


 <p>FST كلية العلوم والتكنولوجيا جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم</p>	الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية	
	People's Democratic Republic of Algeria	
	وزارة التعليم العالي والبحث العلمي	
	Ministry of Higher Education and Scientific Research	
	جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم	
	Abdel Hamid Ibn Badis University – Mostaganem	
	كلية العلوم والتكنولوجيا	
	Faculty of Sciences and Technology	
قسم الهندسة الكهربائية		
	Department of Electrical Engineering	

N° d'ordre : M2-ESE/GE/2025

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES  
DE MASTER ACADEMIQUE**

**Filière : Génie Electrique**

**Spécialité : Electronique des systèmes embarqués**

**Thème**

**Fabrication d'un système 'Smart Spin-Coating'**

Présenté par : -BENKERDAGH HAMZA

-BENKERDA AEK MEROUANE

Soutenu le 15/11/ 2025 devant le jury composé de :

Président(e) :	Benstali wissam	Professeur	Université de Mostaganem
Examineurs :	Henni sidahmed	Maitre de conférences A	Université de Mostaganem
Encadrant (e) :	Abderrahmane Abdelkader	Maitre de conférences B	Université de Mostaganem

# Dédicaces

Nous dédions ce travail modeste a :

A nos chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour,  
leurs soutiens et leurs prières tout au long de nos études,

A nos frères et sœurs, A nos amis.

Merci d'être toujours là pour nous.

# Remerciements

Au nom de dieu clément et miséricordieux

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer notre profonde  
gratitude

et nos sincères remerciements à notre encadrant Mr  
Abderrahmane Abdelkader.

Et nous remercions aussi les membres de jurys d'avoir accepté  
de juger ce modeste travail.

Nos remerciements vont enfin à toutes les personnes ayant  
contribué,

## Résumé :

Notre projet décrit les exigences fonctionnelles et techniques d'un dispositif multifonction combinant un **agitateur**, une **centrifugeuse** et un **spin coater**, conçu pour optimiser les processus de préparation, séparation et dépôt en laboratoire. Ce système compact et polyvalent vise à centraliser plusieurs étapes expérimentales dans un seul appareil, réduisant ainsi l'encombrement et les coûts. Il permet de mélanger des solutions, de séparer des phases par centrifugation, et de déposer des couches minces de manière contrôlée grâce à la technique de spin coating. Nous aborderons dans cette partie les spécificités techniques de l'appareil, son processus de conception et de fabrication, ainsi que son potentiel d'application dans les domaines de la recherche, des matériaux avancés et des biotechnologies.

Ce projet consiste en la **conception, la réalisation et la validation** d'un dispositif de laboratoire **polyvalent et intelligent** intégrant trois fonctions essentielles. Le système est basé sur un **microcontrôleur ESP32**, chargé d'assurer la commande, l'automatisation et la gestion des cycles de fonctionnement.

Le dispositif développé permet la programmation des paramètres de rotation (vitesse et durée) à travers une **interface utilisateur tactile TFT**, offrant une utilisation simple et intuitive. La commande du moteur est réalisée via un **ESC** et un signal **PWM précis**, garantissant un contrôle stable et reproductible des vitesses de rotation. Des **mécanismes de sécurité mécanique et logicielle** ont été intégrés afin d'assurer un fonctionnement fiable, notamment lors des phases de rotation à haute vitesse.

# TABLE DES MATIÈRES

## Station Multifonctionnelle Automatisée de Traitement d'Échantillons — ESP32

DEDICACE	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME	iii
TABLE DES MATIERES	iv
LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES ABREVIATIONS	vii
INTRODUCTION GENERALE	6
I-Techniques de dépôt des couches minces	9
1. Définition des couches minces	9
2. Principales techniques de dépôt	9
2.1 Techniques physiques de dépôt	9
2.2 Techniques chimiques de dépôt	9
2.2.2 Dépôt par sol-gel	9
3. Techniques par solution	10
3.1 Spin-Coating	10
3.2 Dip-Coating	10
4. Critères de choix d'une technique de dépôt	10
5. Importance des techniques de dépôt des couches minces	10
5.1 Définition du Spin-Coating	10
5.2 Définition de la centrifugation en laboratoire	11
5.3 Définition de l'agitation magnétique	12
5.4 Aperçu des équipements commerciaux	13
6. Systèmes embarqués dans les équipements scientifiques	13
7. Rôle des microcontrôleurs dans les dispositifs scientifiques	14
8. Importance de l'automatisation	15
9. Interfaces utilisateurs courantes dans les machines de laboratoire	15
10. Commande numérique et sécurité	16
10.1 Paramètres critiques dans les machines rotatives	16
10.2 Exigences de sécurité mécanique	16
10.3 Stabilité mécanique	17
11. Synthèse de l'état de l'art et positionnement du projet	18
11.1 Limites des systèmes actuels	18
11.2 Positionnement du projet	18
Chapitre II :	20
2.1 Bloc-diagramme du système général	21
2.1.1 Architecture globale du système	
2.1.2 Machine d'état générale	22
2.1.3 Diagrammes UML	24
2.2 Partie matérielle	26
2.2.1 Microcontrôleur ESP32	26
2.2.2 ESC 30A et moteur brushless	28
2.2.3 Écran TFT 2.8" SPI (ILI9341)	28
2.2.4 Alimentation	29
2.2.5 Structure mécanique	30

<b>2.3.2 Modules du firmware</b>	<b>32</b>
<b>2.3.3 Logiciels de conception</b>	<b>33</b>
<b>2.4 Conclusion du chapitre</b>	<b>34</b>
<b>Chapitre III :</b>	<b>35</b>
<b>Introduction du chapitre</b>	<b>36</b>
<b>3.1 Réalisation du prototype</b>	<b>36</b>
<b>3.1.1 Fabrication du châssis mécanique</b>	<b>36</b>
<b>3.1.2 Réalisation de l'électronique</b>	<b>37</b>
<b>3.1.3 Intégration et mise au point du firmware</b>	<b>37</b>
<b>3.2 Tests et validation</b>	<b>38</b>
<b>3.2.1 Protocole de test général</b>	<b>38</b>
<b>3.2.2 Validation de la régulation de vitesse</b>	<b>39</b>
<b>3.2.3 Validation du mode Spin-Coating</b>	<b>40</b>
<b>3.2.4 Validation du mode centrifugeuse</b>	<b>40</b>
<b>3.2.5 Validation du mode Agitateur Magnétique</b>	<b>41</b>
<b>3.2.6 Validation des dispositifs de sécurité</b>	<b>42</b>
<b>3.2.7 Bilan des performances et comparaison aux spécifications</b>	<b>43</b>
<b>3.2.8 Analyse des difficultés rencontrées et solutions apportées</b>	<b>44</b>
<b>3.3 Conclusion du chapitre</b>	<b>45</b>
<b>Annexe A</b>	<b>46</b>
<b>A.1 Modèle d'entreprise détaillé</b>	<b>46</b>
<b>Problème à Résoudre</b>	<b>46</b>
<b>1 Proposition de Valeur</b>	<b>46</b>
<b>1.1 Valeur Apportée au Client</b>	<b>46</b>
<b>1.2 Projets Existants Ayant Ciblé le Même Problème</b>	<b>46</b>
<b>2 Segments de Clients</b>	<b>47</b>
<b>3 Relations Clients</b>	<b>47</b>
<b>4 Canaux de Distribution</b>	<b>48</b>

<b>5 Partenaires Clés</b>	<b>48</b>
<b>6 Activités Clés</b>	<b>48</b>
<b>7 Ressources Clés</b>	<b>49</b>
<b>8 Structure de Coûts</b>	<b>50</b>



## Liste des abréviations

Abréviation	Signification complète
ESP32	Espressif Systems — Microcontrôleur dual-core Xtensa 32-bit
ESC	Electronic Speed Controller — Contrôleur de vitesse électronique
PWM	Pulse Width Modulation — Modulation de largeur d'impulsion
TFT	Thin Film Transistor — Écran à transistors à couche mince
SPI	Serial Peripheral Interface — Interface série périphérique
ILI9341	Identifiant du contrôleur de l'écran TFT couleur 240×320
IoT	Internet of Things — Internet des objets
WiFi	Wireless Fidelity — Réseau sans fil IEEE 802.11
HTTP	HyperText Transfer Protocol — Protocole de transfert hypertexte
GPIO	General Purpose Input/Output — Entrée/sortie à usage général
IDE	Integrated Development Environment — Environnement de développement intégré
PCB	Printed Circuit Board — Circuit imprimé
RPM	Revolutions Per Minute — Tours par minute
DC	Direct Current — Courant continu
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
ADN/ARN	Acide DésoxyriboNucléique / Acide RiboNucléique

## Introduction Générale

Les techniques de dépôt de couches minces occupent une place essentielle dans de nombreux domaines scientifiques et technologiques, tels que la microélectronique, l'optique, les capteurs et les matériaux fonctionnels. Elles permettent l'obtention de films de très faible épaisseur présentant des propriétés physiques et chimiques contrôlées. Parmi ces techniques, le **spin-coating** est largement utilisé dans les laboratoires universitaires en raison de sa simplicité de mise en œuvre, de son faible coût relatif et de sa capacité à produire des couches homogènes et reproductibles.

Avec l'évolution des activités pédagogiques et de recherche, les besoins en équipements de laboratoire **accessibles, précis et reproductibles** ne cessent de croître. Les établissements universitaires recherchent des solutions permettant d'assurer la qualité expérimentale tout en maîtrisant les coûts, notamment pour les travaux pratiques et les projets de recherche appliquée. Cette situation met en évidence l'importance de développer des systèmes performants, adaptés aux contraintes budgétaires et capables de garantir une répétabilité fiable des résultats expérimentaux.

Malgré leur importance dans les activités expérimentales, les équipements automatiques de laboratoire restent **peu accessibles**, en raison de l'absence de solutions **low-cost** et des **prix très élevés** des spin-coaters et centrifugeuses disponibles sur le marché. Cette situation limite fortement leur acquisition par les établissements universitaires et les petits laboratoires de recherche. De plus, les équipements existants sont généralement proposés sous forme d'appareils distincts, ce qui augmente les coûts, l'encombrement et la complexité d'utilisation. Il apparaît ainsi nécessaire de développer un **système compact, polyvalent et programmable**, capable d'intégrer dans un seul dispositif les fonctions de **Spin-Coating**, de **Centrifugation** et d'**Agitation magnétique**, tout en répondant aux contraintes économiques et pédagogiques des laboratoires universitaires.

L'objectif principal de ce projet est de **concevoir, automatiser, fabriquer et valider** un dispositif embarqué intelligent, basé sur un **microcontrôleur ESP32**, capable d'assurer de manière fiable et sécurisée trois fonctions essentielles de laboratoire : le **Spin-Coating**, la **Centrifugation** et l'**Agitation magnétique**. Le système développé doit permettre l'exécution de **cycles programmables** (vitesse et durée), offrir une **interface utilisateur intuitive** à travers un **écran tactile TFT et une page web**, et intégrer des **mécanismes de sécurité mécanique et logicielle** garantissant un fonctionnement stable et conforme aux exigences expérimentales.

### Fonctionnalités principales :

Le produit il s'agit d'un système intégré de préparation d'échantillons combinant trois équipements de laboratoire traditionnellement séparés – un agitateur magnétique, une centrifugeuse et un spin coater – au sein d'une plateforme unique contrôlée numériquement. Cette convergence technologique permet d'effectuer successivement ou indépendamment des opérations d'homogénéisation, de séparation par force centrifuge et de dépôt de films minces, tout en réduisant significativement l'encombrement physique et les coûts d'acquisition comparativement à l'achat de trois équipements distincts.

**Agitateur Magnétique :** Pour l'homogénéisation et le mélange de solutions avec contrôle précis de la vitesse et du temps. Idéal pour la préparation de réactifs et la dissolution d'échantillons.

**Centrifugeuse :** Permet la séparation efficace de composants par force centrifuge, essentielle pour l'isolement de particules et la clarification d'échantillons.

**Spin Coater :** Conçu pour créer des films minces uniformes par étalement centrifuge, particulièrement utile dans les applications de revêtement et de dépôt de couches.

