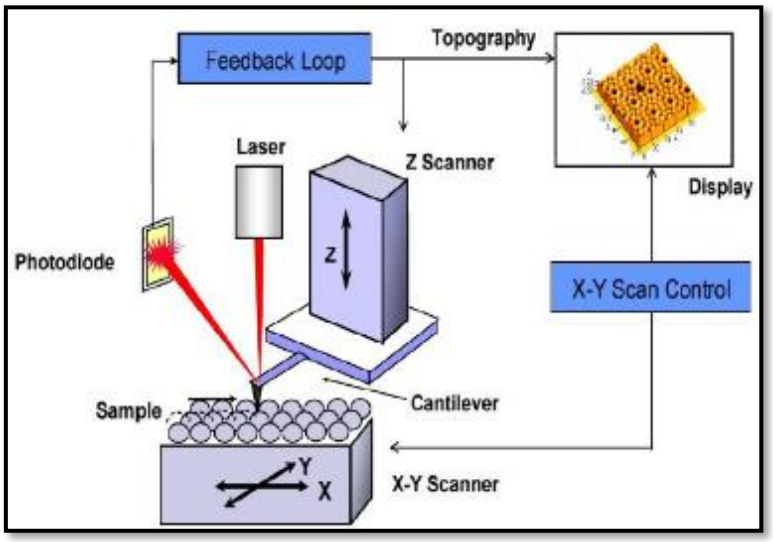


Figure I.20: Schéma descriptif AFM [32].

Modes de fonctionnement principaux [32] :

- **Mode contact :** La pointe est en contact direct avec la surface, provoquant une déflexion du micro-levier par répulsion électronique.
- **Mode contact intermittent (Tapping)** : Le micro-levier vibre à haute fréquence ; c'est le mode le plus couramment utilisé pour protéger la pointe et l'échantillon.
- **Mode non-contact :** La pointe n'entre pas en contact avec la surface et exploite uniquement les forces de Van der Waals.

I.3.4. Spectrophotométrie UV-Visible-NIR

La spectrophotométrie UV-Visible-NIR est une technique essentielle pour l'analyse des propriétés optiques des couches minces. Elle repose sur l'irradiation de l'échantillon par un faisceau lumineux monochromatique afin de mesurer l'intensité du rayonnement transmis ou réfléchi [33].

Cette méthode permet de déterminer avec précision des paramètres fondamentaux tels que l'épaisseur, le gap optique et l'indice de réfraction. Elle couvre un large domaine spectral allant de l'ultraviolet jusqu'au proche infrarouge. Pour ce travail, les mesures ont été réalisées à l'aide d'un spectrophotomètre Lambda 950 de Perkin Elmer [33].

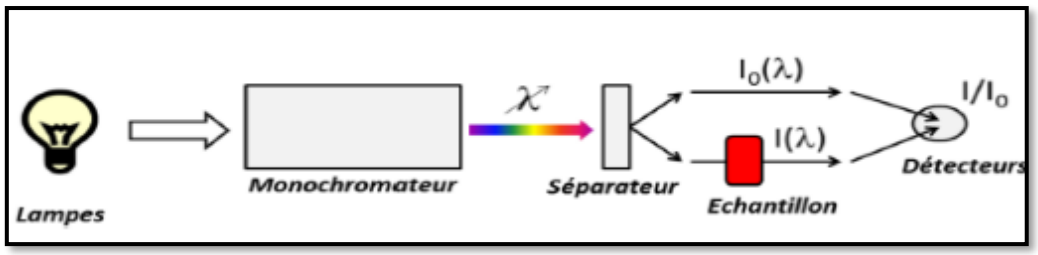


Figure I.21: Principe de fonctionnement de la spectroscopie UV-visible-NIR [33].

I.3.5. Mesures électriques par quatre pointes

La méthode des quatre pointes est une technique essentielle pour évaluer la réponse électrique d'un échantillon. Elle consiste à injecter un courant I via deux électrodes extérieures et à mesurer la différence de potentiel V entre deux électrodes intérieures. Cette configuration permet d'éliminer l'influence de la résistance des contacts, assurant ainsi une mesure précise de la résistivité propre ρ du matériau [30].

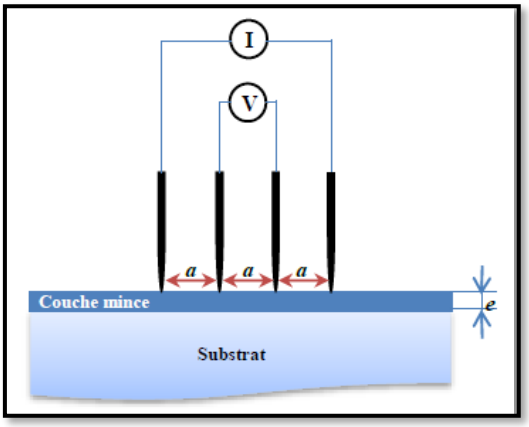


Figure I.22: Schéma d'un dispositif quatre pointes alignées [30].

La relation entre la tension **U (V)** et le courant **I (A)** s'écrit :

$$\frac{U}{I} = \frac{\rho}{K\,e}$$

- **ρ :** est la résistivité de la couche mince **(Ω·m),**
- **e :** est l'épaisseur de la couche **(m),**
- **K :** est une constante géométrique sans unité (adimensionnelle), égale à K=4,532 pour les quatre pointes alignées.

On en déduit la résistivité :

$$\rho = K\,\frac{U}{I}e$$

Ou encore, en introduisant la résistance **R=** $\frac{U}{I}$ **(Ω)** :

$$\rho = K\,R\,e$$

I.4. Applications des couches minces

Au fil des dernières décennies, l'ingénierie des couches minces s'est imposée comme un pilier technologique majeur, trouvant des applications cruciales et diversifiées dans de multiples secteurs industriels et scientifiques [14] :

- **Microélectronique et Optoélectronique :** Elles constituent la base de la miniaturisation des composants, notamment pour l'isolation et la conduction dans les transistors, les jonctions PN, les diodes lasers, les LED, les dispositifs piézoélectriques et les supraconducteurs.
- **Optique et Photonique :** Utilisées comme revêtements antireflets pour les cellules photovoltaïques et les objectifs, elles optimisent également les performances des guides d'ondes, des photodétecteurs, de la nanophotonique et des écrans plats.
- **Ingénierie des Surfaces et Mécanique (Tribologie) :** Elles servent de revêtements protecteurs pour minimiser le frottement, accroître la résistance à l'usure, à l'érosion et à l'abrasion, tout en agissant comme barrières de diffusion efficaces au sein des microsystèmes.
- **Applications Chimiques et Thermiques :** Elles assurent une protection rigoureuse contre la corrosion, servent de catalyseurs ou de capteurs de gaz, et font office de barrières thermiques (TBC) de pointe pour isoler les composants soumis à de hautes températures (turbines).
- **Biomédical et Biotechnologies :** Elles interviennent activement dans l'élaboration de surfaces biocompatibles, de biocapteurs et de puces à ADN (biopuces).
- **Magnétisme, Microfluidique et Décoration :** Elles sont indispensables pour le stockage de données magnétiques haute densité, les systèmes microfluidiques que pour des finitions esthétiques durables (horlogerie, joaillerie).

Conclusion

L'ingénierie des matériaux modernes repose de plus en plus sur la maîtrise des structures à l'échelle nanométrique, et le dépôt de couches minces s'impose comme une technique clé dans ce domaine. Elle permet de fabriquer des films de matériaux aux propriétés soigneusement contrôlées, offrant une adaptabilité exceptionnelle pour répondre aux besoins spécifiques de chaque application. Que ce soit dans l'électronique pour des dispositifs semi-conducteurs performants, dans l'optique pour des revêtements filtrants ou réfléchissants, dans le domaine de l'énergie pour des systèmes photovoltaïques ou de stockage, ou encore en biotechnologie pour des capteurs et interfaces biologiques, le dépôt de couches minces joue un rôle fondamental dans l'innovation technologique. Grâce à la possibilité de moduler avec précision les caractéristiques des matériaux, cette technique ouvre la voie à des performances optimisées et à des conceptions de dispositifs de plus en plus sophistiquées. Ainsi, loin d'être un simple procédé de fabrication, le dépôt de couches minces constitue un véritable levier de progrès scientifique et industriel, et il continuera à occuper une place stratégique dans le développement des technologies futures.

Chapitre II

Étude et analyse des moteurs à courant continu sans balais (BLDC).

Introduction

L'évolution rapide du domaine de l'ingénierie électromécanique a constitué une impulsion majeure vers la recherche de moteurs électriques capables de répondre aux exigences croissantes des systèmes modernes, notamment en termes d'efficacité énergétique, de fiabilité opérationnelle et de réduction des coûts de maintenance. La machine Spin-Coating représente un exemple applicatif particulièrement éloquent de ces exigences, dans la mesure où elle repose fondamentalement sur un contrôle précis de la vitesse de rotation afin de garantir l'uniformité des couches minces déposées sur les substrats. Ce contexte fait du choix du moteur d'entraînement une décision d'ingénierie à haute importance technique.

Dans ce cadre, le moteur à courant continu sans balais (Brushless DC Motor – BLDC) s'impose comme la solution technique la mieux adaptée à l'entraînement de telles machines de précision. En effet, son fonctionnement repose sur une commutation électronique qui s'est substituée au contact mécanique caractéristique des moteurs à balais conventionnels, contribuant ainsi à réduire sensiblement les pertes mécaniques, à prolonger la durée de vie du système et à améliorer son rendement global. De surcroît, les stratégies de commande associées, qu'elles soient à base de capteurs ou sans capteurs, permettent d'atteindre des niveaux de précision et de réponse dynamique inégalés, faisant du moteur BLDC le choix idéal pour le contrôle rigoureux de la vitesse de rotation requise par la machine Spin-Coating.

Sur la base de ces éléments, ce chapitre propose une étude analytique approfondie des moteurs BLDC dans le cadre de leur application à l'entraînement de la machine Spin-Coating. Il débute par un aperçu historique de ces moteurs et de leur évolution conceptuelle, avant d'aborder leur définition et l'analyse détaillée de leur structure interne, constituée du stator et du rotor. Une comparaison technique rigoureuse avec les moteurs à balais est ensuite établie, suivie d'une présentation des différents types de moteurs BLDC et de leurs mécanismes de commutation. Le chapitre s'achève par une analyse des caractéristiques de fonctionnement, un examen des avantages et des limites, ainsi qu'une mise en lumière des normes internationales et des domaines d'application, en soulignant l'adéquation de ces moteurs aux exigences de précision et de contrôle imposées par la technique de dépôt par centrifugation

.II.1. Historique des moteurs BLDC

L'essor de l'électricité comme source d'énergie dominante a stimulé le développement de machines électriques variées, couvrant une plage de puissance allant de quelques milliwatts à plusieurs millions de kilowatts, parmi lesquelles figurent les moteurs synchrones, asynchrones, à courant continu et à réluctance variable [34].

Les fondements théoriques de ces machines remontent à 1831, année où Faraday découvrit le phénomène d'induction électromagnétique, ouvrant ainsi la voie à la conversion électromécanique de l'énergie. Cette avancée aboutit, dès les années 1840, à la mise au point du premier moteur à courant continu. En 1915, Langmuir franchit une nouvelle étape en développant le redresseur à vapeur de mercure et en contribuant à la conception de convertisseurs DC/AC, élargissant considérablement les possibilités de commande électrique

[35].
Face aux inconvénients inhérents à la commutation mécanique, notamment l'usure des balais, des recherches sur les moteurs sans balais émergèrent dès les années 1930. Leurs performances limitées les cantonnèrent toutefois aux laboratoires jusqu'en 1955, date à laquelle Harrison et Rye déposèrent le premier brevet d'un circuit de commutation à thyristors, considéré comme l'acte fondateur du moteur BLDC [35].

L'intégration des capteurs à effet Hall en 1962 marqua un tournant décisif, rendant possible la production industrielle du moteur BLDC à commutation électronique. Dans les années 1970, l'adoption de capteurs magnétiques à sensibilité mille fois supérieure aux technologies antérieures améliora significativement les performances de commande. En 1978, la division Indramat de Mannesmann présenta officiellement le moteur BLDC de type MAC lors du salon de Hanovre, consacrant son entrée dans l'exploitation industrielle [34].

Les décennies suivantes furent marquées par le développement de moteurs à formes d'onde trapézoïdales et sinusoïdales. Les progrès conjugués des matériaux magnétiques, de la microélectronique, de l'électronique de puissance et des systèmes de commande, intervenus à la fin des années 1990, ont élevé le moteur BLDC au rang de dispositif haute performance, désormais incontournable dans de nombreux secteurs industriels et technologiques [34].

II.2. Définition du moteur BLDC

Le moteur à courant continu sans balais (Brushless DC Motor – BLDC) est une machine électrique synchrone alimentée en courant continu [36]. Sa vitesse de rotation est synchronisée avec le champ magnétique tournant généré par le stator [37]. Sur le plan fonctionnel, il s'apparente au moteur à courant continu à collecteur, dont il se distingue toutefois par la nature de son mécanisme de commutation : là où le moteur conventionnel recourt à une commutation mécanique assurée par le collecteur et les balais, le moteur BLDC substitue à ce système un dispositif de commutation entièrement électronique, supprimant ainsi tout contact mécanique entre les parties fixe et mobile. Afin de pallier les inconvénients de la commutation mécanique, la fonction du collecteur est reproduite par des circuits électroniques, avec les adaptations nécessaires pour garantir les performances requises [34].

Sur le plan structural, le rotor est constitué d'aimants permanents générant le flux inducteur, tandis que le stator est formé d'un empilage de tôles magnétiques logeant les enroulements dans des encoches usinées à cet effet. L'alimentation séquentielle de ces enroulements assure le fonctionnement continu du moteur [38].



Figure II.1: Moteur BLDC [39].

II.3. Constitution du moteur à courant continu sans balais (BLDC)

Le moteur BLDC appartient à la catégorie des moteurs synchrones à aimants permanents, qui repose sur la commutation électronique en lieu et place du commutateur mécanique, ce qui le rend pratiquement exempt de toute maintenance. Il se distingue par une architecture inversée par rapport aux moteurs classiques, où le stator abrite les enroulements d'induit tandis que le rotor porte les aimants permanents, tout en conservant des caractéristiques de fonctionnement analogues à celles des moteurs à courant continu traditionnels. La configuration triphasée demeure la plus répandue en raison de son rendement élevé et de sa faible ondulation de couple [40].

Comme illustré à la figure II.2, le rotor est constitué d'aimants permanents à polarités alternées Nord-Sud, tandis que des capteurs à effet Hall sont intégrés dans le stator afin de détecter la position du rotor. La précision de leur implantation revêt une importance capitale, tout désalignement par rapport aux aimants du rotor pouvant induire des erreurs de détection. Pour pallier cette contrainte, certains fabricants optent pour le montage de ces capteurs sur un rotor auxiliaire de dimensions réduites [40].

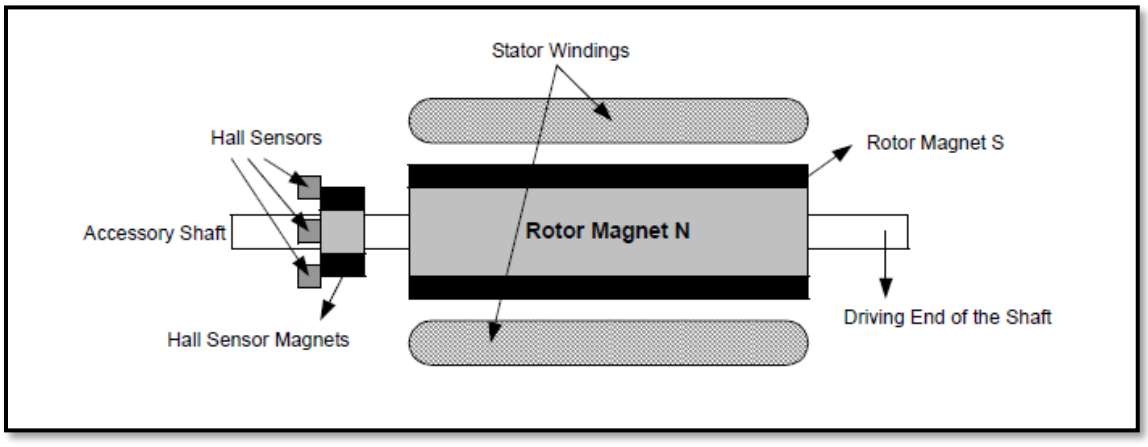


Figure II.2: Section transversale d'un moteur BLDC [38][40].

II.3.1. Le stator

Le stator représente la partie fixe du moteur électrique. Il est constitué de tôles magnétiques empilées, alliées au silicium afin de réduire les pertes fer. Ces tôles sont découpées et pressées

selon une configuration précise de rainures. Pour éviter tout court-circuit et isoler les enroulements du corps du stator, des isolants plastiques ou un revêtement par poudre sont appliqués. Les bobinages sont ensuite finalisés par la connexion des fils, leur vernissage et l'intégration de câbles terminaux munis de connecteurs. La Figure II.3 illustre différents types de stators pour moteurs à courant continu sans balais (BLDC), mettant en évidence la diversité de leurs dimensions, de leurs moules et de leur nombre de fentes [41].

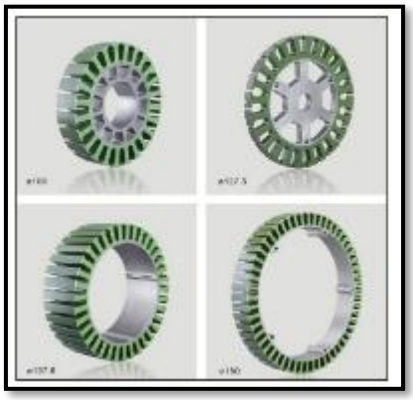


Figure II.3: Stator d'un moteur BLDC [46].

La majorité des moteurs BLDC intègrent trois enroulements statoriques connectés en étoile (Star), répartis de manière à former un nombre pair de pôles [38]. Selon la configuration des bobines et le profil de la force contre-électromotrice (Back EMF) générée, on distingue deux types de bobinages [38] :

- **Moteurs trapézoïdaux :** produisent une Back EMF et un courant de phase de forme trapézoïdale (Figure II.4).
- **Moteurs sinusoïdaux :** génèrent une Back EMF et des courants sinusoïdaux (Figure II.5).

Ce profil assure un couple plus fluide, mais implique une complexité de câblage supérieure et une consommation de cuivre accrue, augmentant ainsi leur coût de fabrication [38]. Le choix de la tension nominale dépend de la source d'alimentation : les basses tensions (>48V) sont privilégiées pour l'automobile et la robotique, tandis que les tensions plus élevées (>100V) sont destinées à l'électroménager et aux applications industrielles [38]

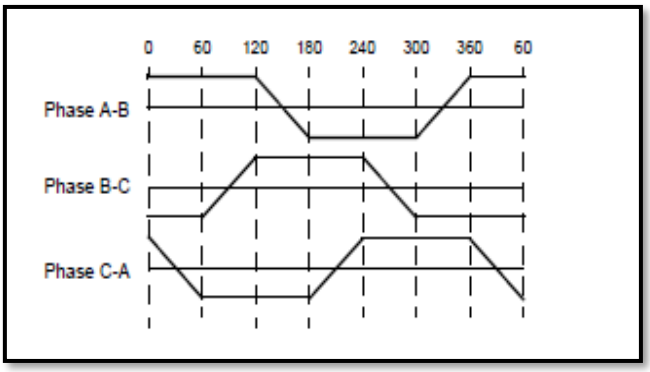


Figure II.4: Force contre-électromotrice (Back EMF) de forme trapézoïdale [38].

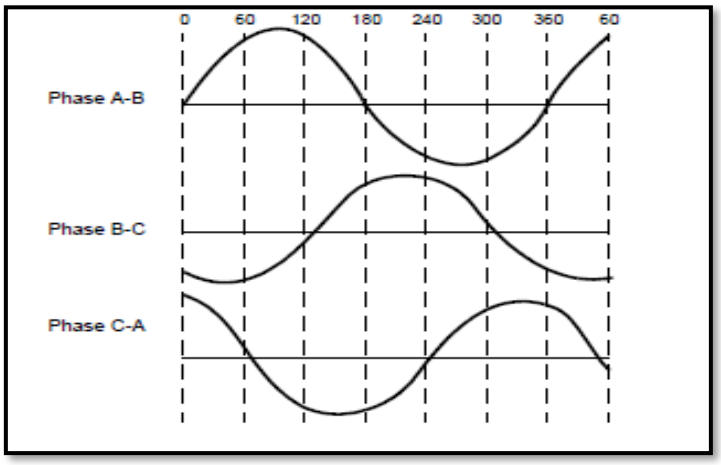


Figure II.5: Force contre-électromotrice (Back EMF) de forme sinusoïdale [38].

II.3.2. Le rotor

Le rotor d'un moteur BLDC comprend deux à huit paires de pôles alternés dont le choix du matériau magnétique conditionne directement la compacité et les performances globales [38]. Si les aimants en ferrite restent une option économique malgré leur faible densité de flux, les alliages de terres rares (Nd, SmCo, NdFeB) se généralisent grâce à leur induction magnétique élevée, permettant de maximiser le rapport couple/masse et de miniaturiser la structure à performances égales [38]. La recherche actuelle s'oriente ainsi vers l'optimisation de cette densité de flux pour accroître la compacité du rotor [38].

Selon la disposition géométrique des aimants permanents par rapport au noyau circulaire du rotor, on distingue trois configurations structurelles majeures en coupe transversale [40] :

- **Aimants montés en surface :** Les éléments magnétiques sont fixés directement sur la périphérie externe du noyau.
- **Aimants encastrés :** Des structures magnétiques rectangulaires sont intégrées à la limite de la surface rotorique.
- **Aimants enterrés (ou internes) :** Les aimants rectangulaires sont insérés profondément au sein de la structure interne du noyau du rotor.

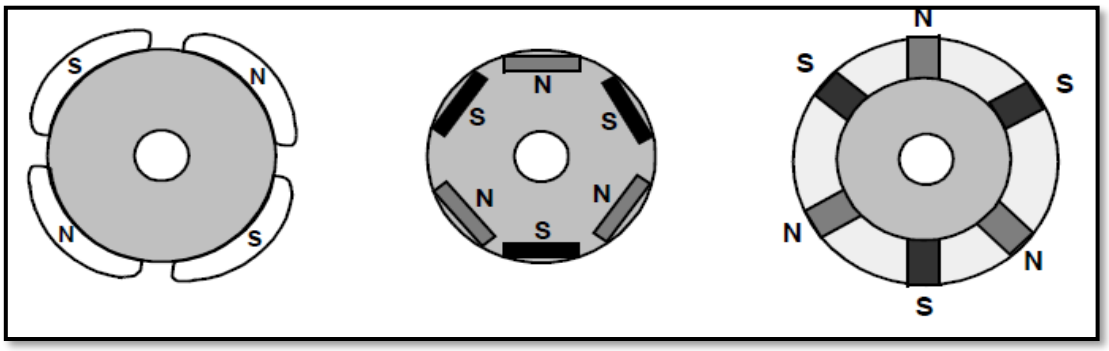


Figure II.6: Les sections transversales de l'aimant du rotor [38][40].

II.4. Comparaison entre les moteurs à balais et les moteurs sans balais

Selon l'application visée, un ingénieur peut privilégier l'utilisation d'un moteur sans balais (brushless) plutôt qu'un moteur à balais. Le choix dépend essentiellement des exigences en termes de performance, de coût et de maintenance. Le tableau II.1 présente une synthèse des principaux avantages et inconvénients de chaque type de moteur.

Tableau II.1 : Moteur DC à balais vs moteur DC sans balais [39].

Critère	Moteur DC à balais	Moteur DC sans balais
Durée de vie	Courte (usure des balais)	Longue (absence de balais)
Vitesse et accélération	Moyenne	Élevée
Rendement	Moyen	Élevée
Bruit électrique	Bruyant (arc des balais)	Silencieux
Bruit acoustique et ondulation du couple	Faible	Moyen (trapézoïdal) ou bon (sinusoïdal)
Coût	Très faible	Moyen (électronique ajoutée)

- **Durée de vie**

L'absence de contacts mécaniques glissants dans les moteurs sans balais les affranchit des phénomènes d'usure qui affectent inévitablement les moteurs conventionnels, où la dégradation progressive des balais en carbone et du commutateur en cuivre constitue une contrainte majeure de maintenance et une cause fréquente de défaillance à long terme [39].

- **Vitesse et accélération**

Les moteurs à balais voient leurs performances en vitesse et en accélération limitées par deux facteurs intrinsèques : d'une part, l'instabilité du contact balais-commutateur aux régimes élevés, qui accentue l'arc électrique et dégrade la commutation ; d'autre part, l'inertie importante du rotor à noyau en fer laminé, qui pénalise les transitoires d'accélération et de décélération. Les moteurs sans balais offrent, quant à eux, la possibilité de réduire significativement cette inertie grâce à l'emploi d'aimants en terres rares, bien que cette solution induise un surcoût non négligeable [39].

- **Bruit électrique**

Les balais et le commutateur, en jouant le rôle d'interrupteurs commutant sous courant inductif élevé, génèrent inévitablement des étincelles aux contacts, produisant ainsi un bruit électrique susceptible de perturber les circuits environnants sensibles. Les solutions palliatives telles que les condensateurs ou les circuits RC snubber permettent d'atténuer partiellement ce phénomène, sans toutefois l'éliminer totalement [39].

- **Bruit acoustique et ondulation du couple**

La commutation dure caractérisant les moteurs à balais provoque des variations brusques du couple au cours de la rotation, engendrant des vibrations mécaniques et un bruit acoustique prononcé, particulièrement aux faibles vitesses. Les moteurs sans balais

permettent, en revanche, un contrôle progressif des courants dans les enroulements, assurant une transition douce et réduisant ainsi significativement l'ondulation de couple [39].

- **Coût**

  Si la complexité des systèmes électroniques associés aux moteurs sans balais induit un coût global d'entraînement plus élevé, cette tendance tend à s'inverser sous l'effet de leur adoption croissante dans des secteurs à grand volume comme l'automobile, conjuguée à la baisse continue du coût des composants électroniques tels que les microcontrôleurs [39].

II.5. Différents types de BLDC

La diversité structurelle des moteurs BLDC répond aux exigences dynamiques et de stabilité propres à chaque application, rendant leur sélection cruciale lors de la conception. On répertorie trois familles architecturales principales [42] :

- Moteurs à rotor interne.
- Moteurs à rotor externe.
- Moteurs à entrefer axial.

Chacune de ces configurations se décline systématiquement en deux catégories selon le profil de la force contre-électromotrice induite : à onde sinusoïdale ou trapézoïdale [42].

II.5.1. Le moteur BLDC à rotor extérieur (Outrunner)

L'architecture du moteur « outrunner » repose sur un rotor externe tournant autour d'un stator interne (Figure II.7). L'intégration d'un nombre élevé de bobines et de pôles limite sa course angulaire à chaque inversion à 180° du champ magnétique, ce qui génère un fort couple brut pour une vitesse de rotation modérée [43].

Cette haute densité de couple permet un entraînement direct sans réducteur mécanique et se traduit par une faible constante de vitesse (Kv) [44]. Conjuguant fiabilité, rendement optimal et rentabilité, cette technologie s'impose comme la solution standard pour les drones et l'aéromodélisme [44].

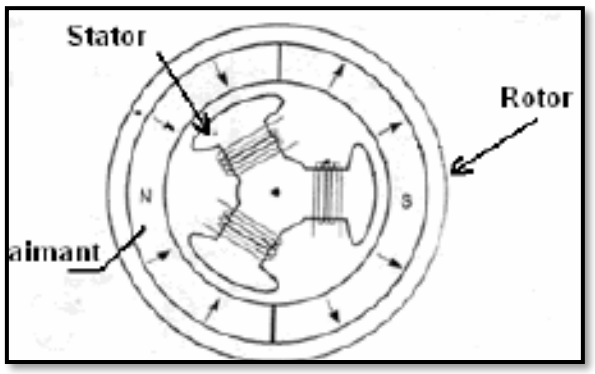


Figure II.7: Moteur BLDC à rotor extérieur [42].

II.5.2. Le moteur BLDC à rotor intérieur

À l'inverse de la topologie précédente, l'architecture « inrunner » place le rotor au centre du stator, une configuration associant classiquement une unique paire de pôles rotoriques à trois enroulements statoriques (Figure II.8) [40].

Cette disposition présente l'avantage de réduire drastiquement l'inertie rotorique, ouvrant la voie à de très hautes vitesses de rotation avec une constante Kv pouvant atteindre 7700tr/min/V. Par ailleurs, le synchronisme rigoureux entre le mouvement mécanique et la fréquence du champ tournant fluidifie la gestion de la commutation électronique. Néanmoins, à encombrement identique, l'exiguïté du diamètre du rotor restreint le bras de levier magnétique, limitant ainsi le couple maximal par rapport à un modèle « outrunner ». Cette variante demeure toutefois un standard industriel en raison de sa parenté structurelle avec les moteurs à courant continu conventionnels [45].

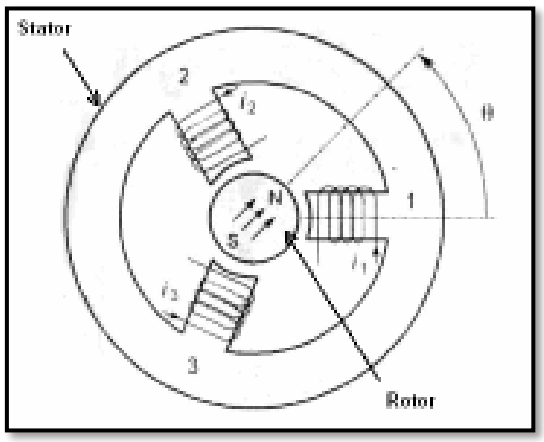


Figure II.8: Moteur BLDC à rotor intérieur [42].

II.5.3. Le moteur BLDC à entrefer axial (disques)

Cette configuration se structure autour de deux disques disposés en vis-à-vis (Figure II.9), où l'un des plateaux supporte les aimants permanents tandis que l'autre accueille les enroulements répartis radialement. Cette géométrie impose un flux magnétique dirigé parallèlement à l'axe de rotation de la machine [45].

Bien que fonctionnelle, cette topologie de moteur Brushless reste marginale dans l'industrie. En effet, l'interaction électromagnétique entre le stator et le rotor génère d'importantes contraintes axiales, ce qui exige l'intégration de butées à billes spécifiques pour garantir la tenue mécanique. De plus, cette complexification structurelle n'apporte aucun gain de performance notable comparativement aux architectures à rotor externe [45].

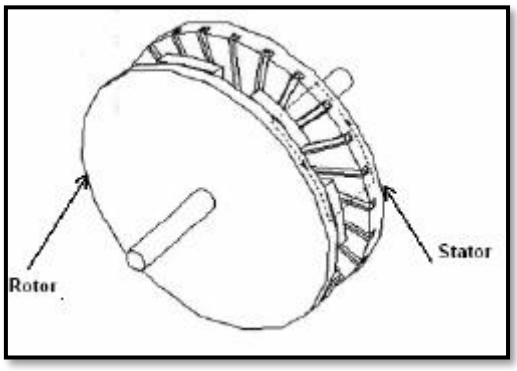


Figure II.9: Moteur BLDC à entrefer axial [40].

II.6. Principe de fonctionnement des moteurs BLDC

Le moteur à courant continu sans balais (BLDC) fonctionne à partir d'un onduleur électronique (Onduleur) assurant la conversion de la tension continue en tensions commutées, afin de générer un champ magnétique tournant au niveau du stator. Le rotor, généralement constitué d'aimants permanents, suit ce champ magnétique en raison de l'interaction électromagnétique. La figure II.10 illustre la structure globale du moteur ainsi que celle de son onduleur associé [40][45].

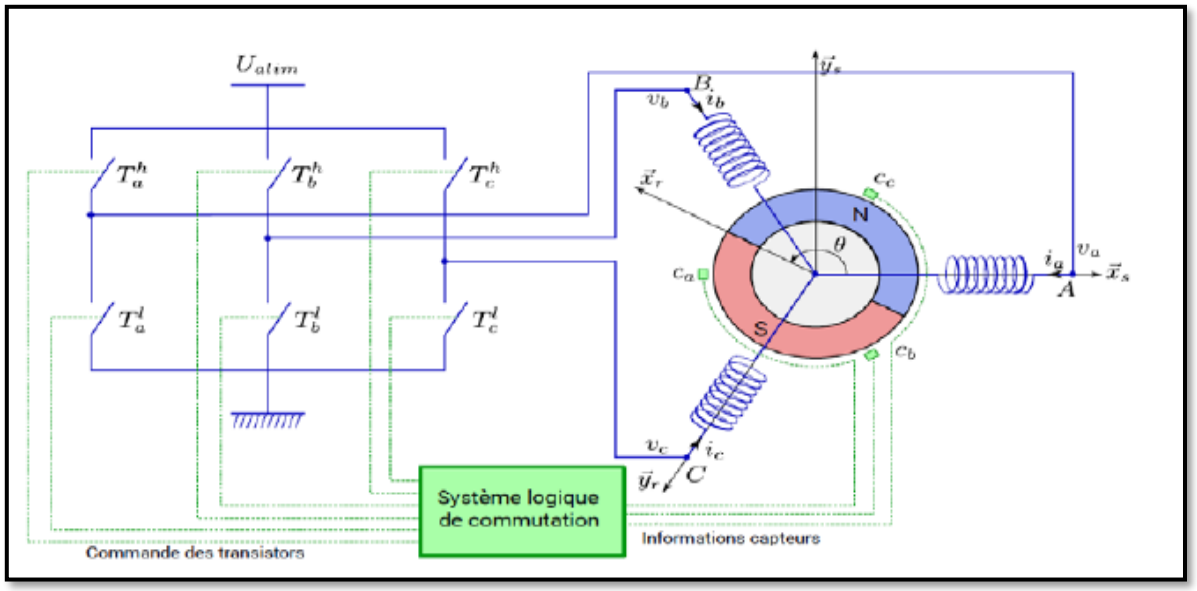


Figure II.10 : Exemple de situation de commutation [45].

Dans le cas d'un fonctionnement classique en commande trapézoïdale, la commutation s'effectue selon une séquence à six étapes (six-step commutation). À chaque instant, deux phases du stator sont alimentées tandis que la troisième est laissée en circuit ouvert. Par exemple, la phase B peut être reliée à la tension d'alimentation et la phase C à la masse, tandis que la phase A n'est pas alimentée. Ce mode de fonctionnement permet la circulation d'un courant dans les enroulements du stator, générant ainsi un champ magnétique statorique $\vec{\mathbf{B}}$ de direction définie.

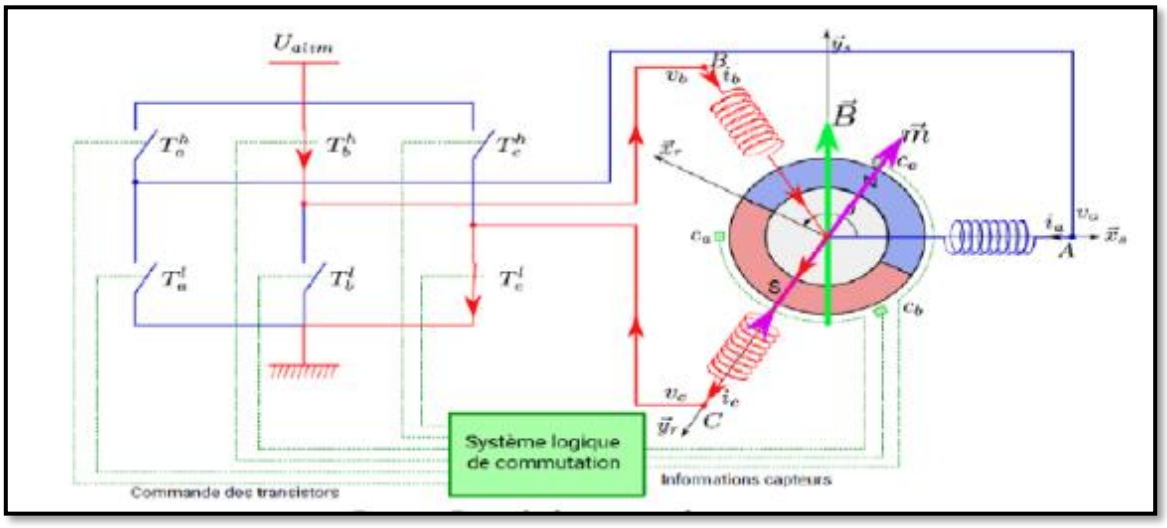


Figure II.11: Fonctionnement de l'onduleur et du moteur brushless [45].

Le rotor, muni d'un aimant permanent caractérisé par un moment magnétique $\vec{\mathbf{m}}$, tend à s'aligner avec le champ magnétique du stator, ce qui produit le couple électromagnétique responsable de la rotation. Le maintien du mouvement est assuré par la commutation périodique des phases, permettant la rotation progressive du champ magnétique statorique par incréments électriques ($\pi/6$ dans le cas de la commande à six étapes), garantissant ainsi la continuité du couple et du mouvement [40][45].

L'interaction entre le moment magnétique $\vec{\mathbf{m}}$ et le champ magnétique $\vec{\mathbf{B}}$ engendre un couple électromagnétique donné par [40][45] :

$$\vec{C}_m = \vec{m} \wedge \vec{B}$$

II.7. La commutation dans les moteurs BLDC

La commutation des moteurs à courant continu sans balais (BLDC) repose sur l'aiguillage séquentiel du courant dans les enroulements du stator par un système électronique, générant ainsi un champ magnétique tournant nécessaire à l'entraînement du rotor

II.7.1. Commande par capteurs à effet Hall des moteurs BLDC

Contrairement aux moteurs conventionnels à balais mécaniques, les moteurs BLDC utilisent des capteurs à effet Hall pour localiser la position du rotor. Ces capteurs changent d'état logique tous les 60 degrés électriques, permettant d'exécuter une séquence de commutation à six étapes (Six-Step Commutation), illustrée dans la figure II.12. À chaque étape, deux phases sont alimentées sous des tensions opposées tandis que la troisième reste inactive, ce qui produit le couple électromagnétique.

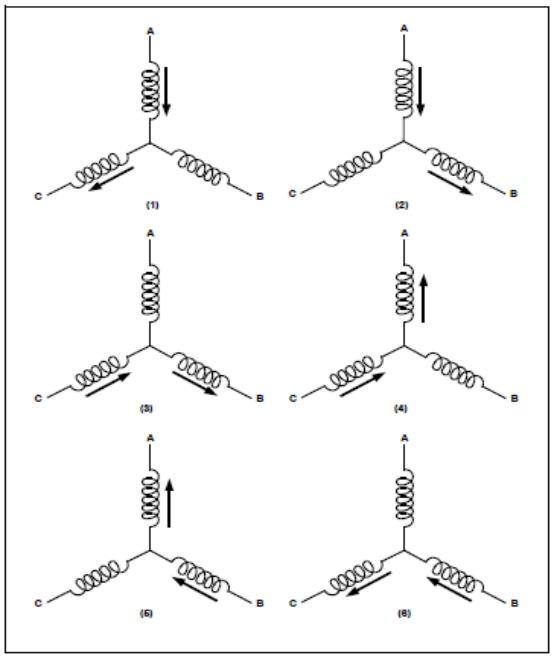


Figure II.12: Séquence d'excitation des enroulements selon les signaux des capteurs Hall [38].

Les signaux des capteurs Hall sont étroitement synchronisés avec la force contre électromotrice (Back EMF) induite dans les enroulements. Cette corrélation se manifeste lors du passage par zéro (Zero Crossing), un événement physique exploité pour déterminer l'instant optimal de commutation, comme le montrent les chronogrammes de la figure II.13.

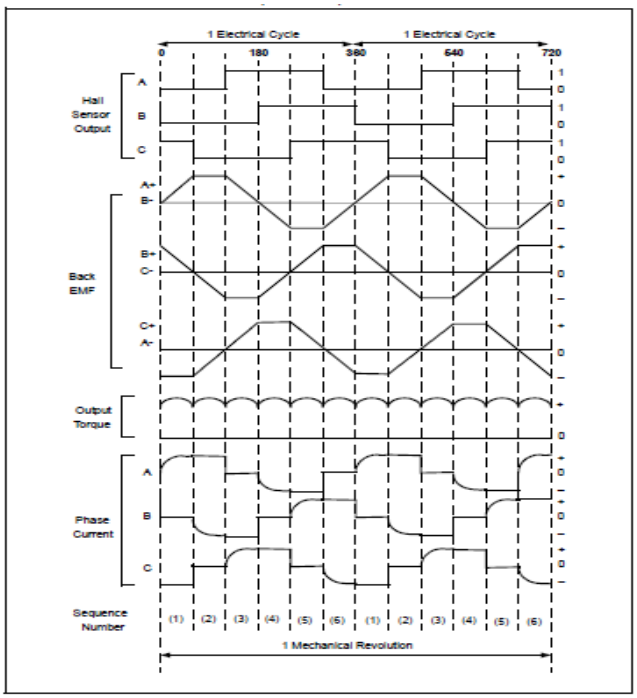


Figure II.13: Signaux des capteurs à effet Hall, FEM inverse (Back EMF), couple de sortie et courant de phase [38].

La gestion des commutations des interrupteurs de puissance (MOSFET ou IGBT) est assurée par un microcontrôleur couplé à un pont onduleur triphasé, selon l'architecture de la figure II.14. Les séquences de commande diffèrent selon le sens de rotation (horaire ou antihoraire), comme résumé dans le tableau II.2 et le tableau II.3 [38].