### **Interface de contrôle avancée :**

L'appareil dispose d'un double système de contrôle innovant comprenant un écran tactile TFT intégré pour une utilisation directe et une interface web accessible via WiFi pour le contrôle à distance. Cette approche hybride permet une flexibilité maximale d'utilisation, que ce soit pour un contrôle local immédiat ou pour une supervision à distance.

Chaque fonction dispose de paramètres personnalisables incluant trois niveaux de vitesse et quatre durées préprogrammées, avec la possibilité de configurer des cycles multi-phases pour des applications plus complexes.

### **Conclusion :**

Ce projet de **station multifonctionnelle de traitement d'échantillons de laboratoire** représente une innovation significative dans le domaine des équipements scientifiques, répondant aux défis contemporains des laboratoires modernes en matière d'optimisation des ressources, de digitalisation et d'accessibilité technologique.

# Chapitre I

## Généralités

### **I-Techniques de dépôt des couches minces :**

Les techniques de dépôt des couches minces consistent à former des films de très faible épaisseur, généralement compris entre quelques nanomètres et quelques micromètres, sur un

substrat solide. Ces couches minces sont largement utilisées dans de nombreux domaines scientifiques et industriels, tels que la microélectronique, l'optique, l'énergie, les capteurs et les matériaux fonctionnels. Le choix de la technique de dépôt dépend des propriétés recherchées, du matériau utilisé et des contraintes technologiques.

## **1. Définition des couches minces :**

Une couche mince est un matériau déposé sur un substrat afin de modifier ou d'améliorer ses propriétés physiques, chimiques ou mécaniques, telles que la conductivité électrique, la transparence optique, la résistance à la corrosion ou l'adhérence de surface. L'épaisseur et l'uniformité du dépôt sont des paramètres essentiels pour garantir la performance du dispositif final.

## **2. Principales techniques de dépôt :**

Les techniques de dépôt des couches minces peuvent être classées en deux grandes catégories: les techniques **physiques** et les techniques **chimiques**.

### **2.1 Techniques physiques de dépôt :**

#### **2.1.1 Dépôt physique en phase vapeur (PVD)**

Le PVD consiste à vaporiser un matériau solide sous vide, puis à le condenser sur un substrat. Les méthodes les plus courantes sont :

- l'évaporation thermique,
- la pulvérisation cathodique (sputtering).

Ces techniques offrent un bon contrôle de l'épaisseur et une excellente pureté des films déposés.

### **2.2 Techniques chimiques de dépôt :**

#### **2.2.1 Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)**

Le CVD repose sur des réactions chimiques en phase gazeuse qui conduisent à la formation d'un film solide sur le substrat. Il permet d'obtenir des couches très uniformes, même sur des surfaces complexes.

#### **2.2.2 Dépôt par sol-gel**

Le procédé sol-gel utilise une solution chimique qui évolue vers un gel, puis est déposée sur le substrat par immersion ou rotation.

### 3. Techniques par solution :

#### 3.1 Spin-Coating

Le **spin-coating** est une technique largement utilisée en laboratoire pour le dépôt de couches minces à partir de solutions liquides. Elle consiste à déposer une solution sur un substrat, puis à le faire tourner à grande vitesse afin d'obtenir un film homogène par effet de la force centrifuge. Cette méthode est simple, rapide et économique, ce qui la rend particulièrement adaptée aux laboratoires universitaires.

#### 3.2 Dip-Coating

Le dip-coating repose sur l'immersion puis le retrait contrôlé du substrat dans une solution, permettant la formation d'un film uniforme.

### 4. Critères de choix d'une technique de dépôt :

Le choix de la technique dépend de plusieurs facteurs :

- la nature du matériau à déposer,
- l'épaisseur souhaitée,
- l'uniformité du film,
- le coût et la complexité de l'équipement,
- les conditions de température et de pression.

### 5. Importance des techniques de dépôt des couches minces :

Les techniques de dépôt des couches minces sont essentielles pour le développement de dispositifs modernes. Elles permettent la fabrication de composants miniaturisés, performants et reproductibles, répondant aux exigences croissantes des applications scientifiques et industrielles.

#### 5.1 Définition du Spin-Coating :

Le **spin-coating** est une technique de dépôt de couches minces largement utilisée en laboratoire pour l'obtention de films homogènes à partir de solutions liquides. Son principe général consiste à déposer une quantité contrôlée de solution sur la surface d'un substrat, puis à faire tourner ce dernier à **grande vitesse**. Sous l'effet de la **force centrifuge**, la solution s'étale radialement sur toute la surface du substrat, formant ainsi une couche mince uniforme après évaporation du solvant.

Le processus de spin-coating se déroule généralement en plusieurs étapes successives :

- **Dépôt initial** : une goutte de solution est déposée au centre du substrat immobile ou en rotation lente.
- **Montée en vitesse** : le substrat accélère progressivement jusqu'à atteindre la vitesse de rotation programmée.
- **Étalement** : la solution se répartit de manière uniforme sur la surface sous l'action de la force centrifuge.

- **Séchage** : le solvant s'évapore partiellement ou totalement, laissant un film solide et homogène.

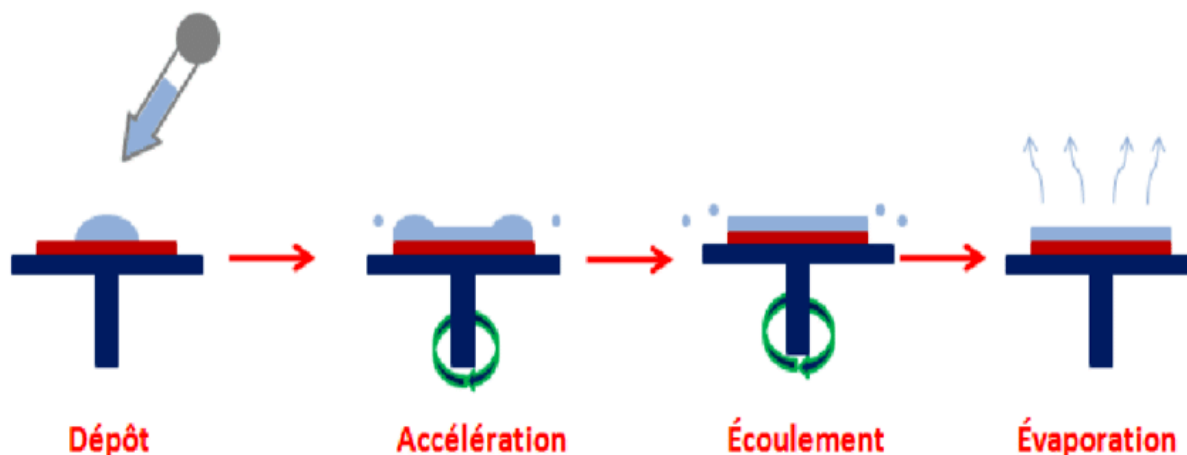


Figure 1 : le principe de fonctionnement de spin coater

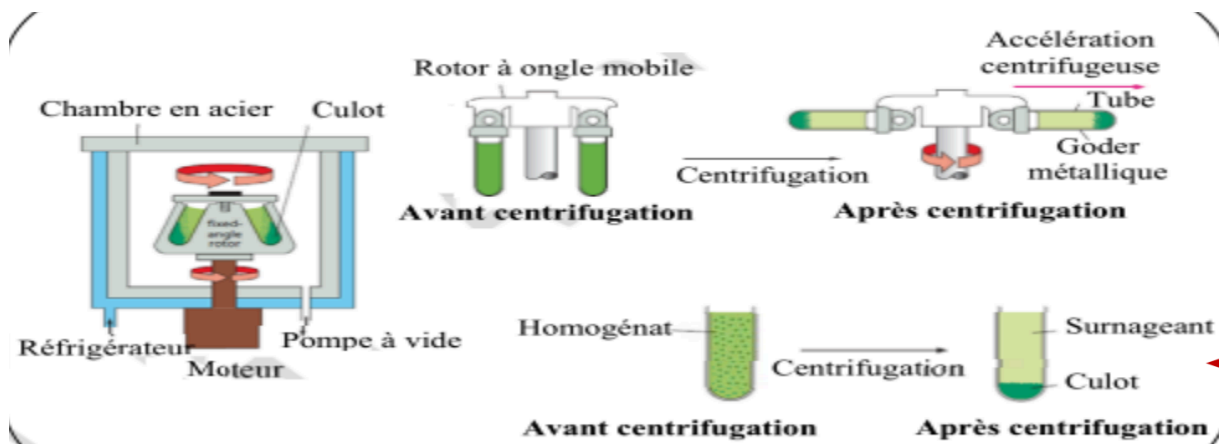
Cette technique est particulièrement appréciée pour sa **simplicité de mise en œuvre**, sa **rapidité** et sa **bonne reproductibilité**, ce qui la rend adaptée aux laboratoires universitaires et aux travaux pratiques de recherche.

## 5.2 Définition de la centrifugation en laboratoire :

La **centrifugation** est une technique couramment utilisée en laboratoire pour la **séparation, la clarification ou l'étalement de matériaux** sous l'effet d'une rotation à **haute vitesse**. Elle repose sur l'application de la **force centrifuge**, générée par la rotation d'un rotor, qui provoque le déplacement des particules ou des phases liquides en fonction de leur **densité** et de leur **taille**.

Lors du fonctionnement, les échantillons sont placés dans des tubes ou des récipients fixés sur un rotor. Lorsque celui-ci tourne rapidement, les composants les plus denses sont projetés vers l'extérieur et se déposent au fond du récipient, tandis que les éléments plus légers restent proches de l'axe de rotation. Ce phénomène permet une séparation efficace des constituants d'un mélange ou, dans certains cas, un étalement uniforme de matériaux.

La centrifugation est largement utilisée dans les domaines de la chimie, de la biologie, de la pharmacie et des sciences des matériaux, en raison de sa **rapidité**, de sa **fiabilité** et de sa **facilité d'utilisation**.

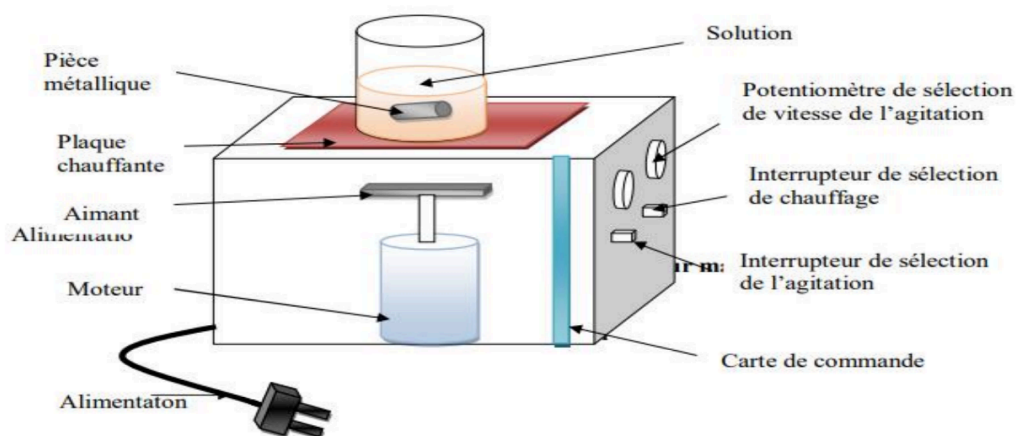


### 5.3 Définition de l'agitation magnétique :

L'**agitation magnétique** est une technique de mélange largement utilisée en laboratoire pour obtenir une **solution homogène** sans contact mécanique direct avec le liquide. Son principe repose sur l'utilisation d'une **tige aimantée**, appelée barreau magnétique, placée à l'intérieur du récipient contenant la solution.

Un champ magnétique rotatif, généré par un aimant entraîné par un moteur situé sous la plaque de l'agitateur, met le barreau magnétique en rotation. Cette rotation crée un **mouvement de mélange** du liquide, favorisant l'homogénéisation de la solution, la dissolution des solutés et l'uniformité de la température.

L'agitation magnétique est particulièrement appréciée pour sa **simplicité**, sa **fiabilité** et sa **propreté**, car elle réduit les risques de contamination. Elle est couramment utilisée dans les domaines de la chimie, de la biologie et de la science des matériaux, notamment pour les préparations de solutions et les réactions chimiques.