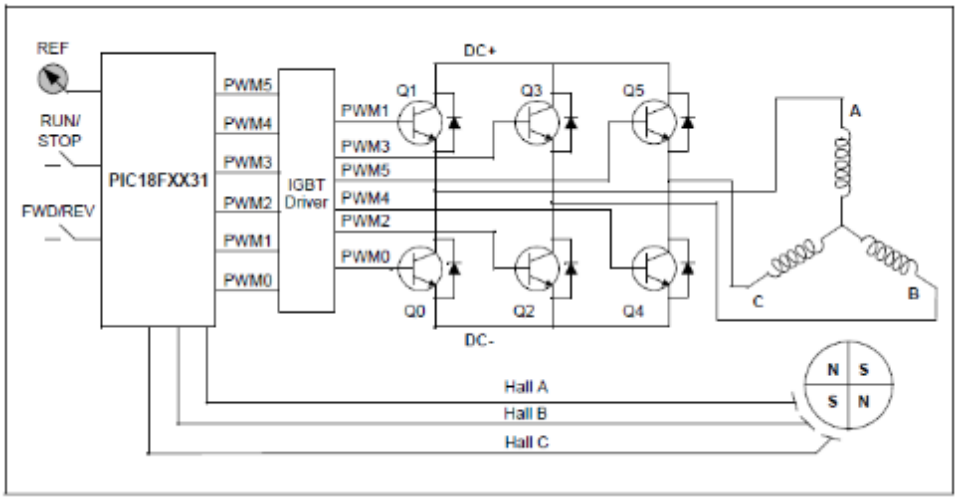


Figure II.14: Schéma bloc de commande [38].

Tableau II.2 : Séquence de rotation du moteur dans le sens horaire (vue du côté opposé à l'entraînement) [38].

Séquence n°	Entrée des capteurs à effet Hall			PWM actives		Courant de phase		
	A	B	C			A	B	C
1	0	0	1	PWM1(Q1)	PWM4(Q4)	DC +	Arrêt	DC-
2	0	0	0	PWM1(Q1)	PWM2(Q2)	DC+	DC-	Arrêt
3	1	0	0	PWM5(Q5)	PWM2(Q2)	Arrêt	DC-	DC+
4	1	1	0	PWM5(Q5)	PWM0(Q0)	DC	Arrêt	DC+
5	1	1	1	PWM3(Q3)	PWM0(Q0)	DC	DC+	Arrêt
6	0	1	1	PWM3(Q3)	PWM4(Q4)	Arrêt	DC+	DC-

Tableau II.3 : Séquence de rotation du moteur dans le sens antihoraire (vue du côté opposé à l'entraînement) [38].

Séquence n°	Entrée des capteurs à effet Hall			PWM actives		Courant de phase		
	A	B	C			A	B	C
1	0	1	1	PWM5(Q5)	PWM2(Q2)	Arrêt	DC-	DC+
2	1	1	1	PWM1(Q1)	PWM2(Q2)	DC+	DC-	Arrêt
3	1	1	0	PWM1(Q1)	PWM4(Q4)	DC+	Arrêt	DC-
4	1	0	0	PWM3(Q3)	PWM4(Q4)	Arrêt	DC+	DC-
5	0	0	0	PWM3(Q3)	PWM0(Q0)	DC-	DC+	Arrêt
6	0	0	1	PWM5(Q5)	PWM0(Q0)	DC-	Arrêt	DC+

II.7.2. Commande sans capteurs des moteurs BLDC

Il est possible de supprimer les capteurs physiques en pilotant le moteur BLDC via la surveillance de la Back EMF générée dans les phases non alimentées [38]. La relation analytique entre les signaux Hall et la Back EMF est illustrée dans le [Figure II.13]. Le signal d'un capteur Hall virtuel change d'état au moment exact où la Back EMF de la phase ouverte traverse zéro. Cependant, en pratique, les caractéristiques électriques des enroulements introduisent un déphasage temporel que le microcontrôleur doit compenser par logiciel pour garantir une commutation précise. La figure II.15 présente le schéma fonctionnel de cette configuration sensorless [38].

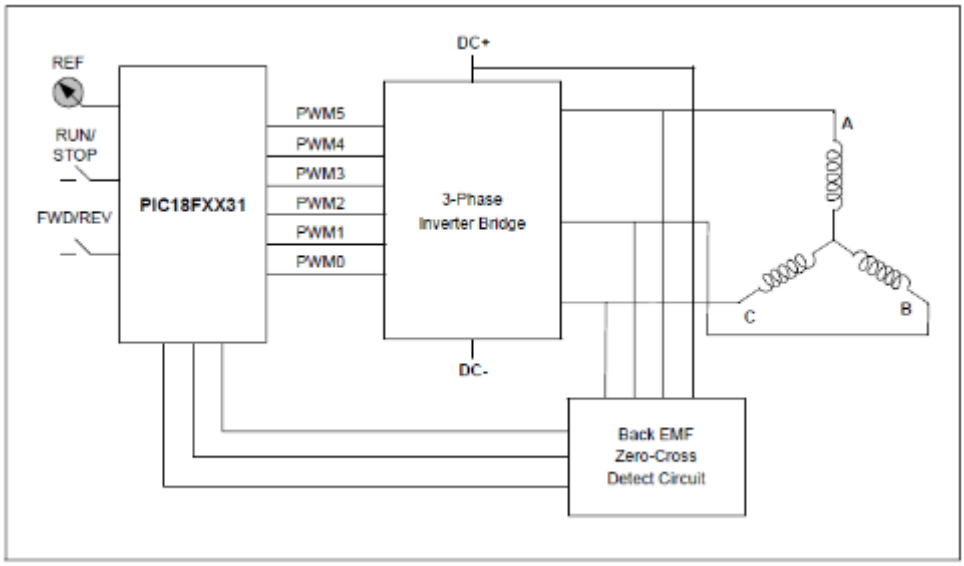


Figure II.15 : Schéma bloc de la commande sans capteurs (Sensorless Control) [38].

Le défi majeur de cette méthode réside dans le fonctionnement à très basse vitesse. L'amplitude de la Back EMF étant proportionnelle à la vitesse de rotation, le signal devient trop faible pour détecter le passage par zéro à l'arrêt. Pour y remédier, le moteur démarre en boucle ouverte (Open-Loop), puis bascule en boucle fermée (Closed-Loop) basée sur la Back EMF dès que la vitesse minimale requise est atteinte [38].

Cette approche simplifie la conception mécanique, réduit les coûts et s'avère idéale pour les environnements sévères (poussière, huile) ou les emplacements difficiles d'accès pour la maintenance.

Remarque :

- **La force contre-électromotrice (Back EMF)**

Lors de la rotation du rotor d'un moteur BLDC, une tension électrique prend naissance dans les enroulements du stator, connue sous le nom de force contre-électromotrice (Back EMF). Conformément à la loi de Lenz, cette tension s'oppose à la tension appliquée au moteur, limitant ainsi l'intensité du courant circulant dans les enroulements et prévenant toute élévation excessive [38].

Cette force est directement proportionnelle à la vitesse angulaire du rotor, et s'exprime mathématiquement par la relation suivante [38] :

$$E = Ke \cdot \omega$$

Où:

- E est la force contre-électromotrice (V),
- Ke est la constante de Back EMF :

$$Ke = N\, l\, r\, B$$

  - N **:** nombre de spires par phase,
  - l **:** longueur du rotor (m),
  - r **:** rayon interne du rotor (m),
  - B **:** densité du champ magnétique du rotor (T).
- ω est la vitesse angulaire (rad/s).

Ainsi, la valeur de la Back EMF augmente avec la vitesse de rotation du moteur et diminue lorsque cette vitesse baisse.

II.8. Caractéristiques du moteur BLDC

Les moteurs BLDC se distinguent des moteurs à courant continu à balais et des moteurs à induction par un ensemble de propriétés techniques qui fondent leur supériorité dans de nombreuses applications. Parmi leurs principales caractéristiques, on peut citer [42] :

- Une excellente dynamique vitesse–couple, offrant une réponse rapide aux variations de charge.
- Une réponse dynamique élevée.
- Un rendement énergétique important.
- Une durée de vie prolongée, en raison de l'absence de balais mécaniques.
- Un fonctionnement silencieux et nécessitant peu de maintenance.

Par ailleurs, le rapport couple/volume de ces moteurs est généralement supérieur à celui des technologies conventionnelles, ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications où les contraintes d'encombrement et de masse sont déterminantes. Sur le plan électromagnétique, les moteurs BLDC sont caractérisés par une force électromotrice (FEM) de forme trapézoïdale, alimentée par des courants statoriques de forme rectangulaire. Cette combinaison permet d'obtenir, dans des conditions idéales, un couple électromagnétique quasi constant [42].

II.9. Avantages et inconvénients du moteur BLDC dans le système de Spin-Coating

Le moteur BLDC constitue un élément essentiel du système de Spin-Coating grâce à sa capacité à fournir une vitesse de rotation précise et stable, indispensable pour obtenir des couches minces homogènes. Toutefois, malgré ses nombreux atouts, son utilisation présente également certaines contraintes qu'il convient de prendre en considération.

II.9.1. Avantages du moteur BLDC dans le système de Spin-Coating

- **Contrôle précis de la vitesse :** permet de maintenir une vitesse de rotation constante, garantissant ainsi l'uniformité de la couche déposée sur le substrat.
- **Réponse dynamique rapide :** assure une accélération rapide vers la vitesse programmée lors des différentes étapes du procédé de Spin-Coating.
- **Haute efficacité énergétique :** réduit les pertes d'énergie et améliore les performances globales du système.
- **Faible maintenance :** l'absence de balais diminue l'usure mécanique et réduit les interventions de maintenance.
- **Fiabilité élevée :** offre un fonctionnement stable et répétitif, adapté aux opérations de dépôt nécessitant une grande précision.
- **Faible niveau de vibrations et de bruit :** contribue à limiter les perturbations mécaniques susceptibles d'affecter la qualité du film déposé.
- **Longue durée de vie :** garantit une utilisation prolongée du système avec des performances constantes au fil du temps.

II.9.2. Inconvénients du moteur BLDC dans le système de Spin-Coating

- **Coût d'acquisition élevé :** nécessite l'utilisation d'un driver électronique et d'un système de commande dédié.
- **Commande plus complexe** : le pilotage du moteur requiert des circuits électroniques et des algorithmes de contrôle spécifiques.
- **Sensibilité aux perturbations électromagnétiques :** la commutation électronique peut générer des interférences affectant certains équipements électroniques voisins.
- **Maintenance spécialisée :** les opérations de diagnostic et de réparation demandent des connaissances techniques en électronique de puissance et en commande des moteurs.

II.10. Applications des moteurs BLDC

Les moteurs BLDC figurent parmi les moteurs électriques les plus utilisés dans les applications modernes, grâce à un ensemble de caractéristiques techniques qui en font un choix privilégié dans de nombreux secteurs industriels. En combinant un rendement énergétique élevé, une structure compacte et de faibles exigences de maintenance, ces moteurs s'imposent de manière croissante dans des domaines aussi variés que l'électronique grand public, l'aérospatiale et les véhicules électriques. Compte tenu de ces propriétés, nous allons présenter dans ce qui suit les principaux domaines d'application de ce type de moteur.

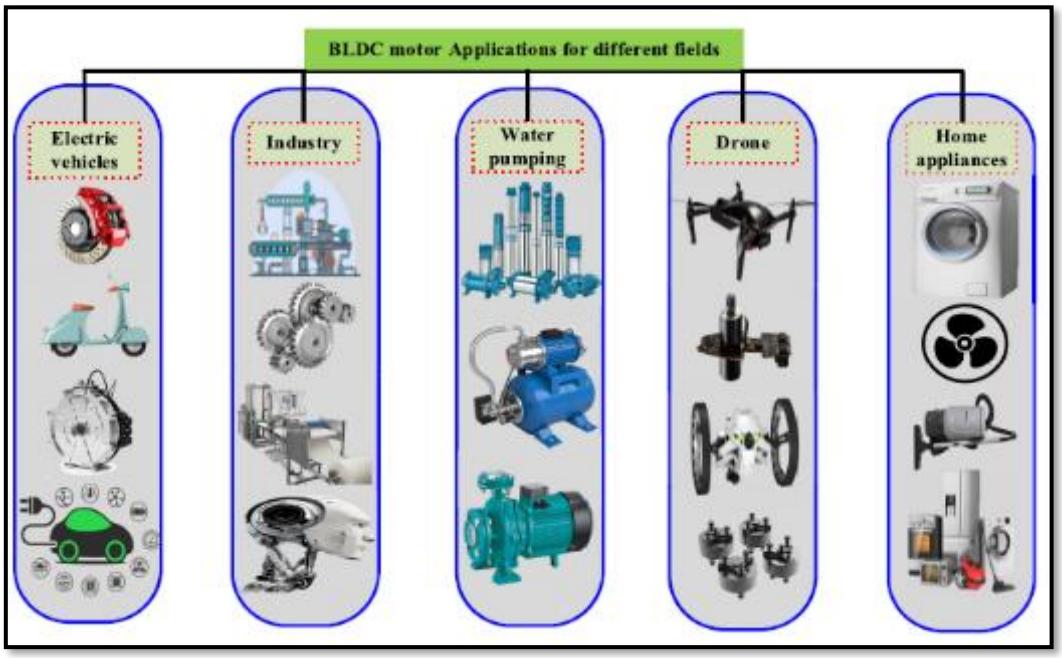


Figure II.16: Applications des moteurs BLDC dans divers secteurs [46].

A. Véhicules électriques (Electric vehicles)

Les moteurs BLDC représentent une solution de choix pour la propulsion des véhicules électriques, grâce à leur rendement élevé et leur faible encombrement. Les moteurs de moyeu (hub motors) sont particulièrement répandus dans les véhicules légers en raison de leur intégration aisée. Néanmoins, ils présentent certaines contraintes, notamment une masse accrue au niveau de l'essieu et des difficultés à maintenir un couple uniforme. Pour pallier ces limites, des approches telles que la réduction des interférences électromagnétiques, la tolérance aux défauts et la commande directe du couple (DTC) sont mises en œuvre afin d'optimiser les performances globales [46].

B. Pompage d'eau (Water pumping)

Les moteurs BLDC constituent une solution de choix dans les systèmes de pompage grâce à leur efficacité énergétique. Leur couplage aux installations photovoltaïques, associé à des techniques de commande telles que le MPPT et des convertisseurs de type Zeta ou boost, optimise l'extraction d'énergie et réduit les pertes. Les versions submersibles se distinguent par des performances supérieures à celles des moteurs à induction, grâce à la réduction des ondulations de couple [46]

C. Drones

Les drones font largement appel aux moteurs BLDC en raison de leur adéquation avec les configurations mono-rotor et multi-rotor, assurant la génération de la poussée nécessaire au vol. Le principal défi réside dans le maintien d'un couple constant pour garantir la stabilité de la poussée, ainsi que dans le renforcement de la tolérance aux pannes pour assurer la continuité

de fonctionnement. À cet effet, des techniques de commande avancées telles que le contrôle orienté champ (FOC) sont employées pour réduire les ondulations de couple et de flux. Par ailleurs, les structures magnétiques de type Halbach contribuent à diminuer les pertes et à améliorer le rendement global du système [46].

D. Applications industrielles

Dans le domaine industriel, les moteurs BLDC équipent les robots d'automatisation, les ascenseurs, les convoyeurs et les machines CNC, grâce à leur couple précis, leur faible inertie et leur large plage de vitesse. Les principaux défis portent sur la tolérance aux défauts et la maîtrise des interférences électromagnétiques, auxquels répondent des méthodes de commande sans capteurs et des approches basées sur des modèles de puissance [46].

E. Applications domestiques

Les appareils ménagers tels que les machines à laver, les climatiseurs et les ventilateurs intègrent de plus en plus les moteurs BLDC pour leur efficacité énergétique et leur bon facteur de puissance. Des techniques comme la commande vectorielle (SVPWM) et le contrôle numérique permettent de réduire la consommation et le bruit acoustique, bien que des défis persistent en matière de fiabilité et d'ondulations de couple [46].

F. Applications de précision en laboratoire

Les moteurs BLDC trouvent également leur place dans les équipements de laboratoire, notamment dans les systèmes de Spin-Coating utilisés pour le dépôt de couches minces en microélectronique. Leur faible inertie et leur capacité de régulation précise de la vitesse garantissent la stabilité du procédé, la reproductibilité des résultats et la réduction des vibrations susceptibles d'altérer la qualité du dépôt.

Conclusion

Il ressort de ce chapitre que les moteurs à courant continu sans balais (BLDC) représentent une avancée significative dans le domaine des systèmes électromécaniques modernes. L'abandon des balais mécaniques a permis de surmonter les limitations des moteurs conventionnels, notamment en termes d'usure et d'échauffement thermique, donnant ainsi naissance à des moteurs caractérisés par un rendement énergétique élevé, une réponse dynamique rapide et une durée de vie prolongée.

La diversité des configurations de ces moteurs leur confère une grande flexibilité d'adaptation aux exigences des différentes applications. Le système de commutation électronique demeure l'élément central garantissant un contrôle précis de la vitesse et du couple, que ce soit par le biais de capteurs à effet Hall ou par des techniques de commande sans capteurs. Ces propriétés font du moteur BLDC le choix idéal pour entraîner le système Spin-Coating, dont la qualité du dépôt des couches minces est étroitement liée à la précision et à la stabilité de la vitesse de rotation.

À la lumière de ces acquis théoriques, le chapitre suivant sera consacré à la simulation du

système et à la validation du programme de commande sur la plateforme électronique, afin de vérifier le bon fonctionnement de l'ensemble avant de passer à la phase de réalisation effective du dispositif Spin-Coating.

Chapitre III

Conception et Simulation du Système de Revêtement par Centrifugation.

Introduction

Ce chapitre est consacré à la conception complète et à la simulation du système de revêtement par centrifugation (spin coater) associé à un système de séchage (drying system) que nous avons réalisé. Après avoir établi dans les chapitres précédents les bases théoriques sur les couches minces et les techniques de dépôt, ainsi que l'état de l'art des systèmes de contrôle de moteurs BLDC, nous présentons ici la mise en œuvre pratique de notre solution.

Le système conçu repose sur une carte Arduino Mega 2560 comme unité de traitement centrale, associée à un moteur à courant continu sans balais (BLDC) commandé par un système de commutation PWM six impulsions. L'interface utilisateur s'appuie sur un afficheur LCD 16×2 à interface I2C et un clavier matriciel 4×4, permettant la programmation de jusqu'à quatre étapes de dépôt avec contrôle indépendant de la vitesse, du temps et de l'accélération.

Le système inclut également un module de séchage complet comportant un capteur de température NTC 220kΩ, un système de chauffage par plaque résistive commandée par TRIAC, et un moteur DC pour l'éjection/fermeture automatique du support d'échantillon via des fins de course.

Nous détaillerons successivement l'architecture matérielle du système, les choix de composants, la conception du schéma électronique, la stratégie de commande PWM pour le moteur BLDC, le système de séchage avec contrôle thermique, le développement du logiciel embarqué, et les résultats de simulation obtenus sous Proteus ISIS.

Remarque importante : Simulation vs Expérimentation

Pour la simulation sous Proteus ISIS, nous avons implémenté une solution basée sur trois sorties PWM de l'Arduino Mega 2560, trois drivers IR2101 et un pont H triphasé en MOSFET IRF540N, car le composant ESC 50A n'existe pas dans les bibliothèques standard de Proteus.

Cette approche permet une validation détaillée du contrôle triphasé, de la logique de commutation six pas et des interfaces numériques avec les capteurs. Elle est essentielle pour comprendre les mécanismes internes du pilotage BLDC.

En expérimentation (chapitre IV), nous avons utilisé un ESC 50A commercial qui encapsule ces fonctions (drivers + MOSFETs + logique de commutation) dans un seul composant. L'ESC accepte un signal PWM simple de l'Arduino (1100–1900 µs) et gère automatiquement la commutation des six transistors, offrant une solution plus compacte et fiable pour un prototype fonctionnel.

Cette distinction est importante : les principes de commande restent identiques, mais la mise en œuvre pratique diffère significativement entre la simulation pédagogique (détaillée) et le prototype opérationnel (simplifié).

III.1. Architecture générale du système

Le système de revêtement par centrifugation associé au séchage s'articule autour de quatre blocs fonctionnels principaux :

- **Bloc d'interface utilisateur :** clavier matriciel 4×4 et afficheur LCD 16×2 I2C.
- **Bloc de traitement et de contrôle :** Arduino Mega 2560 (ATmega2560).
- **Bloc de puissance pour BLDC :** drivers IR2101 et pont triphasé (simulation) ou ESC 50A (expérimentation).
- **Bloc de séchage :** capteur NTC, chauffage TRIAC, moteur DC, fins de course.

III.1.1. Diagramme fonctionnel et flux de données

L'opérateur interagit avec le système via le clavier matriciel 4×4 pour saisir les paramètres de chaque étape de dépôt : vitesse (RPM), durée (secondes) et accélération (RPM/s). Ces informations sont traitées par le microcontrôleur ATmega2560, qui génère les signaux PWM de commutation à destination du bloc de puissance.

En simulation, le bloc de puissance est constitué de trois drivers IR2101 et six MOSFETs IRF540N organisés en pont triphasé. En expérimentation, un ESC 50A unique assure les mêmes fonctions.

Le bloc de puissance traduit les signaux de commutation en courants triphasés alimentant le moteur BLDC. La vitesse réelle du moteur soit détectée (par les capteurs Hall en expérimentation) soit estimée (en simulation) et utilisée pour ajuster les rampes d'accélération.

Après l'étape de Spin-Coating, le système interroge l'utilisateur pour lancer la phase de séchage. Si acceptée :

1. Le support s'éjecte automatiquement (moteur DC + fin de course SORTI),
2. L'utilisateur place l'échantillon et appuie le bouton switch (pin 16),
3. Le support se rétracte (fin de course ENTRE détecte la fermeture),
4. Le système procède au séchage : chauffage contrôlé par capteur NTC (hystérésis ±3/-2°C) et décompte du temps sur LCD,
5. À la fin, le support s'éjecte automatiquement pour retirer l'échantillon.

L'état du système (vitesse, étape, température, temps restant) est affiché en temps réel sur le LCD 16×2.

III.1.2. Choix de la topologie de contrôle

- Pour le Spin-Coating, nous avons retenu la commutation trapézoïdale à six pas (six-step commutation), également appelée commande à 120°. Ce choix s'est imposé pour plusieurs raisons :
    - Simplicité d'implémentation sur microcontrôleur (logique booléenne simple).
    - Disponibilité native de sorties PWM sur l'ATmega2560.
    - Compatibilité avec les drivers demi-pont IR2101 (simulation Proteus).
    - Compatibilité avec l'ESC 50A commercial (expérimentation).

- Réponse en fréquence suffisante pour les plages de vitesse visées (100 à 5000 tr/min).
- Consommation énergétique modérée comparée aux autres topologies.

➢ Pour le système de séchage, nous utilisons :

- **Mesure thermique :** Lecture du capteur NTC via ADC 10 bits avec filtre à moyenne mobile glissante sur 15 échantillons.
- **Contrôle chauffage :** hystérésis ±3/-2°C pour éviter les oscillations thermiques rapides.
- **Commande moteur DC :** commutation logique via pont en (L298N).

III.2. Présentation des composants utilisés

III.2.1. Microcontrôleur Arduino Mega 2560 (ATmega2560)

La carte Arduino Mega 2560 constitue l'unité centrale de traitement (CPU). Elle intègre un microcontrôleur 8 bits ATmega2560 cadencé à 16 MHz, doté de 256 Ko de mémoire flash (programme), 8 Ko de RAM (variables) et 4 Ko d'EEPROM (données persistantes).

Ses 15 sorties PWM matérielles (16 bits sur Timer 3–5) permettent :

- 6 sorties pour la commutation du moteur BLDC en simulation Proteus (D2, D3, D4, D9, D10, D11 connectées à trois drivers IR2101)
- 1 sortie pour commande plaque de chauffage (pin 15 → TRIAC SOC1044)
- 1 sortie pour signalisation buzzer (pin 11)
- Entrées analogiques pour capteur NTC 220 kΩ (A0, ADC 10 bits)
- Entrées numériques pour fins de course (pins 13, 17 avec INPUT_PULLUP)
- Bus I2C (SDA/SCL sur pins 20–21) pour afficheur LCD DFRobot JHD-2×16

Tableau III.1 : Spécifications techniques du microcontrôleur ATmega2560.

Paramètre	Valeur
Microcontrôleur	ATmega2560 (8-bit AVR)
Fréquence d'horloge	16 MHz
Mémoire Flash	256 Ko
SRAM	8 Ko
EEPROM	4 Ko
Sorties PWM	15 (Timer0, Timer1, Timer3, Timer4, Timer5)
Entrées ADC	16 (10-bit, 0 – 1023)
Tension nominale	5 V
Broches E/S numériques	54 (dont 15 PWM)

III.2.2. Driver demi-pont IR2101 et MOSFET IRF540N :

III.2.2.1. Driver demi-pont IR2101 (simulation Proteus uniquement)

- **Note simulation :** Le circuit intégré IR2101 est un driver demi-pont (half-bridge) haute et basse tension, conçu spécifiquement pour piloter des paires de transistors MOSFET en configuration demi-pont. Il dispose d'une entrée HIN (haute tension) et LIN (basse tension).

  Un circuit bootstrap (diode 1N4148 + condensateur de découplage 2,2 µF) permet l'alimentation flottante du transistor haute tension. Cette topologie est essentielle pour la commutation sans court-circuit du pont.

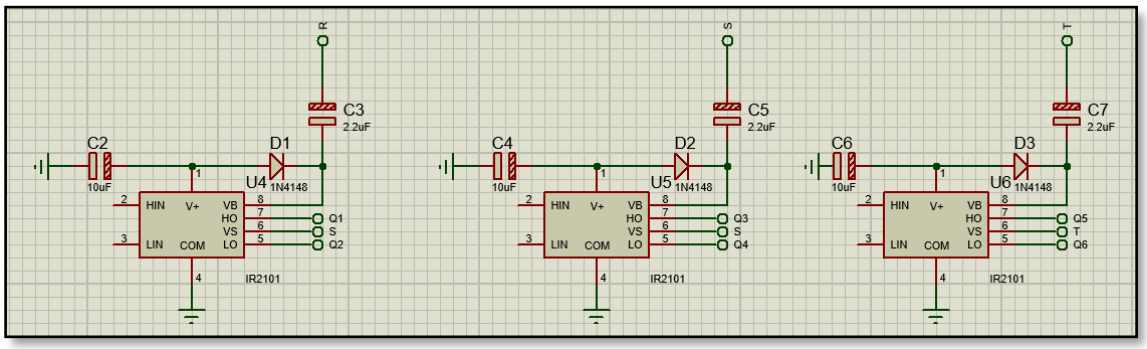


Figure III.1: Schéma du driver IR2101 en configuration demi-pont avec circuit bootstrap.

- **En pratique (expérimentation) :** L'ESC 50A intègre ces fonctions de pilotage en interne et accepte directement un signal PWM simple de l'Arduino (gamme 1100–1900 µs). Les trois drivers IR2101 de la simulation Proteus ne sont donc pas nécessaires en expérimentation.

Notre simulation Proteus utilise trois circuits IR2101 (U1, U2, U3), un par phase du moteur BLDC triphasé.

III.2.2.2. MOSFET IRF540N (simulation Proteus uniquement)

- **Note simulation :** Les transistors MOSFET IRF540N constituent les six bras du pont en H triphasé (Q1 à Q6 dans la simulation). Ils offrent une tension Vds(max) = 100 V, un courant continu Id(max) = 33 A en dissipation, et une résistance canal RDS (on) = 44 mΩ à VGS = 10 V.

  Ces caractéristiques électriques les rendent adaptés au pilotage de moteurs BLDC basse tension (12–48 V) avec puissance modérée (typiquement < 500 W).

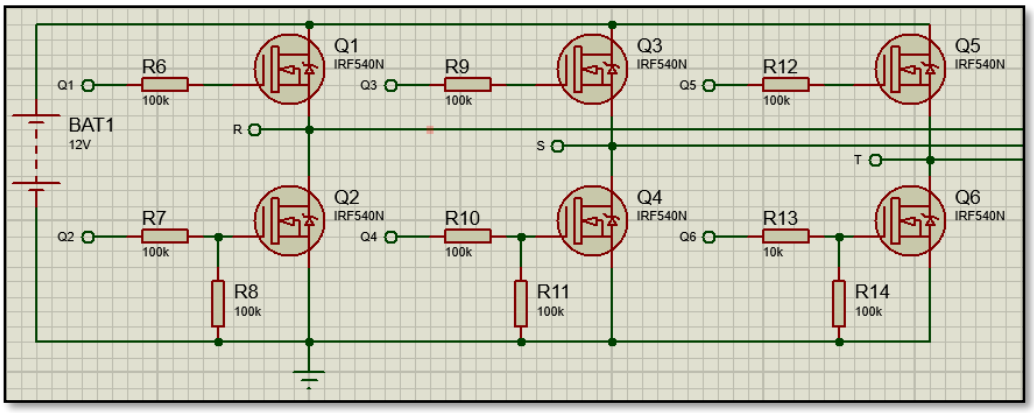


Figure III. 2: Pont triphasé à base de MOSFET IRF540N (Q1 à Q6) pour la commande du moteur BLDC.

- **En pratique (expérimentation) :** Ces six transistors sont intégrés physiquement à l'intérieur de l'ESC 50A, qui gère automatiquement leur commutation à haute fréquence (~20 kHz) et leur protection thermique via des circuits de limitation de courant.

- Comme illustré dans la figure ci-dessous, la phase de simulation sur le logiciel Proteus ISIS a été réalisée en se basant sur des drivers de grille IR2101et un pont onduleur triphasé à transistors MOSFET IRF540N. Cette approche structurelle vise à reproduire le mécanisme de fonctionnement du contrôleur de vitesse électronique (ESC 50A), ce dernier n'étant pas disponible dans la bibliothèque du logiciel. Cela permet ainsi une compréhension approfondie et détaillée des stratégies de commande des moteurs à courant continu sans balais BLDC).

  En contrepartie, un contrôleur ESC 50A commercial a été adopté dans l'expérimentation pratique. Cet onduleur intégré regroupe l'ensemble des composants essentiels (drivers et transistors de puissance) au sein d'un seul module, conservant ainsi le même principe de commande tout en offrant une mise en œuvre pratique simplifiée.

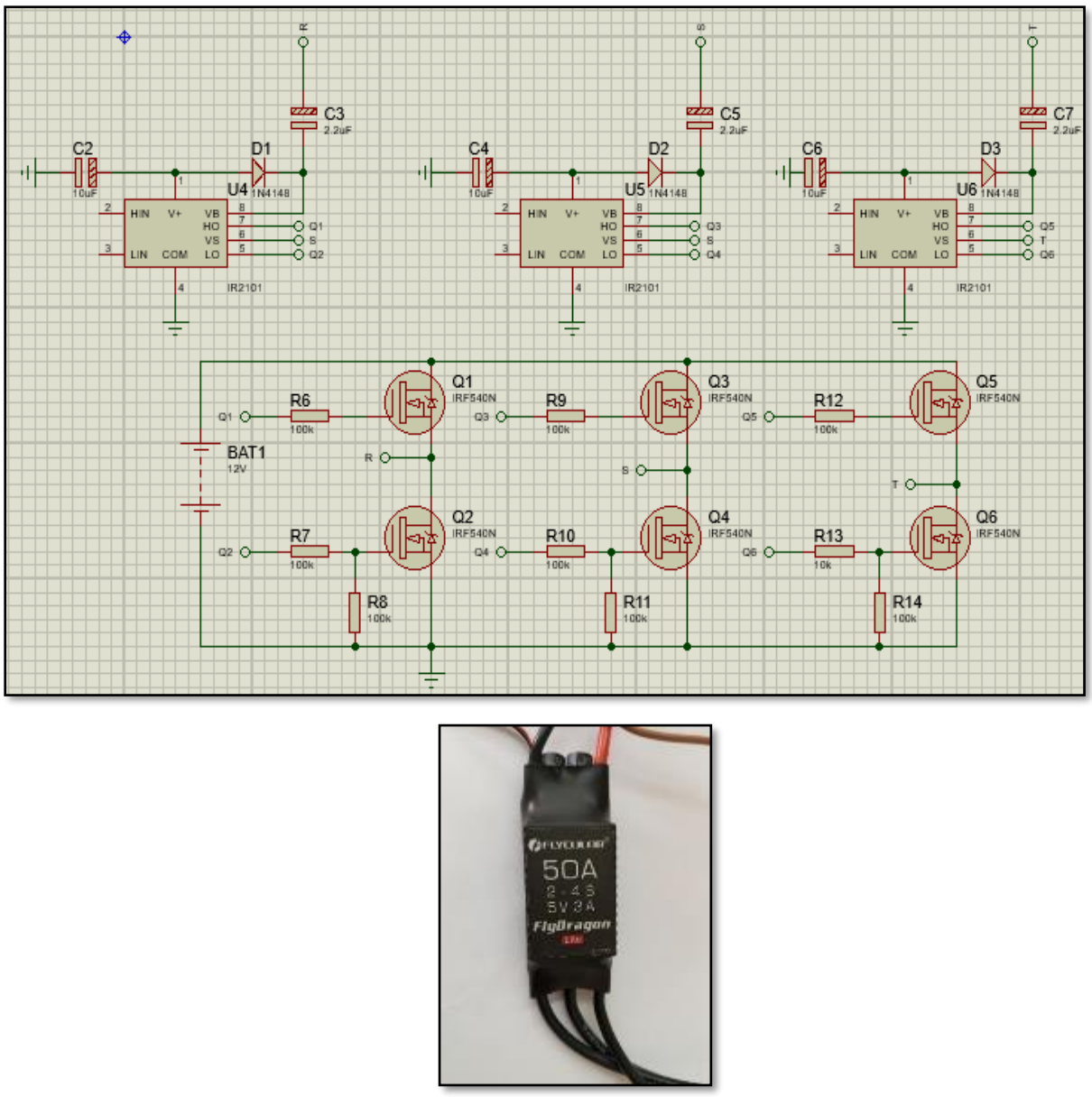


Figure III. 3: Structure du système de commande d'un moteur BLDC (Simulation Proteus : Driver et MOSFET / Pratique : ESC).

III.2.3. Capteur NTC 220kΩ (système de séchage)

Un thermistor NTC (coefficient de température négatif) de 220 kΩ à 25°C est utilisé pour mesurer la température de la plaque de chauffage du système de séchage. Le capteur est branché via un pont diviseur de tension standard :

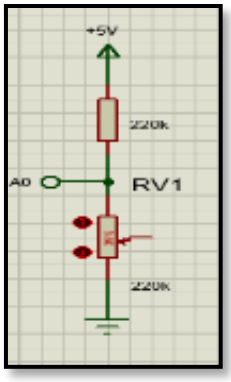


Figure III.4: Schéma de simulation sous Proteus du capteur de température NTC avec pont diviseur de tension.

Caractéristiques :

- Plage de mesure : -20°C à 250°C (avant validation logicielle)
- Coefficient Beta : 3950 K (typique pour NTC 220kΩ)
- Filtre numérique : Les mesures ADC du capteur NTC sont traitées par un filtre numérique à moyenne mobile de fenêtre 15 points afin de réduire le bruit de mesure.
- Validation ADC : plage élargie 1–1000 (permet mesure jusqu'à 200°C sans rejet)
- Résolution après filtrage : ±2–3°C

III.2.4. Plaque chauffante et optotriaque SOC1044 (système de séchage)

La plaque chauffante est commandée par un TRIAC BCR5PM piloté par un optotriaque SOC1044. Le TRIAC assure une commutation AC haute puissance (220 V AC, 4A typiquement), permettant un contrôle progressif et régulé de la puissance thermique fournie à la plaque.

Le code Arduino génère un signal logique (HIGH/LOW) sur la broche de chauffage (pin 15) ; le circuit d'optotriaque isole galvaniquement ce signal 5V et l'utilise pour déclencher le TRIAC, qui amplifie alors la commutation AC de la plaque chauffante.

Cette architecture offre une isolation galvanique importante pour la sécurité électrique, séparant complètement le circuit de commande 5V du circuit de puissance 220 V AC.

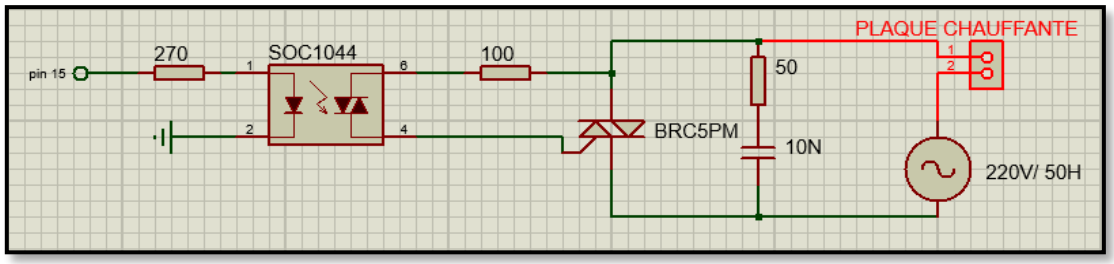


Figure III. 5: Schéma Proteus de commande de la plaque chauffante par optotriaque et TRIAC.

III.2.5. Moteur DC et pont L298N (gestion du support d'échantillon)

Un moteur DC 12V commande l'éjection et la fermeture linéaire du support d'échantillon. La commutation du moteur est assurée par un pont en H L298N connecté aux broches 12 (IN1) et 14 (IN2) de l'Arduino.

Deux fins de course détectent les positions extrêmes :

- FIN_COURSE_PIN (pin 13) : détecte support RENTRÉ (position initiale)
- FIN_COURSE_SORTI_PIN (pin 17) : détecte support ÉJECTÉ (pour prélèvement d'échantillon)

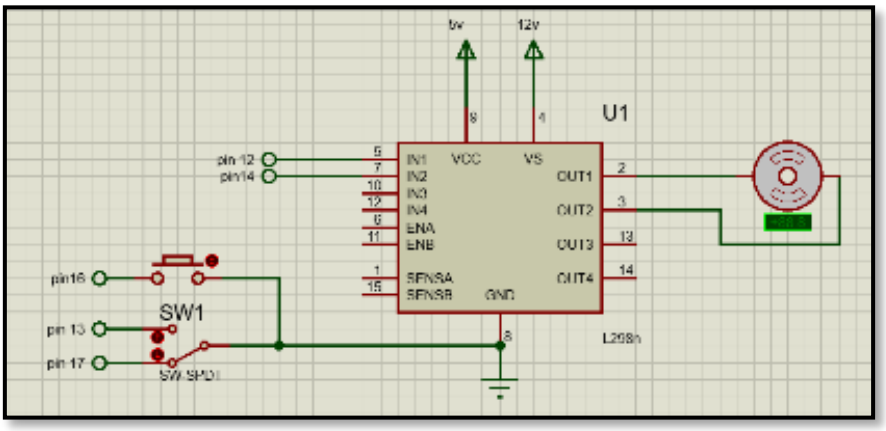


Figure III. 6: Schéma Proteus du moteur DC avec pont en H L298N et fins de course.

III.2.6. Interface utilisateur : LCD I2C et clavier matriciel 4×4

L'afficheur LCD 16×2 DFRobot JHD-2×16 à interface I2C (adresse 0x27) affiche l'état du système, les paramètres saisis, et les informations temps réel (vitesse RPM, numéro d'étape, température, temps restant de drying).

Le clavier matriciel 4×4 (type KEYPAD-SMALLCALC) est connecté aux broches 22–25 (lignes) et 26–29 (colonnes), permettant la saisie numérique des paramètres de Spin et de séchage ainsi que la validation (# = enter) et l'annulation (* = cancel).

Ce clavier offre une ergonomie simple et fiable pour la saisie rapide de paramètres, sans écran tactile complexe.

III.3. Schéma électronique du système

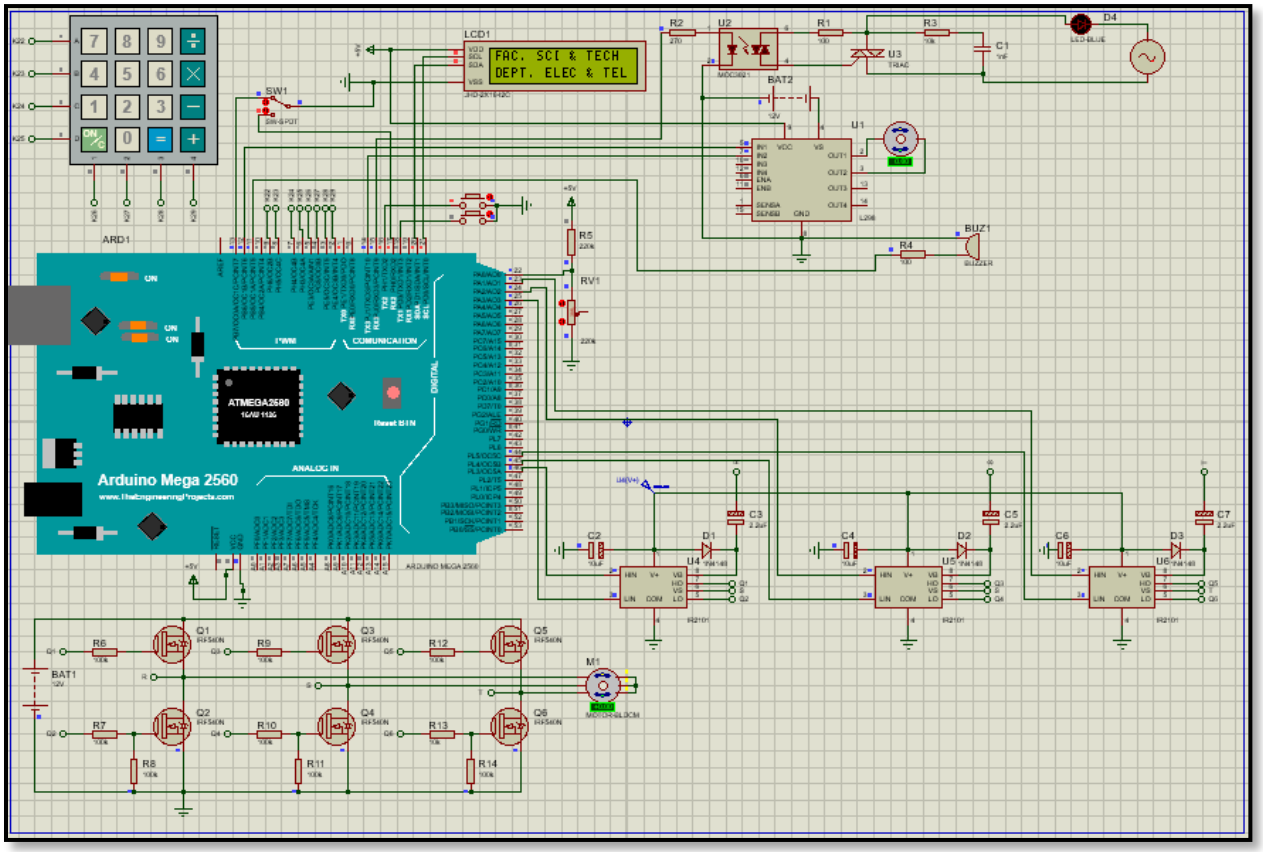


Figure III.7: Schéma électronique du système sous simulation Proteus ISIS.