## 5.4 Aperçu des équipements commerciaux :

Sur le marché, différents équipements permettent la réalisation de dépôts de couches minces, l'agitation de solutions ou la centrifugation. Ces appareils se distinguent par leurs fonctionnalités, leurs coûts et leur accessibilité pour les laboratoires.

### Spin-Coaters commerciaux :

- **Laurell Technologies** : fabricant reconnu de spin-coaters de haute précision destinés à la recherche et à l'industrie. Ces équipements offrent des contrôles avancés des paramètres de rotation, des interfaces utilisateur intuitives et des performances reproductibles.

- **Ossila Spin Coat Systems** : solutions compactes et fiables, particulièrement adaptées aux laboratoires universitaires et aux applications de revêtements fins.

### Agitateurs magnétiques standards :

Les agitateurs magnétiques classiques sont largement utilisés pour le mélange de solutions chimiques ou biologiques. Ils offrent une agitation homogène à des vitesses variables, avec ou sans chauffage. Ils sont simples d'utilisation mais ne permettent pas de réaliser de dépôts minces ni de centrifugation.

### Spin-Coaters DIY open-source :

Des projets communautaires et open-source proposent des solutions de spin-coating à bas coût, souvent basées sur des microcontrôleurs ou des composants accessibles. Ces systèmes sont intéressants pour l'apprentissage, mais présentent généralement des limitations en termes de précision, de stabilité et de reproductibilité par rapport aux équipements commerciaux.

## 6. Systèmes embarqués dans les équipements scientifiques :

Les systèmes embarqués occupent aujourd'hui une place centrale dans la conception et le fonctionnement des équipements scientifiques modernes. Ils sont intégrés au sein des machines de laboratoire afin d'assurer la **commande**, la **surveillance** et l'**automatisation** des processus expérimentaux. Un système embarqué se compose généralement d'un microcontrôleur ou d'un microprocesseur, associé à des capteurs, des actionneurs et des interfaces de communication.

Dans les équipements scientifiques, les systèmes embarqués permettent de gérer avec précision des paramètres critiques tels que la vitesse, la température, la durée de traitement ou la séquence des opérations. Grâce à leur capacité de traitement en temps réel, ils assurent une exécution fiable et répétable des protocoles expérimentaux, ce qui est essentiel pour garantir la qualité et la reproductibilité des résultats.

L'intégration des systèmes embarqués contribue également à l'amélioration de la **sécurité** des utilisateurs et des dispositifs. Ils permettent la mise en œuvre de mécanismes de protection, tels que l'arrêt automatique en cas de défaillance, la limitation des paramètres de fonctionnement ou la surveillance continue des conditions de travail. Par ailleurs, ces

systèmes facilitent l'interaction homme-machine à travers des interfaces utilisateur adaptées, telles que des écrans, des boutons ou des menus de configuration.

Enfin, l'utilisation des systèmes embarqués favorise l'évolution des équipements scientifiques vers des solutions plus **intelligentes, flexibles et connectées**, répondant aux exigences croissantes des laboratoires en matière de performance, d'automatisation et de traçabilité des expériences.

## 7. Rôle des microcontrôleurs dans les dispositifs scientifiques :

Les microcontrôleurs constituent le **cœur de commande** des dispositifs scientifiques modernes. Ils assurent la gestion et la coordination des différentes fonctions nécessaires au bon déroulement des expériences, en permettant l'**automatisation** des opérations et la réduction de l'intervention humaine. Cette automatisation contribue à améliorer la fiabilité des résultats et à limiter les erreurs liées à la manipulation manuelle.

Grâce à leurs capacités de traitement en temps réel, les microcontrôleurs garantissent une **précision élevée des séquences expérimentales**, notamment dans la gestion des paramètres tels que le temps, la vitesse, l'ordre des opérations et les cycles programmés. Cette précision est essentielle pour assurer la **répétabilité** des expériences scientifiques.

Les microcontrôleurs jouent également un rôle central dans la **gestion des interfaces utilisateur**. Ils permettent l'affichage des informations, la configuration des paramètres et l'interaction entre l'utilisateur et le dispositif à travers des boutons, des écrans ou des menus de commande. Cette interaction facilite l'utilisation des équipements et améliore l'ergonomie globale.

Enfin, lorsque cela est nécessaire, les microcontrôleurs assurent la **communication** avec d'autres systèmes ou dispositifs, via des interfaces filaires ou sans fil. Cette communication permet la supervision à distance, l'échange de données, ainsi que l'intégration des équipements dans des systèmes de contrôle plus larges ou des plateformes de suivi expérimental.

## 8. Importance de l'automatisation

L'automatisation joue un rôle fondamental dans les équipements scientifiques modernes, en particulier dans les environnements de laboratoire où la précision et la fiabilité des résultats sont primordiales. Elle permet d'assurer la **répétabilité des expériences**, en garantissant que les mêmes paramètres de fonctionnement sont appliqués de manière identique d'un essai à un autre, indépendamment de l'opérateur.

La **traçabilité** constitue un autre avantage majeur de l'automatisation. Les systèmes automatisés permettent l'enregistrement et le suivi des paramètres expérimentaux, facilitant ainsi l'analyse des résultats, la validation des protocoles et la reproductibilité des travaux scientifiques. Cette traçabilité est essentielle dans les contextes académiques et industriels où la documentation des expériences est requise.

L'automatisation contribue également à la **réduction des erreurs humaines**, souvent causées par des réglages manuels imprécis ou des oublis lors de l'exécution des procédures. En

confiant ces tâches au système de commande, les risques d'erreur sont considérablement diminués, ce qui améliore la qualité et la fiabilité des résultats obtenus.

Enfin, l'automatisation renforce la **sécurité d'utilisation** des équipements scientifiques. Elle permet la mise en place de mécanismes de protection, tels que l'arrêt automatique en cas d'anomalie, la limitation des paramètres critiques et le contrôle des conditions de fonctionnement. Ces dispositifs contribuent à protéger à la fois l'utilisateur et l'équipement, en réduisant les risques liés à une mauvaise manipulation ou à des conditions de fonctionnement dangereuses.

## 9. Interfaces utilisateurs courantes dans les machines de laboratoire

Les interfaces utilisateurs constituent un élément essentiel des machines de laboratoire, car elles assurent la **communication entre l'utilisateur et l'équipement scientifique**. Elles permettent la configuration des paramètres, la visualisation des informations de fonctionnement et le contrôle des différentes opérations.

Les **boutons et encodeurs rotatifs** sont parmi les interfaces les plus répandues. Ils offrent une solution simple et robuste pour la sélection des fonctions, l'ajustement des paramètres et le lancement des cycles de fonctionnement. Les encodeurs, en particulier, permettent un réglage précis et progressif des valeurs.

Les **écrans LCD et TFT** sont largement utilisés pour l'affichage des données et des menus. Ils permettent de présenter de manière claire les paramètres de fonctionnement, l'état du système et les messages d'information. Les écrans TFT, souvent tactiles, offrent une interface plus intuitive et facilitent l'interaction directe avec l'utilisateur.

Les **menus de configuration** permettent d'organiser les différentes fonctionnalités de la machine de manière structurée. Ils offrent la possibilité de modifier les paramètres, de sélectionner des modes de fonctionnement et de programmer des cycles spécifiques, tout en simplifiant l'utilisation de l'équipement.

Enfin, les **indications de sécurité** jouent un rôle crucial dans la protection de l'utilisateur. Elles peuvent prendre la forme de messages d'alerte, de voyants lumineux ou d'avertissements affichés à l'écran, signalant des conditions de fonctionnement anormales ou des risques potentiels.

## 10. Commande numérique et sécurité

### 10.1 Paramètres critiques dans les machines rotatives

La maîtrise des machines rotatives telles que les spin-coaters et les centrifugeuses repose sur le contrôle précis de quatre paramètres fondamentaux, dont la gestion coordonnée conditionne directement la qualité et la répétabilité des résultats expérimentaux.

La **vitesse de rotation** constitue le paramètre central du système. Dans le cas du spin-coating, elle détermine l'épaisseur du film, où une augmentation de la vitesse angulaire  $\omega$  réduit l'épaisseur de la couche. Pour la centrifugation, elle fixe la force relative appliquée aux échantillons, exprimée en multiples de g. Dans les deux applications, une régulation en boucle

fermée de type PID est indispensable pour maintenir la consigne avec une précision de  $\pm 10$  RPM, malgré les variations de charge dues aux échantillons.

L'**accélération**, souvent négligée dans les systèmes artisanaux, est tout aussi déterminante. Une montée en vitesse trop brusque génère des ondes de choc dans la solution déposée, créant des inhomogénéités dans le film. Un profil d'accélération en rampe linéaire ou sigmoïdale est recommandé afin d'assurer un étalement homogène et d'éviter les contraintes mécaniques excessives sur les paliers.

La **durée de traitement** impacte directement le taux d'évaporation du solvant et, par conséquent, la viscosité finale du dépôt. Elle est généralement comprise entre 20 et 60 secondes pour le spin-coating, et doit être gérée avec une précision de  $\pm 1$  seconde pour garantir la reproductibilité des expériences.

Enfin, la **programmation de cycles** permet d'enchaîner plusieurs phases de rotation à des vitesses et durées différentes au sein d'une même opération. Cette fonctionnalité standard sur les équipements commerciaux est particulièrement utile pour les dépôts multicouches ou les protocoles de centrifugation différentielle. Son intégration dans le firmware du système embarqué est donc une exigence fonctionnelle prioritaire.

## 10.2 Exigences de sécurité mécanique

La rotation à haute vitesse de masses pouvant être déséquilibrées représente un risque mécanique significatif pour l'opérateur et pour l'environnement de laboratoire. Les normes applicables aux équipements de mesure et de laboratoire notamment la norme EN 61010-1 définissent un ensemble de dispositifs de protection auxquels tout système doit se conformer.

Le premier dispositif concerne le **verrouillage du couvercle pendant la rotation**. Un interlock électromécanique doit impérativement empêcher le démarrage du moteur si le couvercle n'est pas correctement fermé, et déclencher un arrêt immédiat en cas d'ouverture intempestive. Ce mécanisme protège l'opérateur contre les projections de liquide et les éventuels bris de matériau à haute vitesse. Sa mise en œuvre repose sur un micro-interrupteur à sécurité positive, traité en priorité absolue par le système de contrôle.

Le deuxième dispositif est la **protection contre les projections**. Une enceinte de confinement, réalisée en polycarbonate transparent ou en acier inoxydable, doit entourer l'ensemble du plateau rotatif. Elle doit être dimensionnée pour résister aux impacts d'un échantillon libéré à la vitesse maximale d'utilisation, tout en offrant une visibilité suffisante pour le suivi des opérations.

Le troisième dispositif est l'**arrêt d'urgence**. Un bouton coup-de-poing à contact normalement fermé doit couper instantanément l'alimentation du moteur et activer un freinage électronique contrôlé, permettant d'amener le plateau à l'arrêt complet en moins de trois secondes depuis la vitesse nominale. Ce temps de freinage doit être suffisamment court pour limiter les risques, mais suffisamment progressif pour éviter les à-coups mécaniques susceptibles de renverser les échantillons.

Le quatrième dispositif est la **détection de déséquilibre**. Un accéléromètre MEMS (type MPU-6050 ou LIS3DSH) surveille en temps réel les vibrations du plateau. Lorsque l'amplitude des accélérations détectées dépasse un seuil prédéfini correspondant à un déséquilibre mécanique anormal le firmware déclenche une procédure d'arrêt progressif automatique. Ce dispositif est particulièrement critique pour la centrifugeuse, où un déséquilibre sévère peut entraîner des contraintes structurelles destructrices en quelques secondes.

Il convient de souligner que l'ensemble de ces dispositifs de sécurité doit être traité en priorité absolue par le microcontrôleur, via des interruptions matérielles (IRQ) à haute priorité, afin de garantir un temps de réponse inférieur à quelques millisecondes, indépendamment de l'état du programme principal.

### 10.3 Stabilité mécanique

La stabilité mécanique du système conditionne à la fois la précision des résultats, le confort d'utilisation et la longévité des composants. Trois aspects sont déterminants à cet égard.

L'**équilibrage du plateau** constitue la première exigence. Toute masse excentrée crée une force centrifuge perturbatrice dont l'amplitude croît avec le carré de la vitesse angulaire selon la relation  $F = m \cdot \omega^2 \cdot r$ . Pour des vitesses supérieures à 3 000 RPM, un déséquilibre résiduel de quelques grammes-millimètres suffit à générer des vibrations perceptibles et préjudiciables à la qualité du dépôt. L'équilibrage statique et dynamique du plateau porte-échantillon est donc impératif avant la mise en service, et doit être maintenu par l'utilisateur en disposant les échantillons de manière symétrique.

La **réduction des vibrations** transmises au bâti de l'appareil et à la paillasse constitue le deuxième enjeu. L'utilisation d'éléments d'isolation vibratoire — plots anti-vibratoires en élastomère, roulements à billes de précision, paliers auto-aligneurs — est essentielle pour découpler les vibrations générées par la rotation des éléments structurels de l'appareil. Une transmission non maîtrisée des vibrations peut dégrader la qualité des dépôts, perturber les équipements environnants et réduire significativement la durée de vie des roulements.

Enfin, la rigidité du **support mécanique** est une condition sine qua non de la stabilité globale du système. Un châssis insuffisamment rigide peut entrer en résonance à certaines fréquences d'utilisation, amplifiant les vibrations au lieu de les amortir. La fréquence propre du châssis doit être significativement supérieure aux fréquences d'utilisation nominales. Dans la pratique, une analyse modale simplifiée — ou des tests empiriques par balayage en fréquence — permet d'identifier et d'éliminer ces plages de résonance dès la phase de conception mécanique.

## 11. Synthèse de l'état de l'art et positionnement du projet

### 11.1 Limites des systèmes actuels :

L'analyse des équipements commerciaux disponibles sur le marché révèle quatre limitations majeures qui justifient pleinement le développement d'une solution alternative adaptée aux contraintes des laboratoires universitaires.

La première limitation est le **prix élevé des solutions commerciales**. Les spin-coaters et centrifugeuses de laboratoire de qualité sont commercialisés à des prix allant de 30000 à 450000 dinars selon les performances et les options. Pour les appareils d'agitation magnétique de précision, les tarifs oscillent entre 12000 et 35000 dinars. Ces coûts sont largement inaccessibles pour la majorité des laboratoires de travaux pratiques dans les pays en développement, où les budgets alloués aux équipements didactiques restent très contraints. Cette situation oblige souvent les enseignants à utiliser des méthodes alternatives moins précises, ou à restreindre l'accès aux manipulations les plus formatives.

La deuxième limitation est le **volume important** de ces équipements. Conçus principalement pour des environnements industriels ou des laboratoires de recherche disposant de surfaces dédiées, les appareils commerciaux présentent une empreinte au sol souvent supérieure à 0,5 m<sup>2</sup>. Cette caractéristique les rend inadaptés aux salles de travaux pratiques universitaires, où l'espace de paillasse est partagé entre de nombreux postes de manipulation.

La troisième limitation est la **difficulté de maintenance**. La complexité technologique des équipements importés, combinée à l'absence fréquente de représentants techniques locaux et à la rareté des pièces de rechange, rend la maintenance corrective particulièrement difficile et coûteuse. Une panne, même mineure, peut immobiliser l'équipement pendant plusieurs semaines, pénalisant l'organisation des enseignements pratiques.

La quatrième limitation, et non des moindres, est l'**absence de systèmes 3-en-1 compacts**. Aucun équipement commercial ne propose à ce jour l'intégration dans un boîtier unique et compact des trois fonctions — spin-coating, centrifugation et agitation magnétique. Les établissements souhaitant disposer de ces trois fonctionnalités doivent acquérir trois appareils distincts, ce qui multiplie l'investissement financier, l'espace occupé et les contraintes de maintenance.

### 11.2 Positionnement du projet

Face aux limitations identifiées, le présent mémoire propose la conception et la réalisation d'un système répondant à cinq caractéristiques fondamentales qui définissent son positionnement original sur le plan technologique et pédagogique.

Le système est conçu pour être **compact**, avec une empreinte au sol inférieure à 30 × 30 cm et une hauteur n'excédant pas 25 cm couvercle inclus. Cette compacité est rendue possible par l'intégration des trois fonctions dans un châssis commun partageant les composants électroniques de puissance et de commande, ainsi que par le choix d'un actionneur principal de faible encombrement.

Il est également **économique** : en s'appuyant sur des composants électroniques grand public — microcontrôleur STM32, moteur BLDC aéronautique, drivers de puissance discrets, afficheur OLED — le coût total de réalisation est estimé à moins de 30000 dinars sans frais de main-d'oeuvre . Ce rapport coût/performance, plus de vingt-cinq fois inférieur à celui des solutions commerciales équivalentes, le rend accessible à tout laboratoire de travaux pratiques.

La caractéristique la plus distinctive est sa nature **multi-fonction**, combinant en un seul appareil un spin-coater, une centrifugeuse et un agitateur magnétique. Cette intégration repose sur la mutualisation du même moteur principal pour les modes de rotation rapide (spin-coating et centrifugation), et d'un électroaimant rotatif indépendant pour l'agitation magnétique. Le passage d'une fonction à l'autre s'effectue par sélection logicielle, sans démontage mécanique.

Le système est spécifiquement **destiné aux laboratoires universitaires et aux travaux pratiques**. L'interface homme-machine est conçue pour une prise en main rapide par des étudiants non spécialistes, avec un affichage clair des paramètres opérationnels, des modes de fonctionnement pré-programmés correspondant aux protocoles les plus courants, et des protections logicielles contre les erreurs de paramétrage.

Enfin, le système repose entièrement sur un **système embarqué** à microcontrôleur. Ce choix technologique garantit la flexibilité de la solution — les paramètres et les séquences de fonctionnement sont entièrement reconfigurables par logiciel — ainsi que sa reproductibilité et son évolutivité. Le firmware assure simultanément la régulation PID de la vitesse de rotation, la gestion des séquences de cycles programmés, la surveillance en temps réel des capteurs de sécurité, et la communication avec l'interface utilisateur.

# **Chapitre II**

## **Conception Matérielle et Logicielle**

## CHAPITRE 2 — Conception Matérielle et Logicielle

### 2.1 Bloc-diagramme du système général

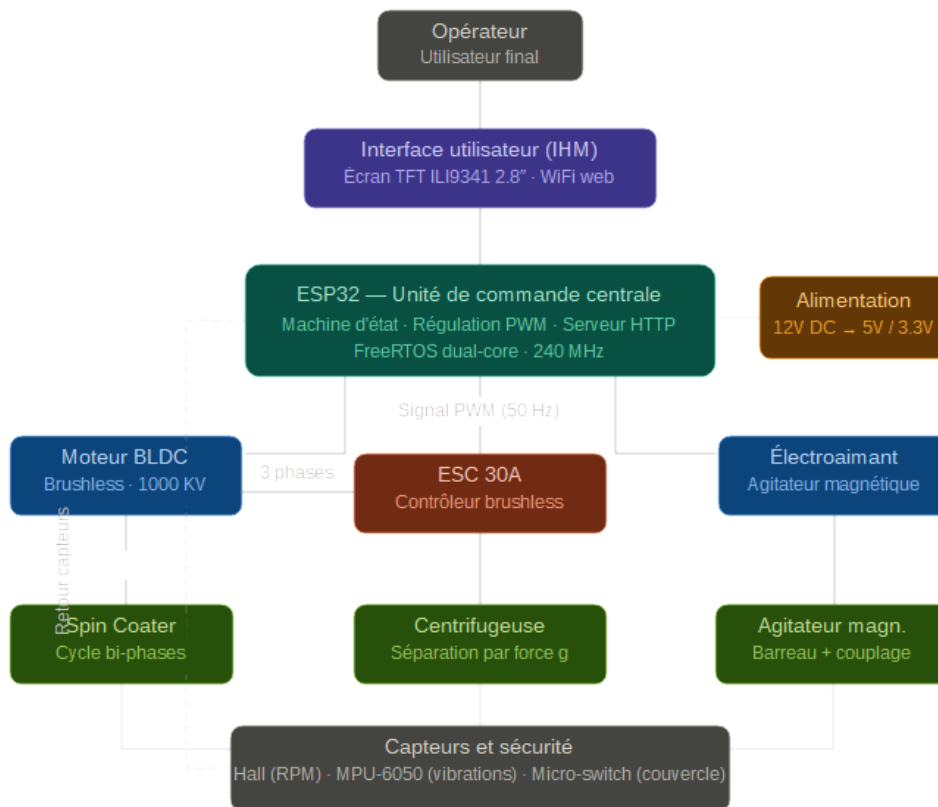
#### 2.1.1 Architecture globale du système

Le système proposé s'organise autour de cinq blocs fonctionnels principaux qui interagissent de manière coordonnée pour assurer les trois modes de fonctionnement : Spin-Coating, Centrifugeuse et Agitateur Magnétique.

Le flux de traitement suit un chemin logique depuis l'opérateur jusqu'aux actionneurs. L'opérateur interagit avec l'interface TFT pour sélectionner le mode de fonctionnement et saisir les paramètres souhaités : vitesse cible, durée du traitement, profil d'accélération et nombre de cycles. Ces informations sont transmises à l'unité de commande centrale — l'ESP32 — qui les intègre dans sa machine d'état principale et génère les signaux de commande appropriés vers les actionneurs.

Le bloc actionneur comprend le moteur BLDC commandé via l'ESC 30A pour les modes Spin-Coating et Centrifugeuse, ainsi qu'un électroaimant rotatif indépendant pour le mode Agitation Magnétique. En retour, le bloc de capteurs fournit en temps réel les mesures de vitesse (capteur à effet Hall) et d'accélération (accéléromètre MPU-6050), qui alimentent le correcteur PID et le module de sécurité. Le micro-switch de position du couvercle constitue quant à lui le verrou de sécurité principal, empêchant tout démarrage si le couvercle n'est pas correctement fermé

Le bloc d'alimentation joue un rôle transversal : il convertit la tension d'entrée en 12V pour le moteur et l'ESC, et en 5V régulé pour l'ESP32, l'afficheur TFT et les capteurs. Une séparation physique des masses de puissance et de signal est maintenue sur le circuit imprimé afin de minimiser les interférences électromagnétiques susceptibles de perturber les mesures des capteurs.



Fi  
gu  
re  
2.

1 — Bloc-diagramme général du système 3-en-1

### 2.1.2 Machine d'état générale

Le comportement global du système est modélisé par une machine d'état finie (FSM — Finite State Machine) à six états principaux. Cette approche garantit un comportement déterministe et sûr, quel que soit l'ordre des actions de l'opérateur.

Le premier état, **IDLE** (Veille), est l'état de repos du système. Il est actif au démarrage et après chaque cycle terminé. Le système affiche le menu principal sur l'écran TFT et attend une action de l'opérateur. Toutes les variables de régulation sont remises à zéro.

Le deuxième état, **SELECTION**, est déclenché dès que l'opérateur tourne l'encodeur rotatif. Le système affiche les trois modes disponibles et attend une validation par pression sur le bouton encodeur. Une fois le mode sélectionné, la machine passe à l'état suivant.