III.3.1. Bloc de puissance BLDC (pont triphasé)

- **Pour la simulation Proteus :** Le bloc de puissance est constitué d'un pont en H triphasé avec six MOSFETs IRF540N organisés en trois bras (phases R, S, T). L'alimentation est assurée par une source de tension 12V continue. Des résistances de 100kΩ entre grille et source de chaque MOSFET assurent le blocage sûr en l'absence de signal PWM (failsafe).
- **Pour l'expérimentation :** Ce bloc triphasé complet est intégré dans le boîtier de l'ESC 50A, qui accepte un signal PWM unique de l'Arduino sur sa broche d'entrée.

III.3.2. Circuit de commande IR2101 (simulation Proteus uniquement)

Les trois circuits IR2101 (U1, U2, U3) assurent l'interface entre les signaux 5V de l'Arduino et les grilles des MOSFETs. Chaque IR2101 reçoit deux signaux PWM entrantes :

- HIN (haute tension, active-high): broches D11, D10, D9
- LIN (basse tension, active-high) : broches D4, D3, D2

Chaque driver dispose d'un condensateur de bootstrap (2,2 µF) et d'une diode 1N4148 pour l'alimentation flottante du bras haut (high-side driver). Cette configuration est nécessaire pour piloter un MOSFET haut sans perte de tension.

Note simulation vs expérimentation : Ces drivers IR2101 n'existent pas en tant que boîtier distinctif dans l'ESC 50A ; ils sont remplacés par la logique de commutation interne intégrée.

III.3.3. Bloc de séchage (drying system)

Le bloc de séchage comprend les éléments suivants :

- Capteur NTC : pont diviseur 220kΩ / NTC 220kΩ connecté à A0 (ADC)
- Chauffage : sortie PWM/logique pin 15 → optotriaque SOC1044 → TRIAC BCR5PM → plaque chauffante 220V
- Moteur DC support : commande via L298N sur pins 12 (IN1), 14 (IN2)
- Fins de course : capteurs numériques pins 13 (ENTRE), 17 (SORTI)
- Bouton switch manuel : pin 16 (INPUT_PULLUP) pour commande manuelle du support
- Buzzer signalisation : pin 11 (OUTPUT) pour feedback sonore (bips)

III.4. Stratégie de commande PWM six pas (BLDC)

III.4.1. Principe de la commutation trapézoïdale

La commande six pas (six-step commutation) alimente deux phases du moteur sur trois à chaque instant, laissant la troisième en circuit ouvert (flottante). Cette séquence de commutation crée un champ magnétique rotatif qui entraîne le rotor.

Tableau III. 2: États des bras du pont triphasé durant les six étapes de la commutation six pas.

Pas	HIN_R	LIN_R	HIN_S	LIN_S	HIN_T	LIN_T	Phases actives
0	PWM	0	0	1	0	0	R+ → S−
1	PWM	0	0	0	0	1	R+ → T−
2	0	0	PWM	0	0	1	S+ → T−
3	0	1	PWM	0	0	0	S+ → R−
4	0	1	0	0	PWM	0	T+ → R−
5	0	0	0	1	PWM	0	T+ → S−

Légende : PWM = rapport cyclique variable (0–255), 1 = logique haute, 0 = logique basse

III.4.2. Contrôle de la vitesse par PWM

La vitesse du moteur BLDC est contrôlée par deux paramètres indépendants :

1. Fréquence de commutation (T_{comm} en microsecondes) :

$$T_{comm} = \frac{10{,}000{,}000}{RPM \times POLE_{pairs}} \quad \text{en microsecondes}$$

Où :

- $POLE_{pairs}$ = 7 (moteur avec 14 pôles = 14/2 = 7 paires de pôles)
- RPM varie de 100 à 5000 tours par minute

2. Rapport cyclique PWM (duty cycle) sur chaque broche :

Duty = 0–255, augmente linéairement avec RPM (0 RPM → 0%, 5000 RPM → 100%)

Temps mort (dead time) : 10 microsecondes imposées entre chaque transition de commutation pour éviter les court-circuits momentanés du pont (shoot-through).

III.4.3. Profil d'accélération progressive

Une rampe linéaire met à jour la vitesse cible toutes les 100 millisecondes.
À chaque itération :

$$\text{Vitesse}_{\text{cible}} = \frac{\text{accel}}{10}$$

Où : 'accel' est le taux d'accélération en ((tr/min)/s), paramétrable de 100 à 1000 ((tr/min)/s).
Cette approche garantit un démarrage progressif sans à-coup mécanique qui pourrait endommager le rotor ou faire glisser l'échantillon.

III.5. Système de séchage avec contrôle thermique

III.5.1. Mesure de température par capteur NTC

Le capteur NTC 220kΩ est lu via l'ADC 10 bits de l'Arduino (résolution 0–1023 pour plage 0–5V, soit ~4,9 mV/bit).

La conversion s'effectue en trois étapes :

Étape 1 : Conversion ADC → Résistance NTC

$$R_{NTC} = R_{SERIE} \times \left(\frac{1023}{ADC_{moyenne}} - 1\right) = 220{,}000 \times \left(\frac{1023}{ADC_{moyenne}} - 1\right) \text{Ohms}$$

Étape 2 : Conversion Résistance → Température (formule Steinhart-Hart) :

$$\frac{1}{T_K} = \frac{1}{T0_K} - \frac{\ln(R_{NTC}/R0)}{BETA}$$

$T_C = T_K - 273.15$

Où :

- $T0_K$ = 298.15 K (correspondant à 25°C en Kelvin)
- R0 = 220,000 Ω (résistance NTC à 25°C)
- BETA = 3950 K (coefficient caractéristique du capteur NTC 220kΩ)

Étape 3 : Filtre numérique (moyenne mobile 15 points) :

Cette moyenne glissante élimine les pics de bruit ADC dus à la réponse thermique lente du capteur NTC (constante thermique ~10 secondes) et aux couplages électromagnétiques du TRIAC.

Validations appliquées :

- ADC : 1–1000 (plage élargie pour permettre mesure jusqu'à 200°C sans rejet)
- R_{NTC} : 100 Ω – 2 MΩ (très large plage couvrant -50 à 250°C)
- Température : -50°C à 250°C (plage admissible après calcul)

III.5.2. Contrôle du chauffage avec hystérésis thermique

Pour éviter les oscillations thermiques rapides (marche-arrêt répétée qui dégrade la plaque et consomme de l'énergie), une hystérésis ±3/-2°C est appliquée à la commande chauffage :

- ✓ IF $T < (T_{cible} - 3°C) \rightarrow$ Chauffage ON
- ✓ ELSE IF $T > (T_{cible} + 2°C) \rightarrow$ Chauffage OFF

La température cible peut être programmée entre 30°C et 200°C via le clavier.

Cette hystérésis asymétrique (3° en bas, 2° en haut) offre un bon compromis entre stabilité thermique et réponse rapide.

III.5.3. Gestion mécanique du support d'échantillon

Le système de séchage emploie une machine à états finis (FSM) avec trois états distincts :

1) **État DRY_EJECT :**

Le support s'éjecte automatiquement via le moteur DC. L'utilisateur place l'échantillon sur le support et appuie le bouton switch (pin 16, INPUT_PULLUP).

2) **État DRY_HEATING :**

Après que la fin de course ENTRE (pin 13) détecte la fermeture du support, le chauffage s'active et le décompte du temps commence. La température est affichée en temps réel sur le LCD (mise à jour toutes les 1 secondes).

3) **État DRY_COMPLETE :**

Une fois le temps de séchage écoulé, le support s'éjecte automatiquement pour permettre le retrait de l'échantillon. L'utilisateur appuie le bouton switch (pin 16) pour confirmer et revenir au menu principal.

III.6. Développement du logiciel embarqué

III.6.1. Architecture logicielle : Machine à états finis (FSM)

Le logiciel embarqué est structuré autour d'une machine à états finis (FSM) avec 13 états distincts couvrant à la fois la phase de Spin-Coating et la phase de séchage :

1. SPLASH : écran de démarrage
2. MAIN_MENU : menu principal
3. ENTER_NUM_STEPS : saisie nombre d'étapes (1–4)
4. ENTER_RPM : saisie vitesse RPM pour étape courante
5. ENTER_TIME : saisie durée en secondes
6. ENTER_ACCEL : saisie accélération en RPM/s
7. READY : validation des paramètres, prêt à démarrer
8. RUNNING : exécution Spin-Coating, mise à jour vitesse en temps réel
9. DRY_ASK : question « Sécher après ? » Oui/Non
10. DRY_ENTER_TEMP : saisie température cible (30–200°C)
11. DRY_ENTER_TIME : saisie durée séchage (1–999 s)
12. DRY_EJECT : éjection support, attente utilisateur
13. DRY_HEATING : chauffage et décompte temps
14. DRY_COMPLETE : fin séchage, rétraction support

III.6.2. Points clés de l'implémentation

Spin-Coating :

- Génération des 6 signaux PWM de commutation trapézoïdale selon la table d'états
- Accélération progressive paramétrable avec rampe linéaire (mise à jour 100 ms)
- Décelération progressive jusqu'à l'arrêt (boucle bloquante pour sécurité)

Séchage :

- Lecture filtrée du capteur NTC avec un filtre numérique à moyenne mobile de fenêtre 15 points
- Contrôle thermique avec hystérésis ±3/-2°C
- Gestion automatique du support (éjection / rétraction) via moteur DC et fins de course
- Affichage temps réel de la température et du temps restant

Sécurité :

- Arrêt d'urgence par clavier (+) : décelération progressive du BLDC puis menu.
- Arrêt d'urgence par bouton STOP (pin 18) en simulation : même comportement.
- Cutoff chauffage automatique si capteur NTC défaillant (T = -999°C).

III.7. Simulation sous Proteus ISIS

III.7.1. Environnement de simulation

La simulation complète du système a été réalisée sous Proteus ISIS (version 8.x), un environnement de simulation électronique mixte (numérique/analogique) permettant de valider le comportement du circuit et du code avant la construction d'un prototype physique.

Le fichier.hex (code machine compilé) généré par Arduino IDE est chargé dans le composant ATmega2560 virtuel configuré avec fréquence d'horloge 16 MHz.

III.7.2. Approche simulation vs expérimentation : avantages et différences

Simulation Proteus ISIS (présent chapitre) :

- ✓ Architecture complète et détaillée : Arduino Mega + 3 × IR2101 + 6 × MOSFET IRF540N + pont triphasé
- ✓ Permet une validation exhaustive de la commutation six pas et de la logique numérique
- ✓ L'oscilloscope virtuel Proteus observe les signaux PWM sur les 6 broches (D2–D4, D9–D11) et les courants dans le moteur
- ✓ Coût zéro (Proteus est disponible gratuitement pour étudiants/enseignants)
- ✓ Absence de risque : pas d'électrocution, pas de destruction de composants chers

Expérimentation – Prototype physique (chapitre IV) :

- Arduino Mega + ESC 50A (boîtier commercial unique, plus compact)
- L'ESC 50A encapsule en interne les 3 drivers + 6 MOSFETs + logique de commutation
- Commande simplifiée : Arduino envoie un seul signal PWM (1100–1900 µs) à l'ESC ; aucun calcul de commutation six pas nécessaire.

Avantages pratiques : compacité, fiabilité confirmée, protection thermique intégrée, feedback BEMF natif

Défi : comprendre le fonctionnement interne de l'ESC (boîte noire pour l'utilisateur).

III.7.3. Résultats de simulation

Interface utilisateur :

- ✓ Écran de démarrage affiche correctement (FAC. SCI & TECH, DEPT. ELEC & TEL)

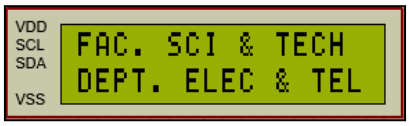


Figure III. 8: Écran de démarrage lors de l'exécution de la simulation sous Proteus.

- ✓ Séquence de saisie des paramètres fonctionne (navigation par clavier 4×4)

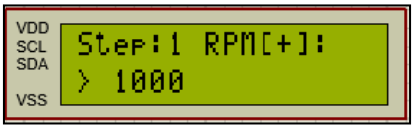


Figure III.9: Écran de saisie des paramètres via clavier matriciel 4×4.

- ✓ Affichage en temps réel de la vitesse RPM, du numéro d'étape et du temps restant

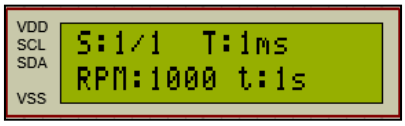


Figure III.10: Écran affichant l'étape en cours et le temps restant.

- ✓ Arrêt d'urgence (+) décélère progressivement le moteur et retourne au menu

Signaux PWM (bloc BLDC) :

- ✓ Six signaux de commutation observés à l'oscilloscope virtuel Proteus
- ✓ Déphasage 60° bien visible entre chaque phase (commutation triphasée 120° mécanique)
- ✓ Rapport cyclique varie progressivement avec la vitesse cible
- ✓ Temps mort 10 µs bien respecté entre transitions (pas de court-circuit détecté)

Signaux PWM du moteur BLDC pour différentes consignes de vitesse (1000, 2500 et 5000 tr/min) observés sous simulation Proteus :

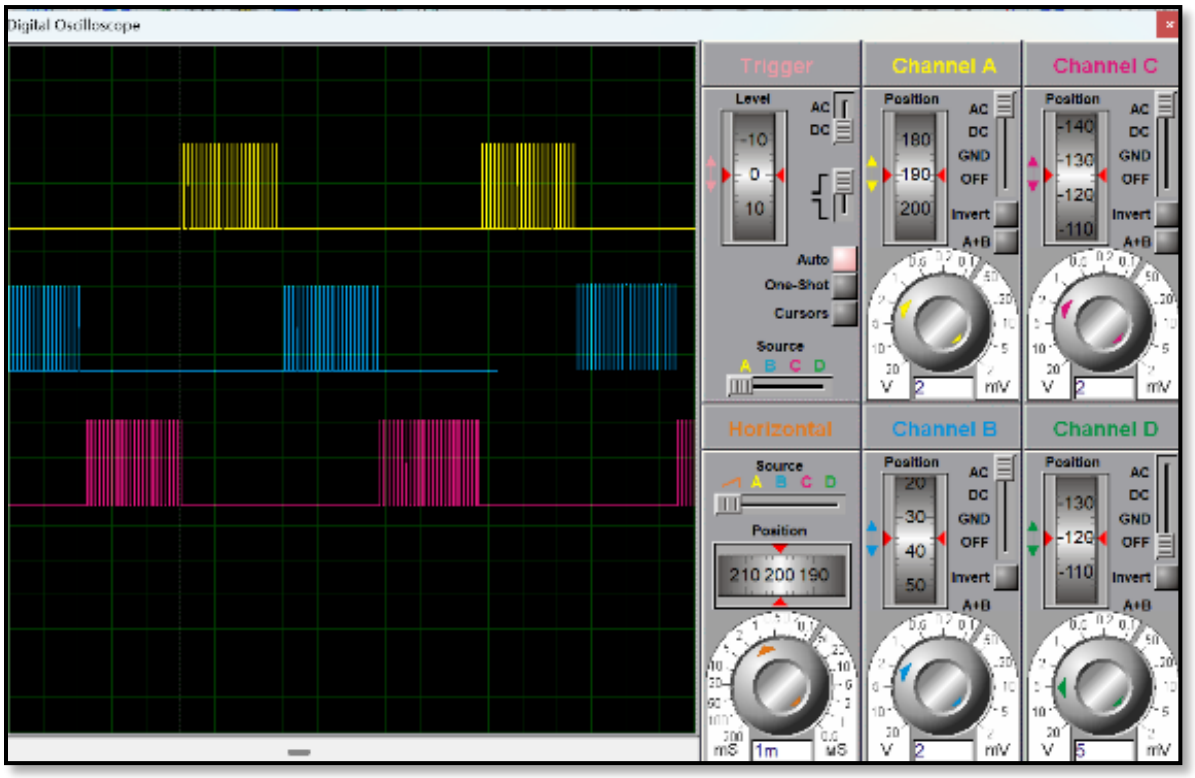


Figure III. 11: Signaux PWM du moteur BLDC à une vitesse de 1000 tr/min observés sous simulation Proteus.

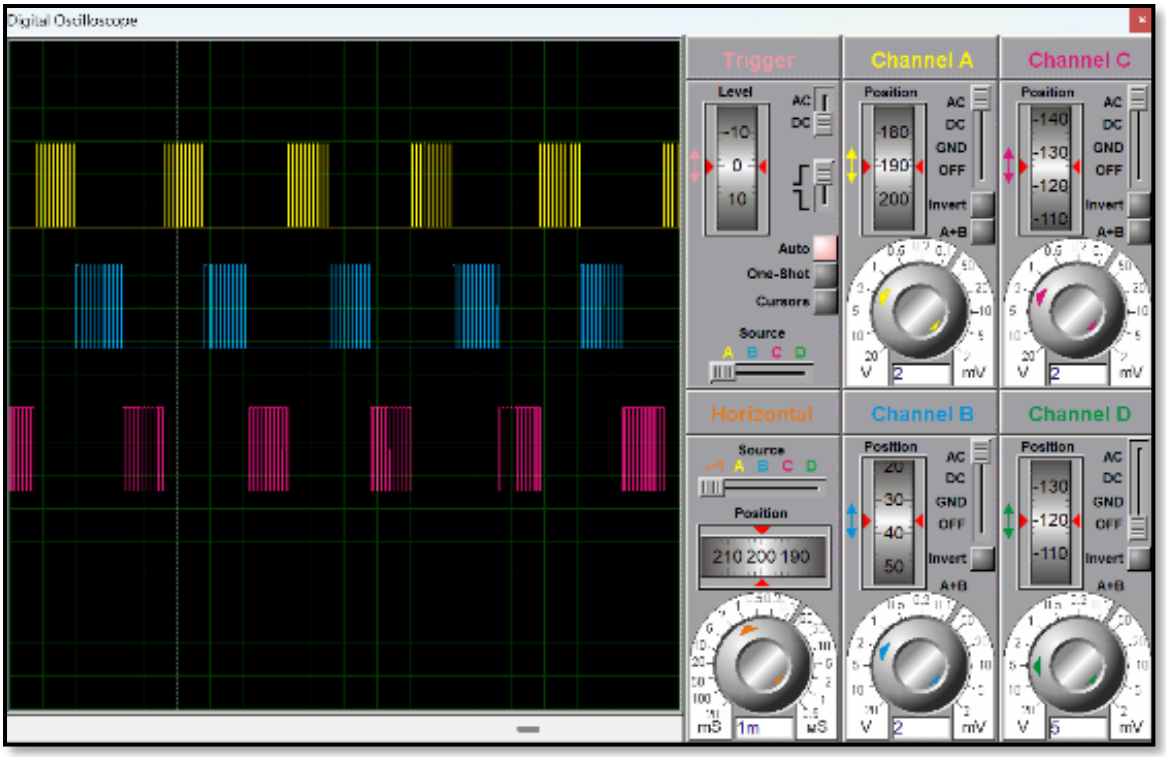


Figure III.12: Signaux PWM du moteur BLDC à une vitesse de 2500 tr/min observés sous simulation Proteus.

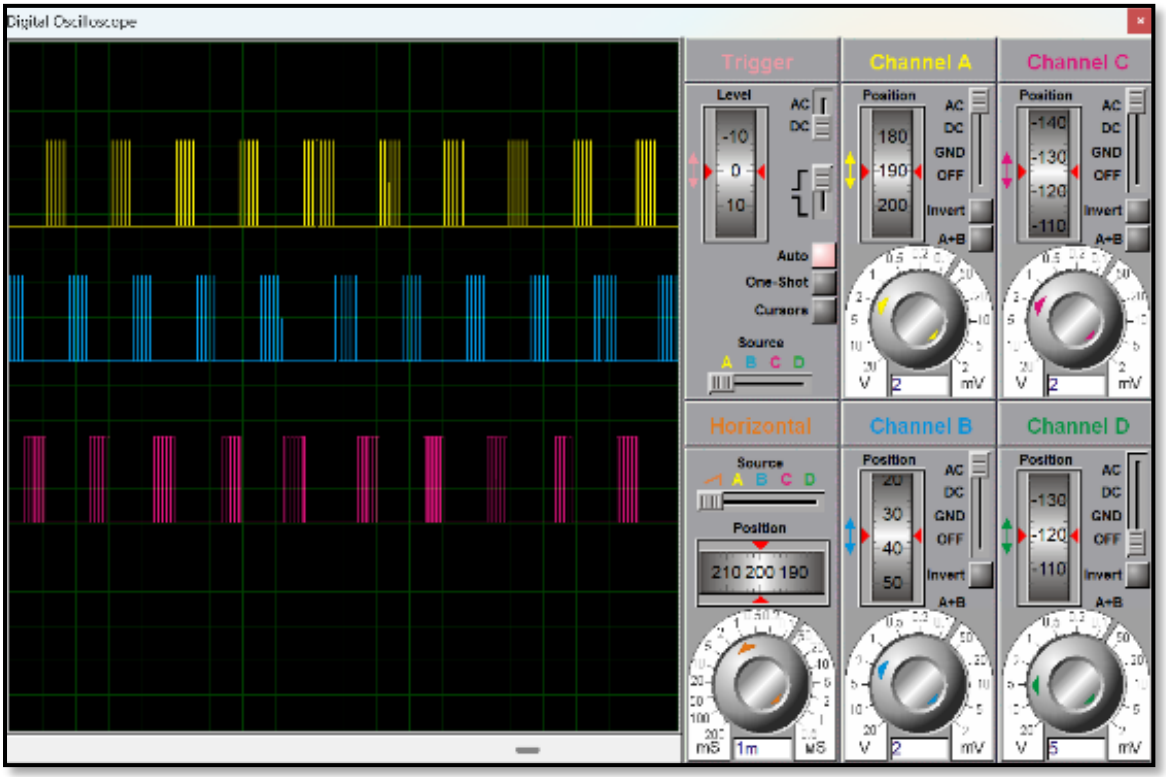


Figure III. 13: Signaux PWM du moteur BLDC à une vitesse de 5000 tr/min observés sous simulation Proteus.