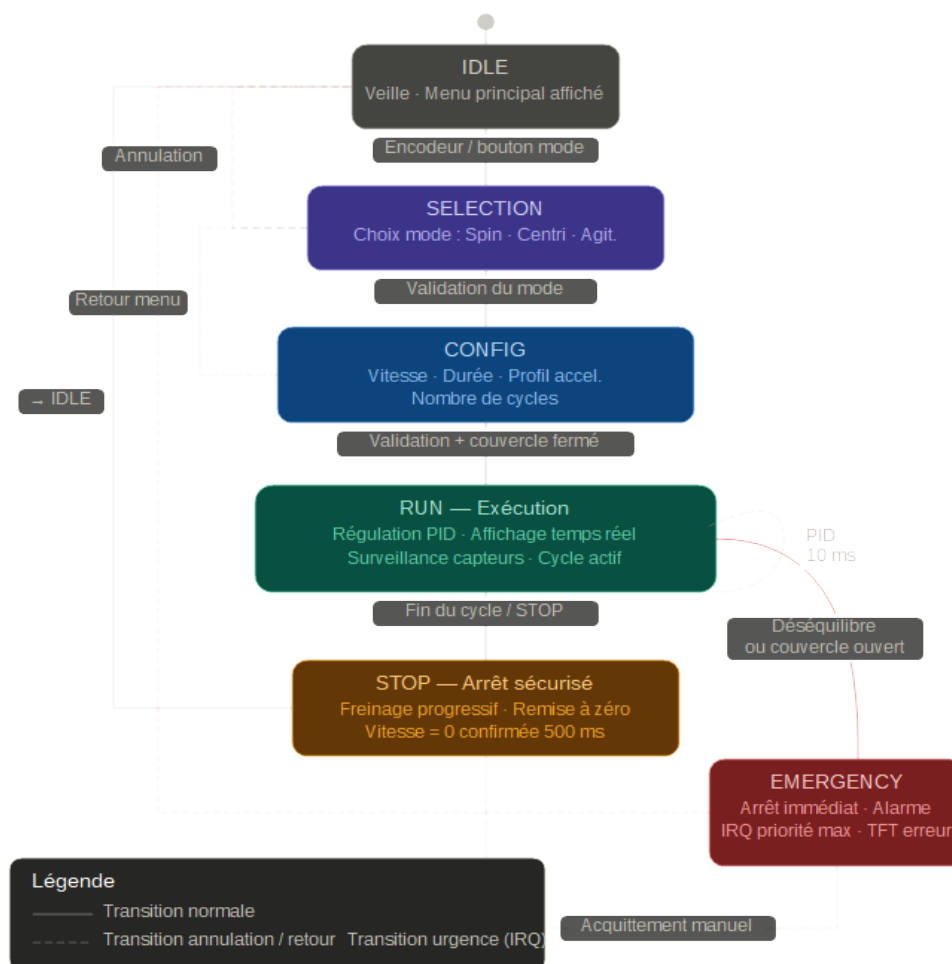
Le troisième état, **CONFIG** (Paramétrage), permet à l'opérateur de saisir les paramètres du cycle : vitesse cible en RPM, durée de traitement en secondes, profil d'accélération (rampe linéaire ou sigmoïdale) et nombre de cycles pour les opérations multi-étapes. Chaque paramètre est affiché et modifiable via l'encodeur. L'appui long sur le bouton valide la configuration et déclenche la transition vers l'état RUN.

Le quatrième état, **RUN** (Exécution), est l'état actif principal. L'ESP32 exécute la régulation PID en boucle fermée toutes les 10 ms, met à jour l'affichage TFT en temps

réel (vitesse mesurée, temps restant, courbe de progression) et surveillance en permanence les capteurs de sécurité. Cet état se termine soit à l'expiration du timer de cycle (transition vers STOP), soit sur détection d'une anomalie (transition vers EMERGENCY).

Le cinquième état, **STOP** (Arrêt sécurisé), gère la décélération progressive du moteur selon un profil de freinage prédéfini. Une fois l'arrêt complet confirmé par le capteur Hall (vitesse nulle pendant 500 ms), le système retourne à l'état IDLE et affiche un message de fin de cycle avec les paramètres enregistrés.

Le sixième état, **EMERGENCY**, est déclenché par interruption matérielle de priorité maximale en cas de déséquilibre excessif, de survitesse, ou d'ouverture du couvercle pendant la rotation. Le moteur est arrêté immédiatement, une alarme sonore est émise par le buzzer, et un message d'erreur explicite est affiché sur le TFT. Aucun redémarrage n'est possible sans acquittement manuel de l'opérateur.



**Figure 2.2** — Machine d'état générale du système

### 2.1.3 Diagrammes UML

#### a) Diagramme de classes

Le diagramme de classes UML modélise les entités logicielles principales du firmware et leurs relations. Cinq classes principales structurent l'architecture logicielle.

La classe **SystemController** constitue le contrôleur principal. Elle instancie et orchestre toutes les autres classes, et implémente la machine d'état via une méthode `update()` appelée toutes les 10 ms dans la boucle principale de FreeRTOS. Elle contient les attributs d'état courant, les paramètres du cycle actif et les références vers les autres objets.

La classe **MotorDriver** encapsule toute la logique de commande du moteur BLDC via l'ESC. Elle expose les méthodes `setSpeed(int PWM)`, `start()`, `stop()`. Elle intègre également le calcul de la rampe d'accélération et la conversion RPM vers valeur PWM (en microsecondes de largeur de pulse).

La classe **PIDController** implémente le correcteur numérique proportionnel-intégral-dérivé. Ses attributs  $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$  sont configurables à l'exécution. La méthode `compute(float setpoint, float measured)` retourne la commande corrigée à chaque cycle de régulation de 10 ms, avec anti-windup intégré sur le terme intégral.

La classe **SafetyMonitor** interroge en continu le MPU-6050 via I<sup>2</sup>C et surveille l'état du micro-switch du couvercle. Elle compare l'amplitude des vibrations mesurées à un seuil configurable et appelle le callback d'urgence si celui-ci est dépassé.

La classe **UIManager** gère l'affichage TFT via la bibliothèque TFT\_eSPI et la lecture de l'encodeur rotatif. Elle implémente le rendu des menus hiérarchiques, la mise à jour des valeurs numériques en temps réel et la détection des événements utilisateur (rotation, appui court, appui long).

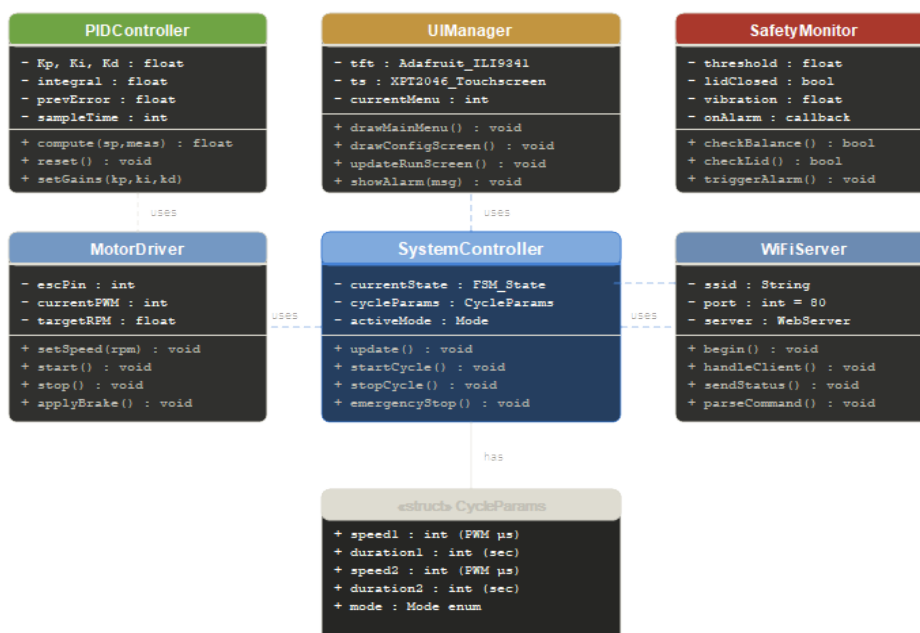


Figure 2.3 — Diagramme de classes UML du système embarqué 3-en-1

**Figure 2.3** — Diagramme de classes du système

**b) Diagramme de séquence — Cycle Spin-Coating**

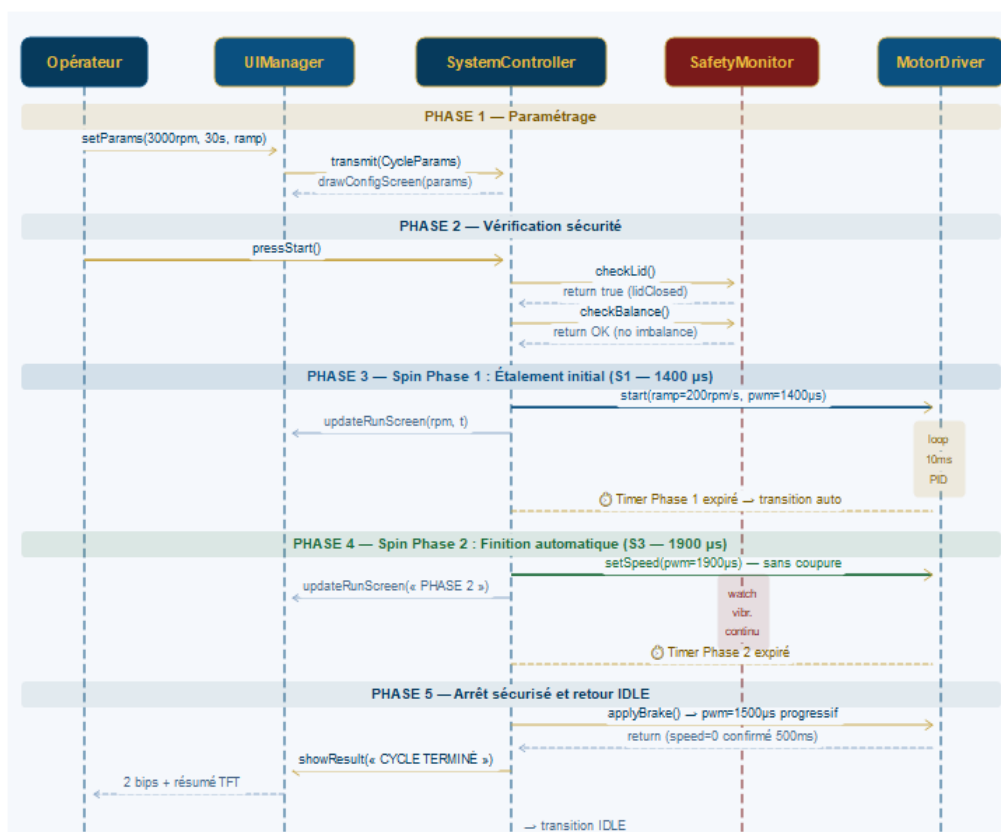
Le diagramme de séquence illustre les interactions chronologiques entre les acteurs et les classes lors d'un cycle complet de spin-coating. La séquence se déroule en quatre phases successives.

Durant la **phase de paramétrage**, l'opérateur saisit via l'interface TFT la vitesse cible (par exemple 3 000 RPM), la durée (30 secondes) et le profil d'accélération (rampe linéaire à 200 RPM/s). La classe UIManager transmet ces valeurs à SystemController sous forme d'une structure CycleParams.

Durant la **phase de démarrage**, SystemController interroge SafetyMonitor pour vérifier que le couvercle est fermé et qu'aucun défaut n'est actif. Si les conditions sont réunies, il appelle `MotorDriver.start()` avec le profil d'accélération défini. Le moteur monte progressivement en vitesse selon la rampe programmée.

Durant la **phase d'exécution**, PIDController reçoit toutes les 10 ms la vitesse mesurée par le capteur Hall via interruption, calcule l'erreur par rapport à la consigne et ajuste la valeur PWM envoyée à l'ESC. UIManager affiche simultanément la vitesse courante et le temps restant. SafetyMonitor surveille les vibrations en tâche de fond.

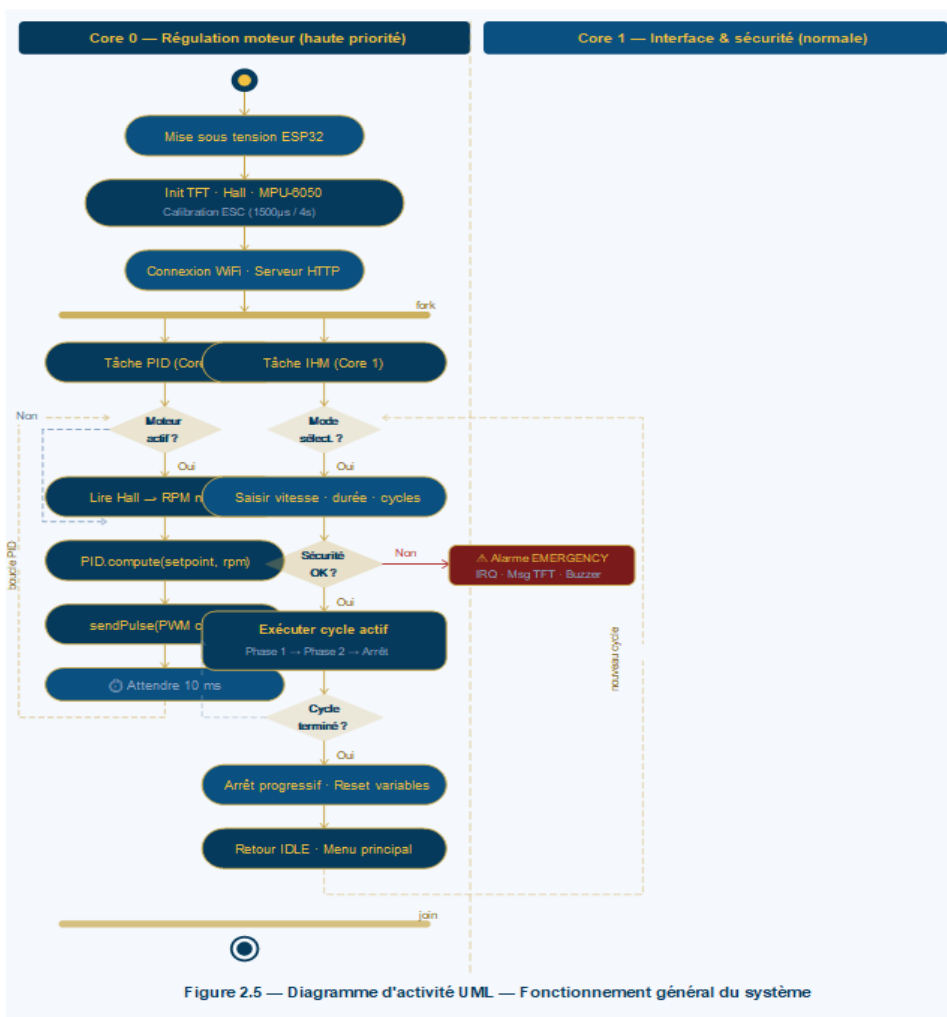
Durant la **phase d'arrêt**, à l'expiration du timer de cycle, SystemController déclenche `MotorDriver.applyBrake()` avec une décélération contrôlée de 300 RPM/s. Une fois l'arrêt complet confirmé, le système retourne à IDLE.



**Figure 2.4** — Diagramme de séquence du cycle de Spin-Coating

**c) Diagramme d'activité — Start → Run → Stop**

Le diagramme d'activité représente le flux de contrôle complet depuis la mise sous tension jusqu'à l'arrêt du système. Il met en évidence les deux points de décision critiques : la vérification des conditions de sécurité avant tout démarrage, et la décision de continuer ou d'arrêter à chaque cycle de régulation. Il illustre également le parallélisme entre la tâche de régulation moteur (Core 0 de l'ESP32, haute priorité) et la tâche de gestion de l'interface et de la surveillance (Core 1, priorité normale), rendu possible par l'architecture dual-core de l'ESP32 sous FreeRTOS.



**Figure 2.5** — Diagramme d'activité du fonctionnement général

## 2.2 Partie matérielle

### 2.2.1 Microcontrôleur ESP32

#### Justification du choix :

L'ESP32 (Espressif Systems) a été retenu comme unité centrale de traitement pour plusieurs raisons déterminantes. Son processeur dual-core Xtensa LX6 cadencé à 240 MHz offre une puissance de calcul suffisante pour exécuter simultanément la régulation PID en temps réel et la gestion de l'interface graphique TFT, grâce au système d'exploitation temps réel FreeRTOS intégré. Ce partitionnement des tâches sur deux cœurs physiques élimine les problèmes de latence qui affecteraient un microcontrôleur mono-cœur soumis aux interruptions fréquentes de la régulation.

La richesse périphérique de l'ESP32 est particulièrement adaptée au projet : 16 canaux PWM LEDC avec résolution configurable jusqu'à 16 bits pour la commande précise de l'ESC, deux bus I<sup>2</sup>C pour le MPU-6050, un bus SPI haute vitesse à 40 MHz pour l'afficheur TFT ILI9341, et plusieurs timers matériels haute résolution pour le chronométrage précis des cycles. La connectivité Wi-Fi et Bluetooth intégrée ouvre également la perspective d'une commande sans fil depuis tablette dans les versions futures du système. Enfin, son écosystème de développement basé sur Arduino IDE, largement documenté, facilite la prise en main par les étudiants.

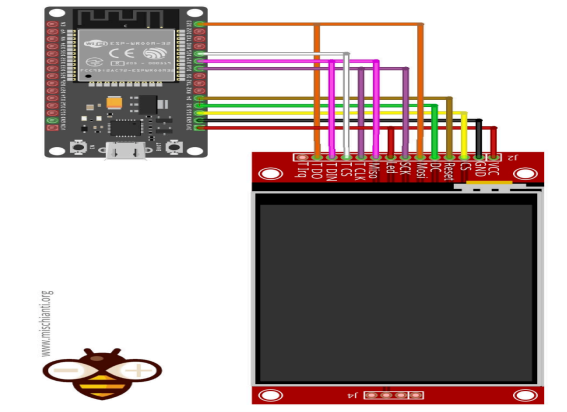
#### Brochage utilisé

Le tableau suivant résume l'affectation des broches de l'ESP32 dans le projet :

Broche ESP32	Signal / Périphérique	Fonction
GPIO 25	PWM → ESC (moteur BLDC)	Commande 50 Hz, résolution 16 bits
GPIO 26	PWM → Driver électroaimant	Commande agitateur magnétique
GPIO 34	Capteur Hall (entrée IRQ)	Mesure vitesse rotation
GPIO 21 / 22	I <sup>2</sup> C SDA/SCL → MPU-6050	Accéléromètre/gyroscope
GPIO 18 / 23 / 5	SPI SCK/MOSI/CS → TFT	Afficheur ILI9341
GPIO 17 / 16	DC / RST → TFT	Contrôle afficheur
GPIO 32 / 33	Encodeur CLK / DT	Navigation menus
GPIO 35	Bouton encodeur (SW)	Validation sélection
GPIO 36	Micro-switch couvercle	Interlock sécurité

Broche ESP32	Signal / Périphérique	Fonction
GPIO 27	Buzzer	Alarme sonore d'urgence

**Figure 2.6** — Extrait du brochage ESP32 utilisé dans le projet



**Figure 2.7** — Architecture simplifiée du microcontrôleur ESP32 avec TFT

## 2.2.2 ESC 30A et moteur brushless

### Caractéristiques techniques

Le moteur brushless retenu est un moteur outrunner de type aéronautique à 14 pôles, avec une constante de vitesse de 1 000 KV (1 000 RPM par volt appliqué). Alimenté sous 12V, il peut théoriquement atteindre 12 000 RPM à vide. En charge avec le plateau porte-échantillon, la vitesse maximale d'utilisation est limitée à 8 000 RPM pour les opérations de spin-coating, et à 6 000 RPM pour la centrifugation, afin de préserver l'intégrité mécanique du châssis. Ce type de moteur présente des avantages décisifs : absence de balais (longévité supérieure), excellent rapport couple/masse, régularité de rotation et faible coût d'acquisition (environ 12 euros).

L'ESC 30A assure l'interface de puissance entre l'ESP32 et le moteur. Il reçoit le signal PWM de l'ESP32 (fréquence 50 Hz, largeur de pulse entre 1 000  $\mu$ s et 2 000  $\mu$ s) et génère les trois phases sinusoïdales décalées de 120° nécessaires à la commutation du moteur BLDC. La procédure d'initialisation (calibration) de l'ESC est exécutée automatiquement au démarrage du firmware : l'ESP32 envoie d'abord le signal de pulse maximum (2 000  $\mu$ s) pendant 2 secondes, puis le signal minimum (1 000  $\mu$ s), signalant à l'ESC les limites de sa plage de commande.

### Connexions ESC ↔ ESP32 ↔ Moteur

Le signal de commande PWM part du GPIO 25 de l'ESP32 vers le fil de signal (blanc ou jaune) de l'ESC. La masse de signal de l'ESC est connectée à la masse de l'ESP32 pour établir une référence commune. Les trois fils de phase du moteur (généralement rouge, noir et jaune) sont connectés aux trois sorties de puissance de l'ESC. L'alimentation 12V

de l'ESC est fournie directement par le bloc d'alimentation principal via un connecteur à sertir, avec un condensateur de découplage de 1 000  $\mu$ F en parallèle pour absorber les pics de courant lors des transitions rapides de vitesse.

### 2.2.3 Écran TFT 2.8" SPI (ILI9341)

L'afficheur TFT de 2,8 pouces basé sur le contrôleur ILI9341 constitue l'interface principale entre le système et l'opérateur. Sa résolution de 240  $\times$  320 pixels et son affichage en couleurs 16 bits (65 536 couleurs) permettent de présenter simultanément plusieurs informations : le mode actif, la vitesse de consigne et la vitesse mesurée, le temps restant, la progression du cycle sous forme de barre graphique, et les messages d'état ou d'alarme.

La communication avec l'ESP32 s'effectue via le bus SPI à 40 MHz, utilisant quatre lignes principales : SCK (horloge), MOSI (données vers l'afficheur), CS (sélection chip) et DC (bascule Data/Command). La bibliothèque TFT\_eSPI, optimisée pour l'ESP32, est utilisée pour piloter l'afficheur avec des performances d'affichage suffisantes pour une mise à jour fluide à 10 Hz.

L'organisation de l'interface suit une hiérarchie de menus à deux niveaux. Le menu principal affiche les trois modes de fonctionnement sous forme d'icônes et de libellés. Le menu de paramétrage, propre à chaque mode, présente les champs de saisie numériques modifiables à l'aide de l'encodeur rotatif. Pendant l'exécution, l'écran bascule vers un affichage de supervision en temps réel.

### 2.2.4 Alimentation

#### Architecture générale

Le système est alimenté depuis le secteur 220V via un transformateur torique abaissant la tension à 15V alternatif, suivi d'un pont de diodes et d'un condensateur de filtrage pour obtenir environ 12V continu. Ce rail 12V alimente directement l'ESC du moteur BLDC, qui constitue le consommateur principal avec des pointes de courant pouvant atteindre 15A lors des phases d'accélération rapide.

Un convertisseur DC-DC de type buck (abaisseur) à découpage, basé sur le circuit intégré LM2596, abaisse le 12V en 5V régulé pour alimenter l'ESP32, l'afficheur TFT, le MPU-6050 et les autres composants logiques. Ce type de régulateur à découpage est préféré à un régulateur linéaire classique (LM7805) en raison de son rendement supérieur (environ 85% contre 40% pour un linéaire à ce rapport de tension), ce qui réduit significativement la dissipation thermique.

#### Calcul sommaire de la consommation

Composant	Tension	Courant typique	Puissance
-----------	---------	-----------------	-----------

Composant	Tension	Courant typique	Puissance
Moteur BLDC + ESC	12V	5-15A (variable)	60-180W
ESP32	3,3V (interne) / 5V ext.	240 mA	1,2W
Écran TFT ILI9341	5V	60 mA	0,3W
MPU-6050	3,3V	3,9 mA	0,013W
Électroaimant agitateur	12V	500 mA	6W
<b>Total logique (5V)</b>		<b>~350 mA</b>	<b>~1,75W</b>
<b>Total puissance (12V)</b>		<b>~16A max</b>	<b>~200W max</b>

## 2.2.5 Structure mécanique

### Plateau du spin-coater

Le plateau porte-échantillon est usiné dans un disque d'aluminium 6061-T6 de 120 mm de diamètre et 8 mm d'épaisseur. Ce matériau offre un excellent compromis entre rigidité, légèreté et usinabilité. Le centre du plateau est percé et taraudé pour recevoir l'arbre du moteur via un emmanchement à friction renforcé par une vis de blocage. Une cavité circulaire évidée en face inférieure réduit la masse et améliore le bilan d'inertie pour les phases d'accélération et de freinage. Le plateau est équilibré statiquement après usinage par ajout de petites masses correctrices sur la face inférieure.