- L'analyse comparative des trois figures de simulation permet d'observer le comportement des trois signaux PWM de la partie supérieure (High-Side) commandés par le driver :
  - Figure III.11 (à 1000 tr/min) : Les impulsions PWM présentent une largeur minimale (Rapport cyclique faible), ce qui limite la valeur moyenne de la tension appliquée aux phases du moteur à basse vitesse.
  - Figure III.12 (à 2500 tr/min) : On observe un élargissement du temps de l'impulsion (Rapport cyclique moyen) proportionnellement à l'augmentation de la vitesse afin d'injecter une puissance électrique supérieure.
  - Figure III.13 (à 5000 tr/min) : À la vitesse maximale, les impulsions atteignent leur largeur maximale (Rapport cyclique proche de 100%), appliquant ainsi la totalité de la tension d'alimentation pour générer le couple maximal.

  Plus la vitesse de rotation augmente, plus le rapport cyclique (Duty Cycle) s'élargit et la fréquence de commutation s'élève, augmentant ainsi la tension moyenne (V_{moy}) requise pour réguler le régime du Spin-Coating.

Séchage :

- ✓ Capteur NTC simulé par résistance variable : la température affichée change progressivement
- ✓ Hystérésis chauffage observable : chauffage ON/OFF selon seuils ±3/-2°C
- ✓ Décompte temps fonctionne correctement
- ✓ État DRY_COMPLETE atteint après délai programmé

III.7.4. Limitations de la simulation

Malgré les résultats positifs, la simulation Proteus présente certaines limitations importantes :

- Modèle BLDC de Proteus : approximation très simplifiée, ne reproduit pas la vraie BEMF (back-EMF), la dépendance couple-courant, ni les phénomènes transientes
- Pas de modélisation thermique des MOSFETs : les pertes en conduction (I^2R) ne sont pas calculées
- Capteur NTC simulé par simple résistance variable : pas de dynamique thermique réelle (constante de temps, retard)
- Absence de capteurs Hall natifs : la simulation ne peut pas démontrer le contrôle en boucle fermée par capteurs Hall
- Tests complets nécessaires sur prototype physique : validation du démarrage réel du moteur, mesure de la vitesse réelle, consommation d'énergie, échauffement, bruit acoustique.

III.8. Spécifications finales du système

- **Spin-Coating**
  - ✓ Plage de vitesse : 100–5000 tr/min
  - ✓ Nombre d'étapes programmables: jusqu'à 4
  - ✓ Contrôle d'étape : vitesse (RPM), durée (s), accélération (RPM/s) – indépendants
  - ✓ Interface utilisateur : clavier matriciel 4×4 + LCD 16×2 I2C
  - ✓ Arrêt d'urgence : clavier (+) ou bouton STOP (pin 18)
  - ✓ Affichage temps réel : vitesse, étape courante, temps restant
- **Séchage (Drying System)**
  - ✓ Plage de température: 30–200°C
  - ✓ Résolution thermique : ±2–3°C (après filtrage)
  - ✓ Durée séchage programmable : 1–999 secondes
  - ✓ Gestion support : automatique (éjection, rétraction via moteur DC + fins de course)
  - ✓ Commande manuelle : bouton switch (pin 16)
  - ✓ Chauffage : TRIAC SOC1044 + plaque résistive, contrôle hystérésis ±3/-2°C
  - ✓ Sécurité thermique : cutoff automatique si capteur NTC défaillant
- **Microcontrôleur et électronique**
  - ✓ Processeur : Arduino Mega 2560 (ATmega2560)
  - ✓ Fréquence horloge : 16 MHz
  - ✓ Mémoire flash : 256 Ko (programme)
  - ✓ SRAM : 8 Ko (variables)
  - ✓ Sorties PWM : 15 (dont 6 pour commutation BLDC, 1 pour chauffage, 1 pour buzzer)
  - ✓ Entrées analogiques : 16 (ADC 10-bit, dont 1 pour NTC)
  - ✓ Broches E/S numériques : 54 (dont entrées fins de course, boutons, sorties moteur DC)

Conclusion

Ce chapitre a présenté en détail la conception, l'architecture matérielle et la simulation du système complet de revêtement par centrifugation (Spin-Coater) associé à un système de séchage (drying system). La distinction entre la simulation Proteus (pont triphasé détaillé avec drivers IR2101 et MOSFETs) et l'expérimentation (ESC 50A commercial) a été clairement établie. Chaque approche offre ses avantages propres : la simulation fournit une compréhension pédagogique approfondie des mécanismes de commutation, tandis que le prototype expérimental offre une solution pratique, compacte et fiable.

L'architecture matérielle retenue (Arduino Mega 2560 comme CPU, drivers/MOSFETs pour la simulation, ESC pour l'expérimentation) offre un excellent compromis entre simplicité de réalisation, coût raisonnable et performances suffisantes pour les applications de revêtement par centrifugation de couches minces.

La stratégie de commutation trapézoïdale six pas (Six-Step Trapezoidal Commutation) a été programmée pour le contrôle précis et rapide de la vitesse du moteur BLDC sur toute la plage de 100 à 5000 tr/min, avec une accélération progressive paramétrable.

Le système de séchage associé (avec capteur NTC filtré, contrôle thermique hystérétique, gestion mécanique automatique du support et interface utilisateur simple) constitue une solution complète et robuste pour les applications industrielles et de recherche.

Les résultats de simulation Proteus valident le comportement logiciel, la génération correcte des signaux PWM triphasés, et la gestion fiable de la machine à états. Ces résultats cohérents et prometteurs ouvrent la voie à la réalisation d'un prototype physique dont les tests expérimentaux et la validation pratique feront l'objet du chapitre IV.

Chapitre IV

Réalisation matérielle du système Spin-Coating intégré au séchage

Introduction

Après avoir consacré le chapitre précédent à l'étude de la conception et à la simulation virtuelle du système, ce quatrième chapitre constitue le pont essentiel reliant la théorie à la pratique. Nous nous concentrons ici sur la réalisation matérielle et mécanique du dispositif de dépôt par centrifugation (Spin- Coating) intégré au système de séchage. Le passage de l'environnement de simulation à la réalité physique impose des contraintes techniques et face à l'indisponibilité des transistors (MOSFETs) et des drivers adéquats sur le marché, nous les avons remplacés par un contrôleur de vitesse électronique commercial (ESC), qui s'est avéré être une alternative pratique et efficace pour assurer le bon fonctionnement du moteur au sein du le prototype réel.

Sur cette base, ce chapitre détaille rigoureusement toutes les étapes de construction du système physique, à commencer par la nomenclature des pièces et l'intégration des connexions électriques à la carte Arduino Mega 2560, jusqu'à la conception de la structure mécanique et la distribution des composants. Ensuite, nous étudierons le principe de fonctionnement à travers les cycles automatisés de centrifugation et de séchage thermique, appuyé< par l'organigramme général qui résume la logique de contrôle programmée.

Enfin, ce chapitre se clôturera par une présentation des principaux défis et difficultés techniques rencontrés, ainsi que les solutions pratiques adoptées pour les surmonter et aboutir à un prototype fonctionnel et opérationnel.

IV.1. Réalisation du prototype du Système (Spin- Coating & Drying)

IV.1.1. Présentation des composants et outils utilisés

Afin de réaliser le prototype fonctionnel du Spin- Coating intégrant le système de séchage, un ensemble de composants électroniques, électriques et électromécaniques a été sélectionné. Le tableau suivant présente la nomenclature complète de ces composants, classés selon leur type et leur rôle fonctionnel dans le système :

Tableau IV. 1: Typologie et rôle des composants du prototype.

Composant Principal	Le Type / Catégorie	Rôle Fonctionnel dans Système
Arduino Mega 2560 (ATmega2560)	Unité de Commande Centrale (Microcontrôleur)	**Cerveau central :** il gère toutes les fonctions du système et commande les actionneurs.
Moteur Brushless (BLDC) (A2212/6T 2200KV)	Actionneur Électromécanique Principal	**Responsable de la centrifugation :** il assure une rotation rapide et stable pour obtenir des couches minces.
Contrôleur ESC 50A	Pilote de Puissance (Driver de Puissance)	**Régulateur de vitesse :** il ajuste la vitesse du moteur BLDC à partir des signaux PWM de l'Arduino.

Plaque Chauffante	Élément Chauffant (Élément Thermique)	Responsable du séchage : elle fournit la chaleur nécessaire au séchage de l'échantillon.
Circuit de régulation thermique (TRIAC BCR5PM + SOC1044)	Carte de Commande de Puissance Thermique	**Régulateur thermique :** il contrôle la mise en marche et la puissance de la plaque chauffante.
Capteur NTC	Capteur Thermique (Capteur de Température)	**Retour d'information :** il mesure la température.
Driver L298N	Pilote de Puissance (Pont en H)	**Contrôleur du moteur d'éjection :** il contrôle le sens de rotation et l'alimentation du moteur DC selon les capteurs de fin de course.
Moteur à Courant Continu (DC)	Actionneur Électromécanique Secondaire	**Responsable du mouvement automatique :** il assure l'insertion et l'éjection du support d'échantillon.
Écran LCD 16x2 I2C	Interface Homme-Machine (IHM)	**Afficheur du système :** il affiche les paramètres du cycle en temps réel.
Clavier Matriciel 4x4	Interface à Homme-Machine (IHM)	**Panneau de configuration :** il permet de saisir les paramètres du processus.
Boîtier d'Alimentation	Gestion et Distribution d'Énergie	**Source d'énergie :** il fournit des tensions stables (12V et 5V) à partir du 220V.

IV.1.2. Câblage et Intégration des Composants

Après validation du schéma électrique et vérification de la compatibilité de tous les composants, nous avons procédé au câblage réel du système. Tous les composants ont été reliés à la carte Arduino Mega 2560, qui constitue le cerveau central du système, selon une distribution organisée optimisée qui garantit la sécurité de fonctionnement et la facilité de maintenance. Cette section décrit en détail les connexions de chaque unité fonctionnelle.

IV.1.2.1. Connexion de la carte Arduino Mega 2560 (ATmega2560)

La carte Arduino Mega 2560 constitue le cerveau central du système, alimentée en 5V via le BEC interne de l'ESC 50A. La distribution de ses broches est la suivante :

- **Broche 10 :** Signal PWM de commande du moteur BLDC via l'ESC 50A.
- **Broches 9, 8, 7, 6** : Lignes du clavier matriciel 4×4.
- **Broches 5, 4, 3, 2** : Colonnes du clavier matriciel 4×4.

- **Broche 11** : Connecté à la base du transistor via une résistance de 120 Ω pour l'activation du buzzer.
- **Broche 12 :** IN1 du L298N (sens éjection).
- **Broche 14 :** IN2 du L298N (sens insertion).
- **Broche 13 :** Fin de course entrée (INPUT_PULLUP).
- **Broche 17 :** Fin de course sortie (INPUT_PULLUP).
- **Broche 16 :** Bouton manuel de commande du support (INPUT_PULLUP).
- **Broche 15 :** Commande de la plaque chauffante via résistance 270Ω → SOC1044 → TRIAC BCR5PM.
- **Broche 18 :** Bouton d'arrêt d'urgence.
- **A0 :** Signal du capteur NTC via pont diviseur de tension (R=220kΩ ±5%).
- **SDA (Broche 20), SCL (Broche 21) :** Communication I2C avec l'afficheur LCD 16×2.
- **RESET :** Connecté au bouton de réinitialisation, l'autre borne reliée au GND.

IV.1.2.2. Connexion du système de commande du moteur BLDC (ESC 50A)

L'ESC 50A a été choisi pour commander le moteur BLDC en remplacement des MOSFETs et des drivers séparés, Ce choix est justifié par l'indisponibilité de ces derniers, ainsi que par la simplicité de mise en œuvre qu'offre un simple signal PWM de l'Arduino pour le contrôle de la vitesse. Les connexions réalisées sont les suivantes :

- **Signal PWM :** La broche10 de l'Arduino est connectée à l'entrée signal de l'ESC, dans la plage (1100 – 1900 µs).
- **Alimentation :** L'ESC est connecté directement à la source d'alimentation 12 V
- **Les lignes 5V (BEC) et GND commun :** La ligne 5V du BEC alimente directement l'Arduino, tandis que le GND commun unifie la référence électrique pour stabiliser le signal PWM du moteur.
- **Connexion Moteur :** Les trois fils du moteur BLDC (phases A, B, C) sont connectés directement aux trois sorties de l'ESC.

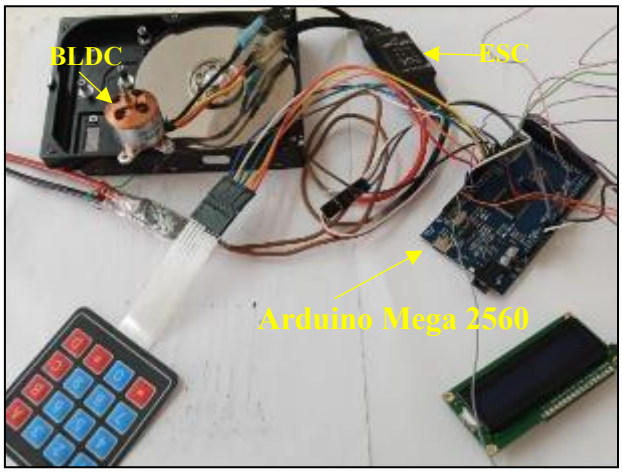


Figure IV.1 : Connexion de l'ESC 50A avec le moteur BLDC.

IV.1.2.3. Connexion du moteur à courant continu et du Driver L298N

Un moteur à courant continu est utilisé pour contrôler le mouvement du support (insertion et éjection), commandé via le driver L298N connecté à l'Arduino. Les connexions réalisées sont les suivantes :

- **IN1 (Broche 12 de l'Arduino)** : Signal de commande du sens éjection.
- **IN2 (Broche 14 de l'Arduino)** : Signal de commande du sens insertion.
- **OUT1 / OUT2 :** Connectés directement aux fils du moteur à courant continu.
- **Alimentation L298N :** 5V depuis le boîtier d'alimentation → VCC et 5V depuis l'Arduino, avec GND commun.

Le L298N fonctionne comme un pont en H permettant l'inversion du sens de rotation du moteur, assurant ainsi un contrôle complet du mouvement du support dans les deux directions.

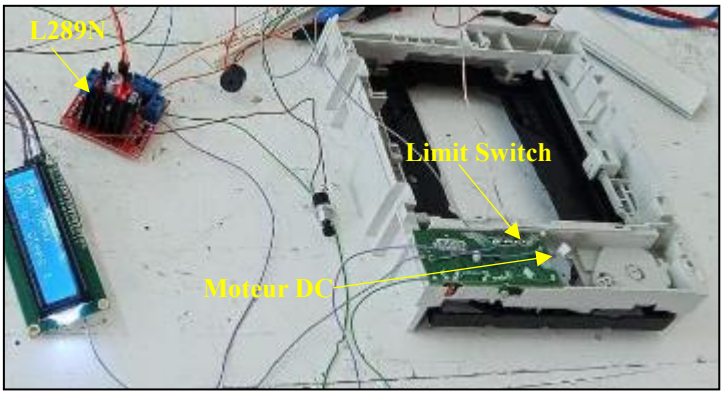


Figure IV.2 : Connexion du moteur DC avec le Driver L298N.

IV.1.2.4. Connexion du circuit thermique (TRIAC BCR5PM + SOC1044 + capteur NTC)

Le circuit thermique se compose de deux parties principales : le circuit de commande du chauffage via le TRIAC, et le circuit de mesure de température via le capteur NTC. Il est à noter que ce circuit a été réalisé sous forme de carte PCB fabriquée manuellement, en suivant les étapes suivantes :

1. Conception du schéma électrique sur ordinateur.
2. Impression du schéma sur papier transfert.
3. Transfert du schéma sur substrat cuivré par voie thermique.
4. Gravure chimique à l'aide d'une solution de perchlorure de fer ($FeCl_3$) pour éliminer le cuivre non protégé.
5. Perçage et soudure des composants sur la carte.

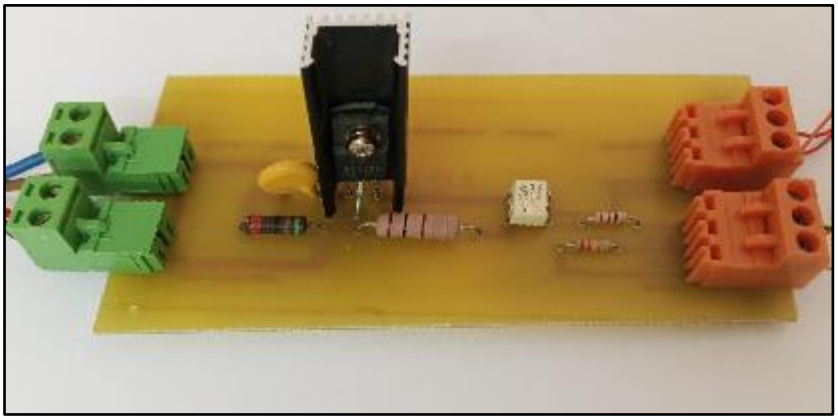


Figure IV.3 : Carte PCB du circuit thermique.

Partie I : Circuit de commande du chauffage

- Broche 15 de l'Arduino → résistance 270 Ω → broche 1 du SOC1044.
- Broche 2 du SOC1044 → GND Arduino.
- Broche 4 du SOC1044 → Gate du TRIAC BCR5PM.
- Broche 6 du SOC1044 → MT2 du TRIAC BCR5PM via résistance 100Ω/1W.
- MT1/MT2 du TRIAC → connectés à la plaque chauffante et boîtier d'alimentation (220V/50Hz).
- Snubber : condensateur 10nF/1KV + résistance 50Ω/1W en parallèle sur MT1/MT2 pour la protection du TRIAC.

Partie II : Circuit de mesure de température (pont diviseur de tension)

- 5 V Arduino → résistance 220 kΩ ±5% → nœud A0 de l'Arduino → capteur NTC → GND Arduino.
- La lecture analogique sur A0 est convertie en valeur de température

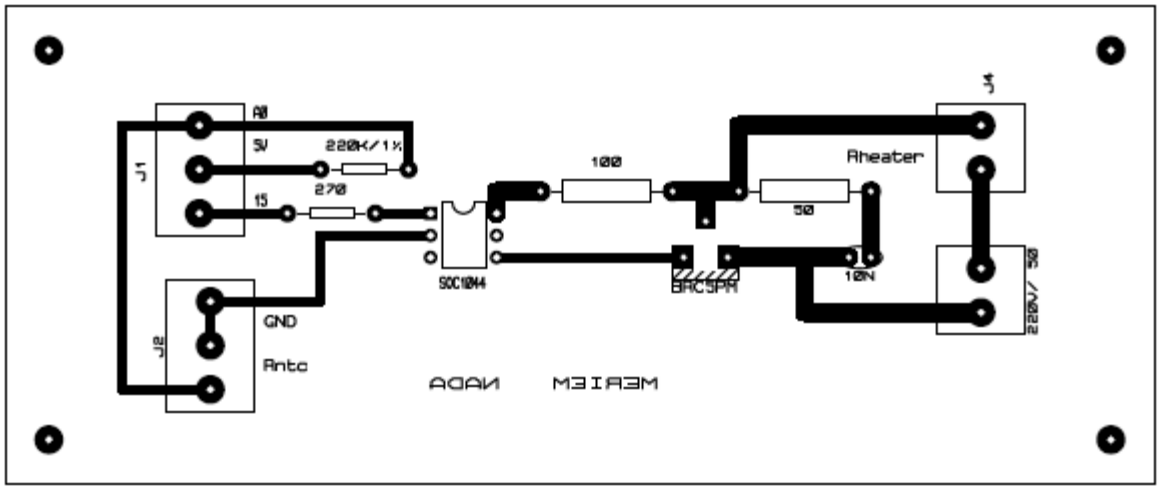


Figure IV.4: Schéma du circuit de chauffage et de mesure de température

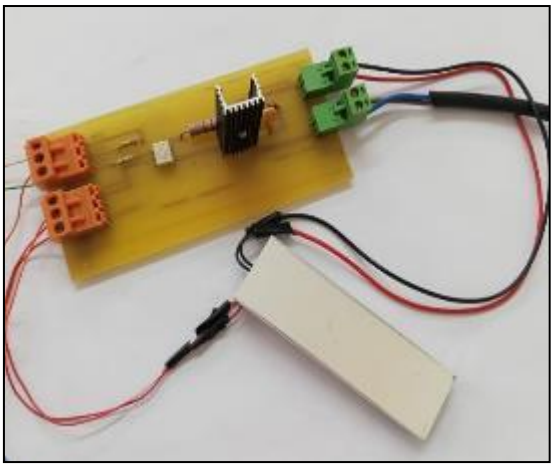


Figure IV.5: Connexion du circuit de chauffage et de mesure de température.