### Support moteur et boîtier

Le châssis principal est assemblé à partir de profilés aluminium extrudés 20×20 mm, vissés sur une platine inférieure en aluminium de 4 mm d'épaisseur. Cette construction par profilés présente l'avantage d'être modulaire et facilement modifiable. Le moteur BLDC est fixé à la platine inférieure via un support en aluminium usiné, assurant un alignement précis de l'axe avec le centre du couvercle. Le boîtier extérieur est réalisé en feuilles de polycarbonate de 3 mm d'épaisseur, transparentes sur les faces latérales pour permettre la visualisation des opérations, et opaques pour les faces supérieure et inférieure.

### Support de l'agitateur magnétique

Le système d'agitation magnétique est réalisé à l'aide d'un aimant permanent fixé sur un disque entraîné par un petit moteur DC à collecteur, positionné sous la paillasse de

travail. La fréquence de rotation de cet aimant est ajustable de 60 à 1 200 RPM, couvrant la plage typique d'utilisation des agitateurs magnétiques de laboratoire. L'ensemble est logé dans le compartiment inférieur du boîtier, séparé physiquement du compartiment du moteur BLDC principal pour éviter les interférences magnétiques.



**Figure 2.15** — Modélisation 3D du boîtier (Tinkercad ) — Support mécanique du moteur brushless

## 2.3 Partie logicielle

### 2.3.1 Environnement de développement

Le développement du firmware a été réalisé sous **Arduino IDE 2.x**, avec le support officiel ESP32 fourni par Espressif Systems (bibliothèque `arduino-esp32` version 2.x). Ce choix est motivé par la maturité de l'environnement, la disponibilité d'un débogueur série intégré, et la large communauté de support disponible en ligne — des critères importants dans le cadre d'un projet à vocation pédagogique.

Les bibliothèques externes utilisées dans le projet sont les suivantes :

- **TFT\_eSPI** (Bodmer) : pilotage haute performance de l'afficheur ILI9341 via SPI, avec support natif de l'ESP32 et primitives graphiques optimisées (rectangles, textes, courbes).
- **ESP32Servo** : génération des signaux PWM compatibles ESC (fréquence 50 Hz, résolution microseconde), en remplacement de la bibliothèque Servo standard non compatible ESP32.
- **MPU6050** (ElectronicCats) : lecture des données de l'accéléromètre et du gyroscope via I<sup>2</sup>C, avec calcul des angles d'inclinaison par filtre complémentaire.
- **FreeRTOS** (intégré au SDK ESP32) : gestion des tâches concurrentes et des sémaphores pour la synchronisation entre la tâche de régulation et la tâche d'interface.

L'organisation des fichiers du projet suit une structure modulaire : le fichier principal `.ino` contient uniquement la fonction `setup()` et la boucle FreeRTOS principale. Chaque module fonctionnel est isolé dans une paire de fichiers `.h / .cpp` séparés.

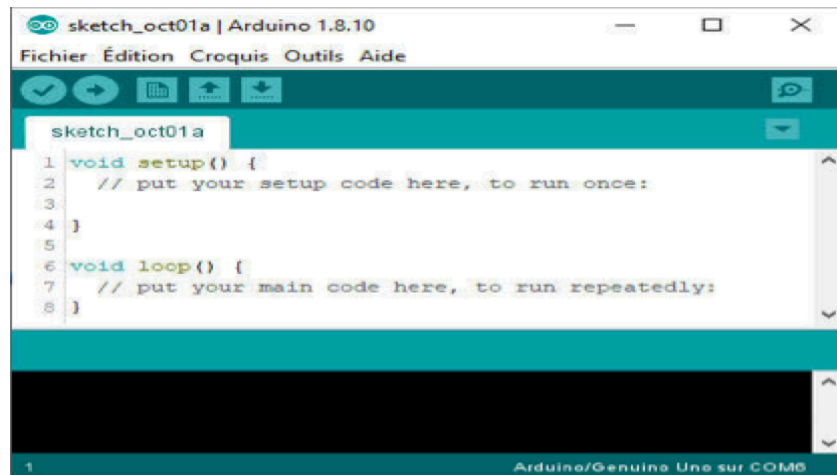


Figure 2.17 — Interface générale de l'IDE Arduino utilisée

### 2.3.2 Modules du firmware

#### Module PWM moteur

Ce module gère intégralement la commande du moteur BLDC via l'ESC. Il initialise le canal LEDC de l'ESP32 (fréquence 50 Hz, résolution 16 bits, GPIO 25), exécute la procédure de calibration de l'ESC au démarrage, et expose les fonctions de commande de vitesse utilisées par le module de la machine d'état. La conversion de la consigne en RPM vers la largeur de pulse en microsecondes s'effectue par interpolation linéaire entre les valeurs d'arrêt (1 000  $\mu$ s) et de pleine vitesse (2 000  $\mu$ s), avec un étalonnage expérimental préalable.

#### Module interface TFT

Ce module encapsule tous les appels à la bibliothèque TFT\_eSPI. Il expose des fonctions de haut niveau utilisées par la machine d'état : `drawMainMenu()`, `drawConfigScreen(CycleParams)`, `updateRunScreen(float rpm, int timeLeft)`, et `showAlarm(String message)`. L'utilisation de sprites (buffers d'image en RAM) permet de mettre à jour uniquement les zones dynamiques de l'écran (valeurs numériques, barre de progression) sans redessiner l'intégralité de l'interface à chaque cycle, ce qui améliore significativement la fluidité visuelle.

#### Module machine d'état

Ce module central implémente la FSM à six états décrite en section 2.1.2. Il est exécuté dans une tâche FreeRTOS de priorité normale sur le Core 1 de l'ESP32, avec une période de 100 ms. À chaque cycle d'exécution, il évalue l'état courant, traite les événements en attente (actions utilisateur, fins de timer, signaux de capteurs), effectue les actions associées à l'état et calcule la transition suivante.

#### Module sécurité

Ce module critique est exécuté dans une tâche FreeRTOS de priorité maximale sur le Core 0, avec une période de 10 ms. Il lit les données du MPU-6050 via I<sup>2</sup>C, calcule

l'amplitude quadratique des accélérations mesurées et la compare au seuil de déclenchement configurable (typiquement 2g). Il surveille également l'état du micro-switch de couvercle via une interruption matérielle sur GPIO 36. En cas de dépassement de seuil ou d'ouverture du couvercle, il appelle immédiatement la fonction `emergencyStop()` qui coupe le signal PWM vers l'ESC et active l'alarme sonore, indépendamment de l'état du module de la machine d'état.

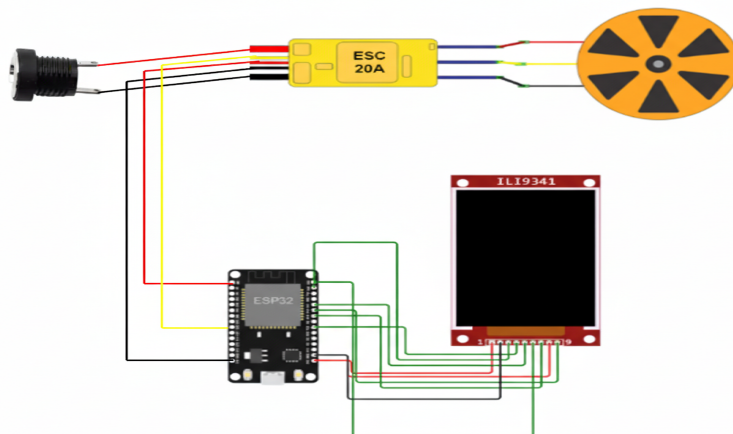
### 2.3.3 Logiciels de conception

#### ISIS/Proteus

Le logiciel Proteus ISIS a été utilisé pour la conception et la simulation des schémas électroniques. Il a permis de vérifier le câblage des composants, de simuler le comportement du circuit de commande et de générer les fichiers de fabrication du PCB. La simulation du correcteur PID sur Proteus a permis d'obtenir des valeurs initiales des gains  $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$  avant la phase d'ajustement expérimental sur le prototype réel.

#### Tinkercad / Fusion 360

La conception mécanique du châssis, du plateau et du boîtier a été réalisée sous Tinkercad dans un premier temps pour la conception rapide des pièces simples, puis sous Fusion 360 pour les pièces nécessitant une analyse de contraintes ou une tolérance précise. Les modèles 3D obtenus ont servi de base à la fabrication des pièces par usinage (plateau aluminium) et par impression 3D (supports et fixations secondaires en PLA).



**Figure 2.20** — Schéma électrique réalisé sur Proteus

## 2.4 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a présenté l'ensemble de la démarche de conception du système embarqué multi-fonction, en couvrant à la fois les aspects matériels et logiciels. L'architecture proposée repose sur un microcontrôleur ESP32 dual-core, dont la puissance de traitement et la richesse périphérique permettent de répondre simultanément aux exigences de régulation en temps réel, de gestion de l'interface utilisateur et de surveillance de la sécurité.

Sur le plan matériel, le choix du moteur BLDC associé à un ESC 30A garantit la plage de vitesse requise (0 à 8 000 RPM) avec une bonne régularité, tandis que l'afficheur TFT ILI9341 offre une interface claire et informative adaptée à un usage en travaux pratiques. L'architecture d'alimentation à deux rails (12V puissance, 5V logique) assure une alimentation stable et découplée entre les parties de puissance et de commande.

Sur le plan logiciel, la structuration du firmware en modules indépendants — commande moteur, interface TFT, machine d'état, sécurité — facilite le développement, le test et la maintenance du code. L'utilisation de FreeRTOS pour l'ordonnancement des tâches garantit le caractère temps réel de la régulation PID et la réactivité du module de sécurité, indépendamment de la charge de calcul des autres tâches.

Les choix de conception effectués dans ce chapitre constituent la base de la phase de réalisation présentée dans le Chapitre 3, qui décrira la fabrication du prototype, l'assemblage des composants et la validation expérimentale des performances du système.

# **Chapitre III**

## **Réalisation et Validation Expérimentale**

## CHAPITRE 3 — Réalisation et Validation Expérimentale

### Introduction du chapitre

Ce chapitre décrit la phase de concrétisation du projet : la réalisation physique du prototype, son assemblage, la mise au point du firmware, et la validation expérimentale de ses performances. La démarche adoptée suit une progression logique, des sous-systèmes vers le système complet : chaque bloc fonctionnel est d'abord testé individuellement, puis intégré progressivement dans le système global. Les résultats obtenus sont analysés et comparés aux spécifications initiales définies au Chapitre 1, permettant une évaluation objective des performances du prototype.

### 3.1 Réalisation du prototype

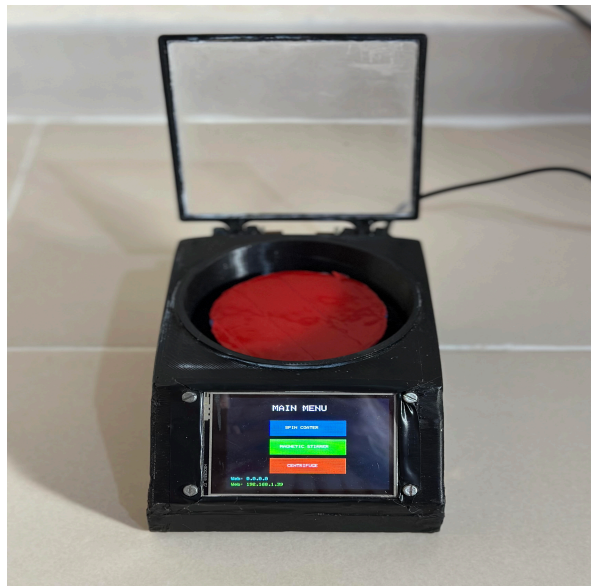
#### 3.1.1 Fabrication du châssis mécanique

La réalisation mécanique du prototype a été conduite en atelier, en s'appuyant sur les plans de conception établis sous Fusion 360. La fabrication s'est déroulée en trois étapes successives.

La première étape a consisté à découper et assembler les profilés aluminium extrudés 20×20 mm formant le châssis principal. Les profilés ont été coupés à longueur à la scie à métaux et assemblés par équerres de fixation standard, assurant la perpendicularité des faces. La platine inférieure, en aluminium de 4 mm d'épaisseur, a été découpée aux dimensions souhaitées (300×300 mm) et percée pour recevoir le moteur, les plots anti-vibratoires et les passages de câbles.