IV.1.2.5. Connexion de l'interface homme-machine (LCD + Clavier 4×4 + Buzzer)

L'interface homme-machine se compose de trois éléments principaux :

- **Partie I : Afficheur LCD 16×2 (I2C)**
  - SDA (Broche 20 de l'Arduino) : Ligne de données I2C.
  - SCL (Broche 21 de l'Arduino) : Ligne d'horloge I2C.
  - VCC : Connecté au 5 V de l'Arduino.
  - GND : Connecté au GND commun.
  - Adresse I2C par défaut : 0x27.

- **Partie II : Clavier matriciel 4×4**
  - Broches 9, 8, 7, 6 de l'Arduino : Lignes du clavier.
  - Broches 5, 4, 3, 2 de l'Arduino : Colonnes du clavier.
  - Permet la saisie des paramètres Spin (vitesse, durée, accélération) et des paramètres de séchage (température, durée), avec (#) pour valider et (*) pour annuler.

- **Partie III : Buzzer**
  - Broche 11 de l'Arduino : Connectée à la base du transistor 2N2222 via une résistance de 120 Ω.
  - Borne (+) du buzzer : Connectée au 5 V.
  - Borne (-) du buzzer : Connectée au collecteur du transistor.
  - Émetteur du transistor : Connecté au GND.
  - Le transistor fonctionne comme un interrupteur électronique pour activer le buzzer à la fin de chaque étape ou en cas d'erreur.

IV.1.2.6. Connexion des dispositifs d'arrêt et de contrôle

- **Partie I : Fin de course (Limit Switch)**

Le Limit Switch dispose de trois bornes :

- COM : Borne commune.
- NO (Normally Open) : Ouvert en position normale.
- NC (Normally Closed) : Fermé en position normale.

Le câblage utilisé est le suivant :

- COM → connecté à la broche Arduino.
- NO → connecté au GND.
- La borne NC n'est pas utilisée.

Avec ce câblage et INPUT_PULLUP, la valeur est HIGH en position normale et passe à LOW lors de l'activation du Limit Switch. Il est connecté aux broches :

- **Broche** 13 : Détection de le support complètement rentrée.
- **Broche** 17 : Détection de le support complètement éjectée.

- **Partie II : Bouton de commande manuelle de la nacelle**
  - Bouton manuel permettant à l'opérateur de contrôler l'insertion et l'éjection du support manuellement.

- Lors de l'appui, la valeur passe à LOW, signalant au programme de changer le sens de déplacement du support.
- Câblage : une borne connectée à la broche 16, l'autre au GND.

➢ **Partie III : Bouton d'arrêt d'urgence**

- **Bouton d'arrêt d'urgence** : Arrête immédiatement le système lors de l'appui, quelle que soit la phase de fonctionnement en cours.
- Câblage : une borne connectée à la broche 18, l'autre au GND.
- Lors de l'appui, la valeur passe à LOW, ce qui arrête tous les moteurs et déclenche une alarme sonore immédiate.

➢ **Partie IV : Bouton de réinitialisation (Reset)**

- La broche RESET de l'Arduino est connectée au bouton de réinitialisation.
- L'autre borne est connectée au GND.
- Lors de l'appui, le programme redémarre depuis le début.

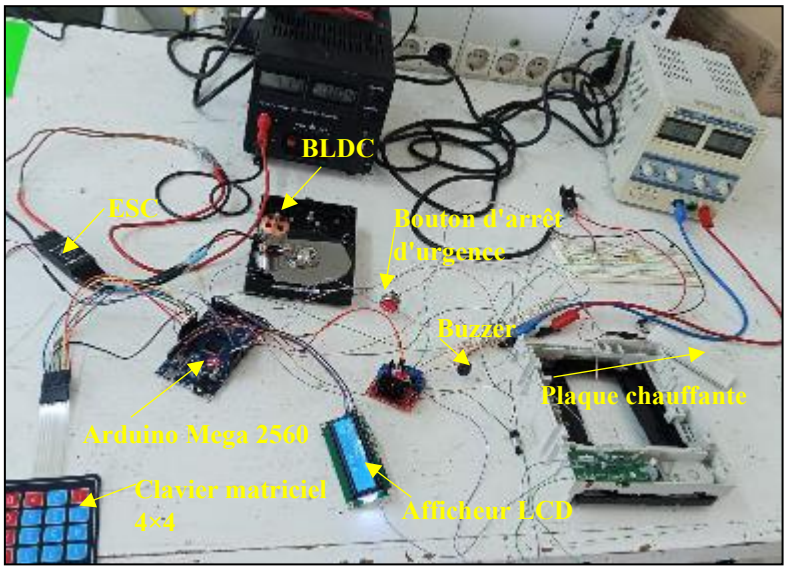


Figure IV.6: Vue d'ensemble du câblage et de l'intégration des composants du système.

IV.1.3. Structure Mécanique et Distribution des Composants

Après la validation du schéma électrique, la phase suivante a consisté à réaliser l'assemblage mécanique du prototype. Le boîtier principal a été fabriqué manuellement à partir de plaques plastiques, découpées et assemblées, puis recouvertes de plaques d'aluminium pour assurer la rigidité mécanique et la protection des éléments internes. Comme illustré à la figure IV.7.



Figure IV. 7: Boîtier et structure externe du système.

La figure IV.8 illustre les dimensions du boîtier externe du dispositif.

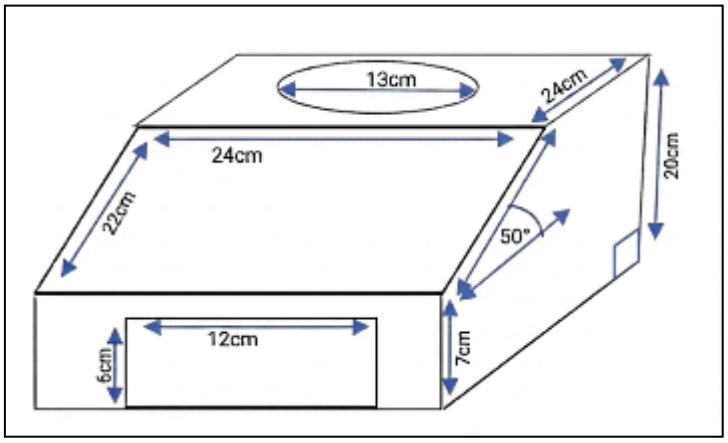


Figure IV.8: Dimensions du boîtier externe.

La distribution des composants sur le boîtier est organisée de la manière suivante :

- **Face Supérieure (Chambre de Centrifugation) :**

Elle intègre une cuve circulaire en aluminium usiné dotée de rebords pour récupérer les projections de solution (comme illustré sur la Figure IV.9). Au centre de cette cuve est fixé rigidement le moteur Brushless (BLDC), surmonté d'un disque tournant dont la fonction principale est de protéger le moteur contre toute infiltration ou éclaboussure de la solution chimique.

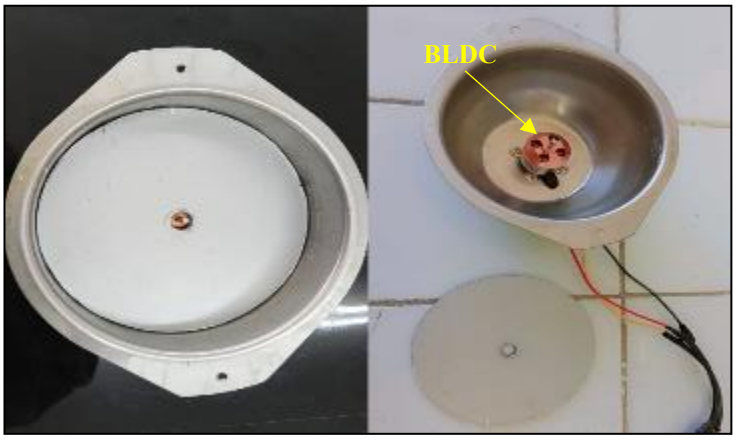


Figure IV.9: Cuve et moteur BLDC.

- **Face Inclinée (Interface Homme-Machine)**

Elle regroupe les éléments d'interaction avec l'utilisateur (comme illustré sur la Figure IV.10) : l'écran LCD 16x2 I2C, le clavier matriciel 4x4 pour la saisie des données, le bouton d'arrêt d'urgence, le bouton de réinitialisation (Reset), l'interrupteur général pour la mise en marche du systéme, ainsi que le buzzer d'alerte sonore.



Figure IV.10: Face inclinée du système.

- **Face Avant (Système d'insertion et d'éjection du support)**

Elle contient une ouverture dédiée au mouvement du support d'échantillon, sur lequel est intégrée la plaque chauffante pour le séchage (comme illustré à la Figure IV.11), ainsi qu'un bouton poussoir manuel permettant à l'opérateur de commander l'insertion du support.

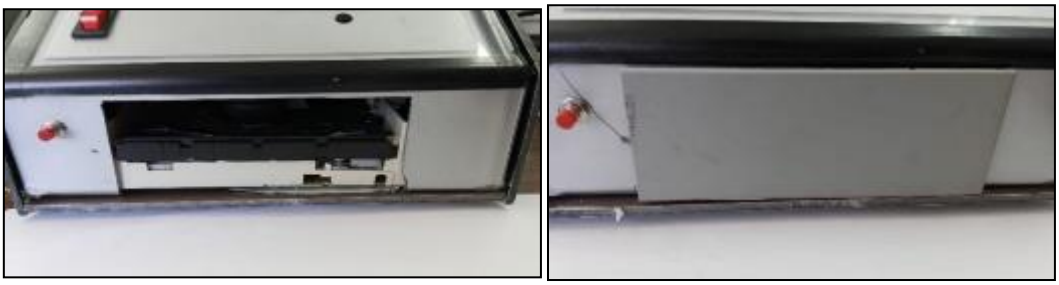


Figure IV.11 : Face avant du système.

➢ **Compartiment Interne (Chambre Électronique)**

Chambre Électronique muni de trous de ventilation sur les côtés pour assurer le refroidissement par air (comme illustré sur la figure IV.12), il abrite les composants de commande et de puissance suivants, distribués de manière optimisée :

- **La carte Arduino Mega 2560 :** Fixée sur le côté pour faciliter l'accès, elle constitue le cerveau central qui contrôle l'intégralité des fonctionnalités du système.
- **Le driver L298N :** Installé à côté de la carte Arduino, il est dédié à la commande du moteur à courant continu (DC) qui gère l'insertion et l'éjection du support d'échantillon.
- **Le contrôleur ESC 50A :** Fixé directement sous le moteur Brushless (BLDC) pour réguler sa vitesse de rotation.
- **La carte de puissance thermique :** Connectée directement à la plaque chauffante et au capteur de température (Capteur NTC) pour assurer l'activation et la régulation précise de la température.
- **Le boîtier d'alimentation :** Relié directement au secteur via un câble d'alimentation ; il joue le rôle de convertisseur et de répartiteur de puissance, fournissant une tension de 12Và l'ESC et 5V au driver L298N, tout en transmettant la tension de 220V à la carte de puissance thermique.

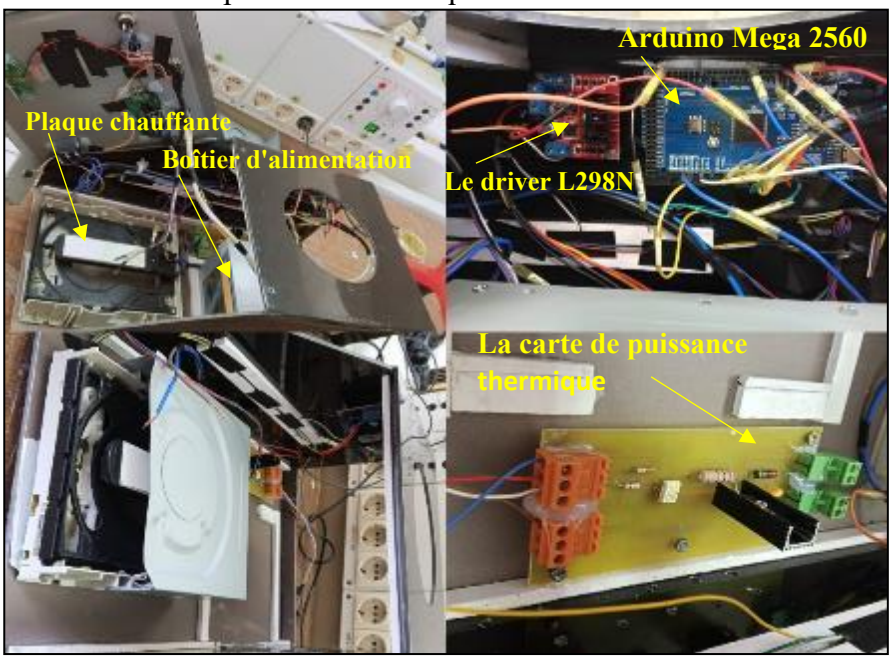


Figure IV.12: Compartiment interne (chambre électronique du système).

IV.1.4. Présentation du prototype finalisé du système

Après avoir validé le bon fonctionnement de l'ensemble des circuits électroniques, le câblage complet ainsi que la distribution interne des modules, nous avons procédé à l'assemblage final du système. Tous les composants de commande et de puissance ont été soigneusement intégrés et sécurisés à l'intérieur du boîtier principal. Cette étape de finition permet d'obtenir une machine compacte, ergonomique et entièrement protégée contre les risques d'infiltration

chimique ou de surchauffe. La figure suivante montre l'aspect global et le rendu final de notre système de Spin-Coating avec son unité de séchage intégrée.

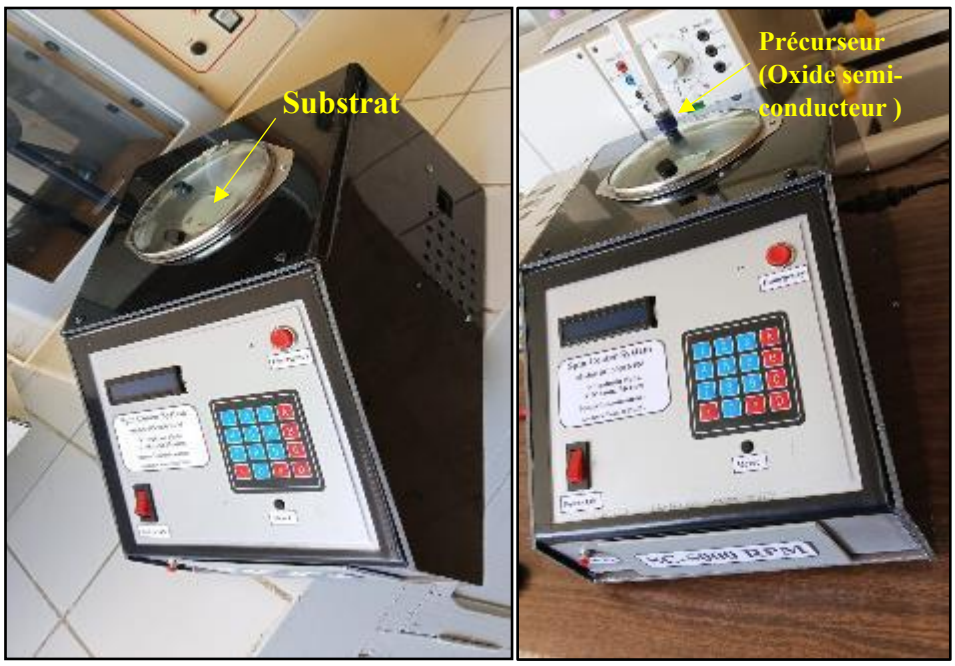


Figure IV.13 : Prototype finalisé du système (Spin-Coater & Drying).

IV.2. Principe de fonctionnement du système

Le système fonctionne selon une séquence logique et intégrée, articulée autour de quatre étapes principales interdépendantes, allant de l'initialisation jusqu'à l'achèvement du cycle de séchage. Cette séquence garantit un contrôle précis de tous les paramètres du processus, tout en offrant la possibilité d'une intervention manuelle à tout moment.

IV.2.1. Initialisation et interface utilisateur

Au démarrage, le microcontrôleur Arduino Mega 2560 initialise automatiquement tous les modules du système. Cette procédure comprend les étapes suivantes :

- Initialisation de l'afficheur LCD 16×2 via l'interface I2C et affichage de l'écran de démarrage.
- Initialisation du clavier matriciel 4×4.
- Initialisation du moteur BLDC via l'ESC 50A.
- Initialisation du système de séchage avec ses composants thermiques et mécaniques.



Figure IV.14 : Écran de démarrage affiché sur le LCD lors de la mise sous tension**.**

Après l'initialisation, le système passe au menu principal où l'utilisateur saisit les paramètres de dépôt via le clavier :

- Nombre d'étapes de dépôt (de 1 à 4)
- Vitesse pour chaque étape : de 100 à 5000 RPM
- Durée pour chaque étape : de 0 à 60s
- Taux d'accélération pour chaque étape : de 100 à 1000 RPM/s

Chaque valeur saisie s'affiche immédiatement sur le LCD pour vérification avant confirmation. En cas d'erreur, l'utilisateur peut appuyer sur la touche (D) pour revenir à l'étape précédente, ou sur la touche (*) pour effacer le dernier chiffre saisi.



Figure IV.15 : Saisie des paramètres via le clavier matriciel.



Figure IV.16 : Affichage des paramètres sur le LCD avant confirmation.

IV.2.2. Exécution du cycle de centrifugation

Après validation de l'ensemble des paramètres, le système entre dans l'état d'exécution (RUNNING) et exécute automatiquement les étapes programmées de manière séquentielle. Cette phase se caractérise par :

- Une montée progressive de la vitesse du moteur BLDC selon la rampe d'accélération définie, garantissant un démarrage sans à-coups mécaniques.
- Un affichage continu sur le LCD de la vitesse actuelle en RPM, du numéro de l'étape en cours et du temps restant en secondes.
- Une transition automatique d'une étape à l'autre à l'expiration de chaque durée programmée.



Figure IV.17 : Affichage de l'état d'exécution avec la vitesse et l'étape en cours sur le LCD.

Le système dispose de deux moyens d'arrêt d'urgence durant le cycle de centrifugation :

- Arrêt via le clavier : L'appui sur la touche (*) déclenche un ralentissement progressif du moteur BLDC jusqu'à l'arrêt complet, puis le retour au menu principal.
- Arrêt via le bouton externe : L'appui sur le bouton d'arrêt d'urgence intégré à l'interface du système produit le même effet immédiatement, avec affichage d'un message de confirmation sur le LCD.

Cette fonctionnalité est indispensable pour garantir la sécurité de l'opérateur et préserver l'intégrité de l'échantillon en cas d'urgence.



Figure IV.18: Affichage du message d'arrêt d'urgence sur le LCD.

IV.2.3. Cycle de séchage

À l'issue du cycle de centrifugation, le système affiche sur le LCD une question proposant à l'utilisateur de lancer la phase de séchage :



Figure IV.19 : Affichage de la question de démarrage du séchage sur le LCD.

L'appui sur (1) démarre la phase de séchage, tandis que l'appui sur (2) ramène le système directement au menu principal sans séchage. En cas d'acceptation, le système demande la saisie des paramètres suivants :

- Température cible : de 30 à 200°C
- Durée de séchage : de 1 à 999s



Figure IV.20 : Saisie des paramètres de séchage sur le LCD**.**

Le cycle de séchage se déroule en trois états successifs bien définis :

Premier état – Éjection (DRY_EJECT) :

- Éjection automatique du support d'échantillon via le moteur DC.
- Émission d'un signal sonore par le buzzer pour signaler que le support est en position éjectée.
- Attente de l'action de l'utilisateur pour déposer l'échantillon sur le support.
- Appui sur le bouton de confirmation pour rentrer le support et passer à la phase de chauffage.



Figure IV.21 : Support d'échantillon en position éjectée**.**

Deuxième état – Chauffage (DRY_HEATING) :

- Fermeture automatique du support lors de la détection par le capteur de fin de course.
- Démarrage progressif du chauffage jusqu'à atteindre la température cible.
- Affichage continu de la température actuelle et du temps restant sur le LCD.



Figure IV.22 : Affichage de la température et du temps restant durant le séchage.

Troisième état – Fin (DRY_COMPLETE) :

- Éjection automatique du support à l'expiration du temps de séchage
- Émission d'un signal sonore par le buzzer pour signaler l'achèvement du processus
- Attente de l'action de l'utilisateur pour retirer l'échantillon du support
- Appui sur le bouton de confirmation pour rentrer le support et revenir au menu principal



Figure IV.23 : Affichage de l'achèvement du cycle de séchage sur le LCD.

IV.2.4. Organigramme général du système

L'organigramme présenté à la figure IV.24 résume l'ensemble des étapes de fonctionnement du système depuis la mise sous tension jusqu'à l'achèvement du cycle complet, en illustrant les chemins de prise de décision et les points d'intervention manuelle à chaque étape.

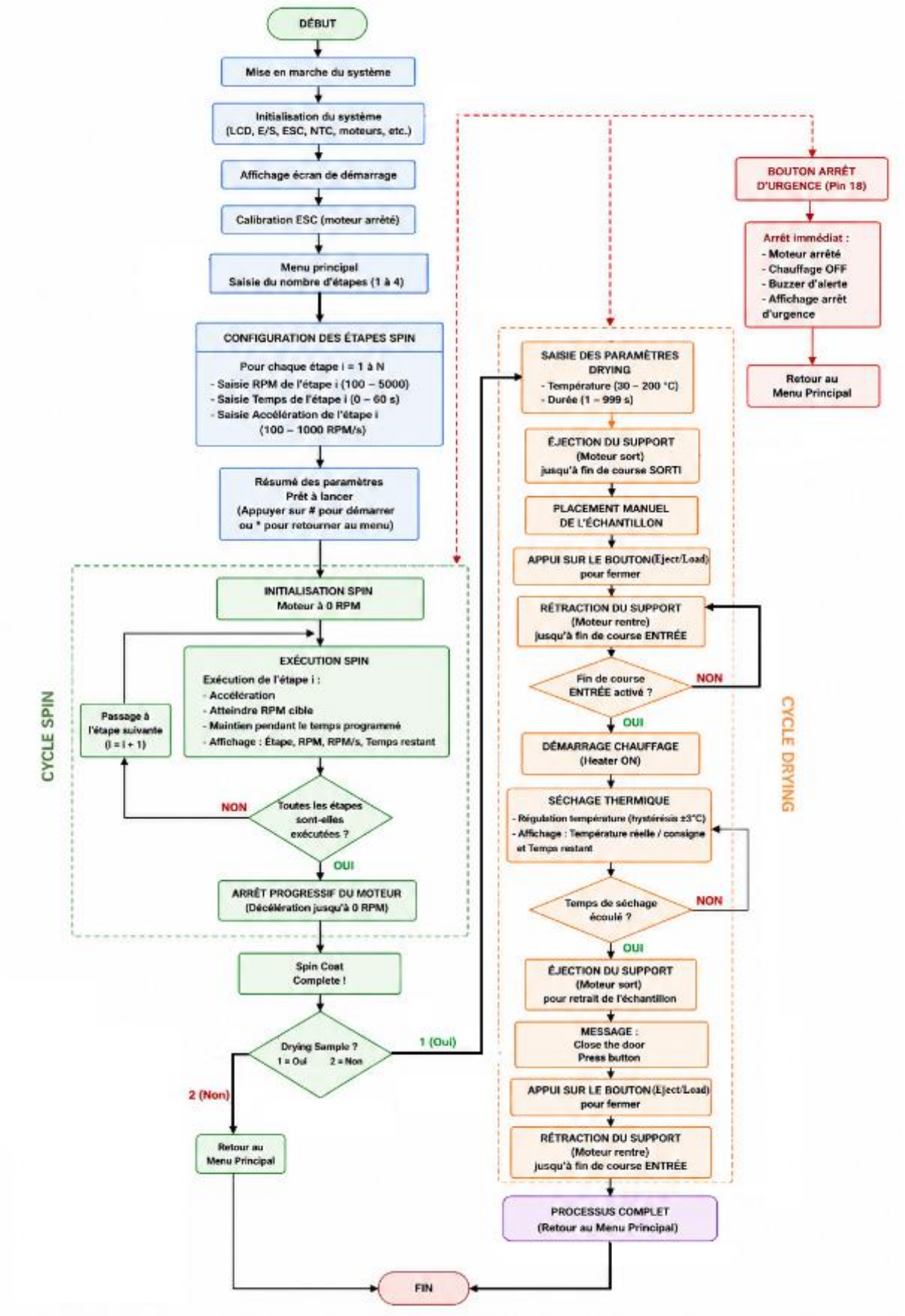


Figure IV.24 : Organigramme général du système (Spin- Coating & Drying).

IV.3. Défis techniques et solutions adoptées

La transition de l'environnement de simulation virtuelle vers la réalisation matérielle du prototype a révélé plusieurs contraintes techniques et logistiques. Afin de mener à bien ce projet, nous avons adapté nos choix initiaux et proposé des solutions pratiques :

- **Indisponibilité des composants de puissance :**

Face à l'absence des transistors MOSFETs et des drivers dédiés pour concevoir notre propre circuit de commande triphasé, nous les avons remplacés par un contrôleur de vitesse électronique commercial (ESC). Cette alternative s'est avérée être un choix compact, sécurisé et parfaitement adapté pour assurer la commutation fluide du moteur BLDC.

- **Gestion de l'isolation thermique et de la ventilation :**

Le système de séchage intégré génère une chaleur importante qui pouvait affecter les composants électroniques sensibles (tels que la carte Arduino Mega 2560 et l'afficheur LCD). Pour y remédier, nous avons séparé géométriquement la chambre de séchage et doté le boîtier de trous de ventilation latéraux associés à un ventilateur de refroidissement, appliquant ainsi un système de ventilation forcée pour évacuer l'excès de chaleur.

- **Stabilité mécanique à haute vitesse :**

Lors des phases de centrifugation rapide, les vibrations du moteur présentaient un risque pour l'homogénéité du dépôt. Ce problème a été résolu en optimisant la structure mécanique par un alignement rigoureux de l'axe de rotation et une fixation robuste du support d'échantillon.

- **Contraintes de lecture du capteur NTC et tolérance des résistances :**

En raison de l'indisponibilité d'une résistance de haute précision (±1 %) pour le diviseur de tension du capteur de température (NTC), nous avons eu recours à une résistance présentant une tolérance plus grande (±5 %), ce qui a engendré au début des erreurs de lecture dans des plages restreintes. Ce problème a été corrigé au niveau logiciel en ajustant le code et en calibrant les équations mathématiques pour obtenir des mesures stables et précises.

Ces modifications et alternatives ont permis de surmonter tous les obstacles matériels, confirmant ainsi le succès du fonctionnement global et automatisé du Spin- Coating.

Conclusion

En conclusion de ce quatrième chapitre, nous avons réussi à concrétiser, sur les plans matériel et mécanique, le prototype du système de Spin-Coating intégré à un dispositif de séchage. Cette étape a permis de passer avec succès de la simulation virtuelle à un modèle physique fonctionnel et automatisé.

Ce travail a englobé l'établissement de la nomenclature des composants, la réalisation des connexions électriques autour de la carte Arduino Mega 2560, la conception du boîtier mécanique, ainsi que l'élaboration de l'organigramme général assurant l'automatisation des cycles de centrifugation et de régulation thermique.

Malgré plusieurs contraintes techniques rencontrées, notamment l'indisponibilité de certains MOSFETs, les tolérances des résistances et les exigences liées à l'isolation électrique, les solutions alternatives adoptées, telles que l'intégration d'un ESC, l'ajout d'un système de ventilation forcée et l'optimisation du programme de commande, ont permis de surmonter efficacement ces difficultés.

Ainsi, ce prototype opérationnel valide la démarche méthodologique suivie et constitue désormais un outil fiable pour l'élaboration de couches minces uniformes. Il ouvre également la voie vers la conclusion générale ainsi qu'aux perspectives futures de ce projet.

Conclusion Générale

Le présent travail de fin d'études avait pour objectif de concevoir, simuler et réaliser un système automatisé de revêtement par centrifugation (Spin-Coating) intégrant une unité de séchage thermique, destiné au dépôt contrôlé de couches minces sur substrats. La démarche adoptée, depuis l'étude bibliographique jusqu'à la réalisation physique du prototype, a permis d'atteindre cet objectif de manière satisfaisante.

Le premier chapitre a permis d'établir les fondements théoriques nécessaires à la compréhension du domaine des couches minces, en présentant leurs propriétés, les différentes techniques de dépôt ainsi que les méthodes de caractérisation utilisées pour évaluer la qualité des couches obtenues. Cette étude bibliographique a constitué la base scientifique de l'ensemble du projet.

Le deuxième chapitre a justifié le choix du moteur à courant continu sans balais (BLDC) comme actionneur principal du système. Son étude a mis en évidence ses avantages en termes de rendement énergétique, de précision de vitesse et de fiabilité mécanique, des caractéristiques essentielles pour assurer l'homogénéité et la reproductibilité des dépôts réalisés.

Le troisième chapitre a présenté la conception détaillée du système ainsi que sa validation par simulation sous Proteus ISIS. L'architecture développée, basée sur un microcontrôleur Arduino Mega 2560, une interface utilisateur intuitive et un module de séchage thermique contrôlé, a démontré la cohérence fonctionnelle du système ainsi que la fiabilité des algorithmes de commande avant la phase de réalisation matérielle.

Le quatrième chapitre a concrétisé le passage de la simulation à la réalisation pratique du prototype. Malgré certaines contraintes liées à la disponibilité des composants électroniques sur le marché local, des solutions alternatives efficaces ont été mises en œuvre, notamment l'utilisation d'un contrôleur électronique de vitesse commercial (ESC 50A). Le prototype final est entièrement fonctionnel et assure automatiquement les cycles de centrifugation et de séchage avec affichage en temps réel des paramètres de fonctionnement.

En définitive, ce travail démontre qu'il est possible de concevoir et de réaliser localement un instrument scientifique fiable, performant et économique, capable de répondre aux besoins des laboratoires de recherche et des établissements d'enseignement supérieur. Les perspectives futures de ce projet pourraient inclure l'intégration d'un système de retour de vitesse par capteur, l'amélioration de l'interface utilisateur par l'ajout d'un écran tactile, ainsi que l'extension des plages de vitesse et de température afin d'élargir les domaines d'application dans la synthèse des couches minces.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1] B. Ilyes, “Caractérisation optique et électrique des couches minces de CuO obtenues par spray pyrolyse en utilisant la solution du chlorure du cuivre $CuCl_2$,” Mémoire de Master, Département de Physique, Faculté des Sciences, Université 20 août 1955-Skikda, Algérie, 2022.

[2] N. Bouhanna, “Elaboration et caractérisation des couches minces sulfure d’étain (Sn-S)” Mémoire de Master, Département de Physique, Faculté des Sciences Exactes et Informatique, Université Mohamed Seddik Benyahia-Jijel, Algérie, 2021.

[3] L. Rekeb, “Elaboration électrochimique des couches minces du fer et caractérisations physicochimiques”, Mémoire de Master, Département de Chimie, Faculté des Sciences, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2014.

[4] M. Maache, "Elaboration de films minces d’oxydes semiconducteurs par voie Sol-Gel. En vue d’application aux Optoélectroniques, capteurs et biomédicaux", Thèse de doctorat, Dept. Sci. Mat., Univ. Mohamed Khider de Biskra, Algérie, 2014.

[5] H. Benamra, "L’effet de la température du substrat et de la molarité sur les propriétés des couches minces de sulfure de zinc déposées par spray ultrasonique", Mémoire de Magister, Option : Physique des semi-conducteurs et couches minces, Dept. Sci. Mat., Univ. Mohamed Khider-Biskra, Algérie, Juin 2013.

[6] O. Kirati, « Etude expérimentale et optimisation des paramètres d’électrodéposition des couches minces Cobalt-Argent en utilisant la méthodologie des plans d’expériences », Thèse de doctorat, Dept. Génie des Procédés, Univ. 8 Mai 1945 Guelma, Algérie, 2020.

[7] I. BEN KHALED, "Élaboration et caractérisation des propriétés structurales, électriques et piézoélectriques de nanostructures d’oxyde de zinc pour la récupération d’énergie", Ph.D. dissertation, Univ. Mons, Mons, Belgium; Univ. Polytechnique Hauts-de-France, Valenciennes, France ; INSA Hauts-de-France, Valenciennes, France, Jan. 27, 2026.

[8] A. Chennoufi, « L’effet de la molarité et de la température du substrat sur les propriétés des couches minces d’Oxyde d’Indium déposées par spray Ultrasonique », Mémoire de Magister, Option : Physique des Matériaux Métallique et non Métallique, Univ. Mohamed Khider-Biskra, Algérie, soutenu le 29 fév. 2012.

[9] R. Khaoua et A. Zatout, « Elaboration des couches minces zns par la méthode Spin-Coating pour application en photocatalyse des polluants organiques », Mémoire de Master Académique, Spécialité : Génie des procédés, Option : Génie de l’environnement, Univ. Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 2020.

[10] N. Houaidji, « Synthèse et caractérisation des couches minces du SnO_2 : (F, Co) destinées à des applications photovoltaïques », Thèse de doctorat, Option : Matériaux et composants, Dépt. Physique, Univ. Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, 2020.

[11] S. Lamri, "Elaboration et Caractérisation des Couches Minces de ZnO Dopées par l'Indium" Mémoire de magister, Dept. Des Sciences de la Matière, Université Mohamed Khider-Biskra, Algérie, 2012.

[12] O. Nafa, « Excitations collectives de spins dans les couches minces ferromagnétiques », Thèse de doctorat, Physique des Matériaux, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2014.

[13] B. R. Sankapal, A. Ennaoui, R. B. Gupta, et C. D. Lokhande, dir., Simple Chemical Methods for Thin Film Deposition: Synthesis and Applications. Cham, Suisse : Springer, 2023.

[14] A. Khiali, « Elaboration des couches minces de ZrO_2 préparées par la technique Dip – coating », Thèse de doctorat, Énergies Renouvelables, Univ. Ibn Khaldoun de Tiaret, Algérie, 2018.

[15] N. E. R. Mechehat et O. Fekroune, « Estimation de la dureté des couches minces déposées », Mémoire de Master, Fabrication Mécanique et Productique, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 2021.

[16] F. Baali et S. Bouaicha, « Étude des propriétés structurales et optiques des couches minces de CuS élaborées par la technique spray pyrolyse », Mémoire de Master, Physique des Matériaux, Université Mohamed Boudiaf - M'Sila, Algérie, 2022.

[17] Y. Benkhetta, « L'effet du débit de la solution sur les propriétés des couches minces d'oxyde de zinc (ZnO) déposées par spray ultrasonique », Mémoire de Master, Physique des Matériaux, Univ. Med Khider Biskra, Algérie, 2013.

[18] M. Gahmous, « L'effet du temps de trempage sur les caractéristiques des couches minces TiO2 super-hydrophilique élaborées par voie sol-gel (dip coating) », Mémoire de Master, Génie des procédés de l'environnement, Univ. Mohamed Khider de Biskra, Algérie, 2020.

[19] K. Kamli, « Elaboration et caractérisation physico-chimique des couches minces de sulfure d'étain par spray ultrasonique : Effet des sources d'étain », Mémoire de Magister, Physique des Semi-conducteurs et Couches minces, Université Mohamed Khider-Biskra, Algérie, 2013.

[20] K. Makasheva, R. Clergereaux, and N. Naudé, "Procédés plasmas multi-échelle : quelles stratégies pour le dépôt de couches minces nanocomposites ?" Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie (LAPLACE), Université de Toulouse, CNRS, Toulouse, Nov. 2025.

[21] M. Beauchemin, « Synthèse et caractérisation physico-chimique de couches minces organosiliciées produites par décharge à barrière diélectrique », Mémoire de Maîtrise, Physique, Université de Montréal, Canada, 2020

[22] F. Zahrir et R. Merabet, "Élaboration des couches minces de ZnO par la méthode sol-gel et la méthode électrochimique", Mémoire de licence, Dept. Sciences de la Matière, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi Bordj Bou Arreridj, Algérie, 2013.

[23] Y. Dokkar, « Etude des propriétés physiques des couches minces de TiO_2 élaborées par procédé sol-gel », Mémoire de Master, Physique des Matériaux, Université Kasdi Merbah - Ouargla, Algérie, 2025.

[24] A. Maache, "Elaboration et caractérisation optique des couches minces de ZnO dopé ou Co-dopé obtenues par méthode sol-gel", Thèse de doctorat, Dept. Physique, Université Ferhat Abbas Sétif 1, Algérie, 2021.

[25] K. Zrikem, « Influence du traitement UV et du dopage au lithium sur les propriétés électrochromes de couches minces d'oxyde de nickel préparées par sol-gel », Thèse de doctorat, Physico-chimie de la matière condensée, Univ. Bordeaux et Univ. Cadi Ayyad, Marrakech, 2019.

[26] W. Cardoso, S. Massardo, A. Zaffar, J. F. Basbus, S. Presto, A. Barbucci, et M. Viviani, « Spin Coating: Process, Applications, Challenges, and Characterization Techniques », Chemical Engineering Transactions, vol. 120, pp. 601-606, 2025.

[27] H. A. Mustafa et D. A. Jameel, « Modeling and the main stages of spin coating process: A review », Journal of Applied Science and Technology Trends, vol. 02, n° 02, pp. 119-123, août 2021.

[28] N. Sahu, B. Parija, et S. Panigrahi, « Fundamental understanding and modeling of spin coating process: A review », Indian J. Phys, vol. 83, n° 4, pp. 493-502, avr. 2009.

[29] F. Talbi et L. Ferhat, « Conception et réalisation d'un spin coater pour le dépôt en couches minces », Mémoire de Master, Électronique Biomédical, Univ. Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie, 2016.

[30] T. Jannane, « Réalisation et caractérisation des couches minces d'oxyde de zinc type-P : Étude des propriétés structurales, morphologiques, optiques et électriques », Thèse de doctorat, Matériaux et Energie, Université Sultan Moulay Slimane, Béni-Mellal, Maroc, 2022.

[31] H. El Masaoudi, "Le Phosphate d'argent (Ag_3PO_4), sous forme de poudre et couches minces en tant que photocatalyseur solaire : Élaboration, caractérisation et test photocatalytique," Thèse de doctorat, Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat, Maroc, 2021.

[32] S. Benghabrit, « Elaboration et caractérisation de couches minces CdS par bain chimique CBD pour application photovoltaïque », Thèse de doctorat, Physique, Univ. Des Sciences et de la Technologie d'Oran - Mohamed Boudiaf, Algérie, 2015.

[33] L. Bergerot, « Etude de l'élaboration d'oxyde transparent conducteur de type-p en couches minces pour des applications à l'électronique transparente ou au photovoltaïque », Thèse de doctorat, Matériaux, Mécanique, Génie civil, Electrochimie (2MGE), Univ. Grenoble, France, 2015.

[34] A. Tahri and A. Benyahia, "Modélisation et réglage optimal du gain du variateur de vitesse PID pour moteur BLDC en utilisant la technique PSO," Mémoire de Master, Génie Electrique, Spécialité Machines électriques, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 2022.

[35] S. Si Hali, "Commande d'un moteur BLDC sans capteur de position," Mémoire de Fin d'Etude de Master Académique, Département d'Electrotechnique, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2017.

[36] Md. R. Hazari, E. Jahan, Md. E. Siraj, Md. T. I. Khan, and A. M. Saleque, "Design of a Brushless DC (BLDC) motor controller," in 2014 International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (ICEEICT), Dhaka, Bangladesh, 2014.

[37] M. Amrani and N. Ounissi, "Etude et réalisation d'un drone quadrirotor," Mémoire de Fin d'Etudes de Master Académique, Département d'Electronique et Télécommunications, Université 8 Mai 1945 – Guelma, Algérie, 2020.

[38] P. Yedamale, "Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals," Microchip Technology Inc., Chandler, AZ, USA, Application Note AN885, 2003.

[39] P. Millett, "Brushless vs. Brushed DC Motors: When and Why to Choose One Over the Other," Monolithic Power Systems (MPS), Kirkland, WA, USA, Article No. A-0020, Rev. 1.0, Oct. 2022.

[40] A. Tifraten and H. Mekhlouf, "Modélisation et contrôle du moteur BLDC triphasé à base d'intelligence artificielle," Mémoire de Master, Département de mécanique l'électromécanique, Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf - Mila, Algérie, 2022.

[41] M. Yaz and E. Cetin, "Brushless Direct Current Motor Design and Analysis," COJ Electronics & Communications, Sep. 2021.

[42] M. DJEMAI and M. TELLAA, "Commande de la vitesse et de la position d'un moteur à courant continu sans balais pour les applications en robotique," Projet de Fin d'Etudes d'Ingénieur, Département d'Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, El Harrach, Alger, Algérie, 2007.

[43] M. Chibane, "Commande d'un moteur Brushless à l'aide un Microcontrôleur Atmega et Interface à un Afficheur LCD," Mémoire de Master, Dépt. Electronique, Univ. Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, Algérie, 2014.

[44] B. Djadli and I. Abbassi, "Modélisation d'un système de pompage photovoltaïque en utilisant un moteur brushless," Mémoire de Master, Dépt. Génie Mécanique et Electromécanique, Centre Universitaire Abd Elhafid Boussouf Mila, Algérie, 2024.

[45] A. Ahmed Amani, "Le controle PID d'un moteur brushless," Mémoire de Master, Dépt. Electronique, Univ. Badji Mokhtar Annaba, Algérie, 2019.

[46] D. Mohanraj et al., "A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications," IEEE Access, May 2022.