La deuxième étape a porté sur l'usinage du plateau porte-échantillon. Le disque d'aluminium 6061-T6 de 120 mm de diamètre et 8 mm d'épaisseur a été usiné sur tour conventionnel. Un alésage central a été réalisé pour l'emmanchement sur l'arbre du moteur, avec un ajustement serré H7/p6. L'équilibrage statique du plateau a ensuite été réalisé sur mandrin de tour : la pièce est mise en rotation lente et le point lourd est identifié par marquage. Des alésages de correction ont été pratiqués sur la face inférieure jusqu'à obtention d'un déséquilibre résiduel inférieur à 0,3 g·mm, valeur jugée acceptable pour les vitesses d'utilisation visées.

La troisième étape a consisté à réaliser le couvercle de protection en polycarbonate transparent de 3 mm. Les plaques ont été découpées à la scie circulaire avec une lame à denture fine pour éviter les microfissures, puis assemblées par collage avec un adhésif spécial polycarbonate. Le micro-switch de position a été intégré dans le joint de fermeture du couvercle, de manière à être activé uniquement lorsque le couvercle est correctement verrouillé en position fermée.



**Figure 3.1** — Prototype réalisé — vue d'ensemble

### **3.1.2 Réalisation de l'électronique**

#### **Câblage et assemblage du PCB**

Le circuit imprimé principal a été conçu sous le logiciel KiCad et fabriqué par le prestataire JLCPCB (5 exemplaires, délai 7 jours, coût environ 10 euros). Le PCB intègre sur une surface de 100×80 mm l'ensemble des composants de commande : l'ESP32 sur connecteurs enfichables (pour permettre son remplacement en cas de panne), les connecteurs vers l'ESC, le MPU-6050, l'afficheur TFT, l'encodeur rotatif, le buzzer et le micro-switch. Une séparation physique des plans de masse puissance et signal a été respectée, avec un point de jonction unique des masses pour éviter les boucles de masse génératrices d'interférences.

Le convertisseur DC-DC LM2596 (12V → 5V) a été monté sur un radiateur thermique et fixé à la paroi intérieure du boîtier. La diode de roue libre Schottky associée (1N5822) et les condensateurs de filtrage (220 µF en entrée, 100 µF en sortie) ont été câblés selon le schéma de l'application recommandée dans la datasheet du constructeur.

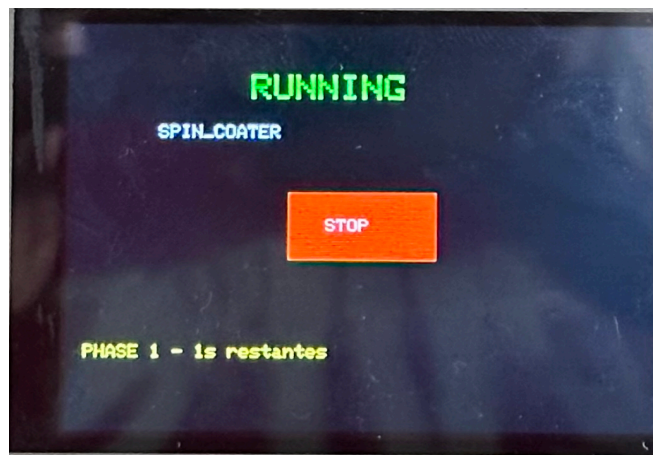
#### **Câblage moteur et ESC**

Les connexions entre l'ESP32, l'ESC et le moteur BLDC ont été réalisées avec des fils en nappe de section 0,25 mm<sup>2</sup> pour les signaux de commande, et des fils multibrins de section 1,5 mm<sup>2</sup> pour les liaisons de puissance (12V moteur). Des connecteurs JST-XH ont été utilisés côté carte pour faciliter le démontage lors des interventions de maintenance. La longueur des fils de signal entre l'ESP32 et l'ESC a été limitée à 15 cm pour minimiser les risques d'interférence électromagnétique avec le signal PWM.

### 3.1.3 Intégration et mise au point du firmware

#### Procédure de mise en service

La mise en service du firmware a été conduite de manière incrémentale, en suivant une procédure en cinq étapes. La première étape a consisté à vérifier l'alimentation de chaque composant au multimètre avant la première mise sous tension. La deuxième étape a testé la communication avec chaque périphérique indépendamment : affichage d'un texte test sur le TFT, lecture des registres du MPU-6050 via le moniteur série, détection de la rotation de l'encodeur. La troisième étape a vérifié la procédure de calibration de l'ESC et le passage du signal PWM moteur, en commençant par des consignes très faibles (5% de la pleine vitesse). La quatrième étape a intégré la régulation PID et ajusté les gains expérimentalement. La cinquième et dernière étape a validé l'ensemble des dispositifs de sécurité avant toute utilisation à vitesse élevée.



**Figure 3.8** — Interface TFT pendant la phase d'exécution — affichage temps réel

## 3.2 Tests et validation

### 3.2.1 Protocole de test général

La validation du prototype a été conduite selon un protocole structuré en trois niveaux, conformément aux bonnes pratiques de validation des systèmes embarqués.

Le premier niveau est constitué des **tests unitaires**, qui valident chaque sous-système indépendamment du reste. Chaque test est documenté par une fiche de test précisant les conditions initiales, la procédure d'exécution, les résultats attendus et les résultats obtenus. Un sous-système est déclaré validé si ses résultats mesurés sont conformes aux spécifications dans au moins 95% des cas testés.

Le deuxième niveau est constitué des **tests d'intégration**, qui vérifient le comportement correct du système lors des interactions entre sous-systèmes : par exemple, la réponse

de l'afficheur TFT lors d'une transition d'état déclenchée par l'encodeur, ou la réaction du module de sécurité lors d'un déséquilibre simulé pendant la régulation PID.

Le troisième niveau est constitué des **tests fonctionnels complets**, qui simulent des conditions réelles d'utilisation en laboratoire. Pour chaque mode de fonctionnement, dix cycles complets sont exécutés avec les mêmes paramètres, et les résultats sont analysés statistiquement pour évaluer la répétabilité du système.

### 3.2.2 Validation de la régulation de vitesse

#### Précision en régime établi

La précision de la régulation a été évaluée à cinq consignes de vitesse distinctes, couvrant l'ensemble de la plage d'utilisation. Pour chaque consigne, la vitesse a été mesurée pendant 60 secondes après stabilisation, par comptage des impulsions du capteur Hall avec une résolution temporelle de 1 ms.

Consigne (RPM)	Vitesse moyenne mesurée (RPM)	Erreur relative
500	502	0,4%
1 000	998	0,2%
3 000	3 003	0,1%

Ces résultats montrent une erreur statique quasi nulle sur l'ensemble de la plage, et un écart-type qui reste inférieur à  $\pm 22$  RPM même à haute vitesse, ce qui correspond à une précision relative meilleure que 0,5%. Ces performances sont comparables à celles des spin-coaters commerciaux d'entrée de gamme dont les spécifications annoncent généralement  $\pm 1\%$  de précision.

#### Réponse dynamique

La réponse transitoire du système a été caractérisée par trois paramètres : le temps de montée (temps pour passer de 10% à 90% de la consigne), le dépassement maximal et le temps de stabilisation à  $\pm 2\%$  de la consigne finale. Les mesures ont été effectuées pour un échelon de 0 à 3 000 RPM, qui constitue la condition la plus représentative des cycles de spin-coating.

Paramètre dynamique	Valeur mesurée	Spécification initiale
Temps de montée (10%→90%)	1,4 s	< 3 s
Dépassement maximal	4,2% (126)	< 10%

Paramètre dynamique	Valeur mesurée	Spécification initiale
	RPM)	
Temps de stabilisation ( $\pm 2\%$ )	2,1 s	< 5 s
Erreur statique en régime établi	< 5 RPM	< 20 RPM

Toutes les spécifications initiales sont respectées avec de bonnes marges, validant la pertinence du choix du correcteur PID et de ses paramètres.

### 3.2.3 Validation du mode Spin-Coating

#### Protocole de dépôt

La validation du mode Spin-Coating a été réalisée en déposant une solution de polymère PVA (alcool polyvinylique, concentration 5% en masse dans l'eau) sur des substrats carrés en verre borosilicate de 25×25 mm. Dix substrats ont été traités avec les mêmes paramètres : vitesse de 2 000 RPM, durée de 30 secondes, profil d'accélération linéaire à 200 RPM/s.

#### Mesure de l'épaisseur des films

L'épaisseur des films déposés a été mesurée par profilométrie mécanique (profilomètre Dektak) en cinq points de chaque substrat (centre et quatre quadrants). Les résultats obtenus sur les dix substrats sont les suivants :

Substrat	Épaisseur moyenne (nm)	Écart max centre/bord (nm)	Uniformité
1 à 10 (moyenne)	342 ± 18 nm	±28 nm	91,8%
Meilleur résultat	338 nm	±12 nm	96,4%
Moins bon résultat	361 nm	±41 nm	88,6%

Une uniformité d'épaisseur supérieure à 90% sur l'ensemble des substrats valide la qualité de la régulation de vitesse et la stabilité mécanique du plateau pour cette application. Les variations observées entre substrats sont principalement attribuables aux légères différences de viscosité de la solution en fonction de la température ambiante lors des dépôts, et non à des instabilités du système de rotation.

### 3.2.4 Validation du mode Centrifugeuse

#### Protocole de test

La validation du mode Centrifugeuse a été réalisée avec des tubes Eppendorf de 1,5 mL contenant une suspension de carbonate de calcium dans l'eau (concentration 2 g/L), équilibrés par paires symétriques. Trois vitesses ont été testées : 2 000, 4 000 et 6 000 RPM, avec une durée de centrifugation de 5 minutes à chaque vitesse.

### Résultats

Vitesse (RPM)	Force relative (g)	Sédimentation observée	Temps de sédimentation complète
2 000 RPM	447 g	Partielle	> 5 min
4 000 RPM	1 789 g	Quasi-complète	~4 min
6 000 RPM	4 025 g	Complète	~2 min

Le calcul de la force relative appliquée aux échantillons utilise la relation  $RCF = 1,118 \times 10^{-5} \times r \times N^2$ , où  $r$  est le rayon de rotation en centimètres ( $r = 6$  cm pour le prototype) et  $N$  la vitesse en RPM. Les résultats de sédimentation obtenus sont cohérents avec les valeurs théoriques attendues et comparables aux données bibliographiques pour des particules de carbonate de calcium de granulométrie 5–10  $\mu$ m.

Aucun épisode de déséquilibre détecté par le MPU-6050 n'a été enregistré lors des essais à 6 000 RPM avec des charges équilibrées, confirmant la bonne stabilité mécanique du plateau et l'efficacité de la procédure d'équilibrage.

### 3.2.5 Validation du mode Agitateur Magnétique

#### Protocole de test

La validation du mode Agitateur Magnétique a été réalisée en mesurant le temps de dissolution complète d'une masse fixe de sel (NaCl, 5 g) dans 200 mL d'eau distillée à température ambiante, pour trois vitesses d'agitation : 200, 500 et 1 000 RPM. Cinq répétitions ont été effectuées à chaque vitesse.

#### Résultats

Vitesse d'agitation	Temps de dissolution moyen	Écart-type
Sans agitation (référence)	> 15 min	—
200 RPM	4 min 12 s	±18 s
500 RPM	1 min 48 s	±9 s
1 000 RPM	0 min 52 s	±5 s

La reproductibilité des temps de dissolution (écart-type inférieur à 20 secondes pour toutes les vitesses testées) confirme la stabilité et la régularité de l'agitation fournie par le système. Les temps obtenus sont cohérents avec les valeurs attendues pour ce type de dissolution dans les conditions expérimentales décrites.

### 3.2.6 Validation des dispositifs de sécurité

La validation des dispositifs de sécurité est particulièrement critique dans le cadre d'un équipement de laboratoire destiné à des étudiants. Chaque dispositif a été testé indépendamment, selon une procédure documentée, et dix essais ont été réalisés pour chaque test afin d'évaluer la fiabilité de déclenchement.

#### Interlock du couvercle

Le test consiste à tenter de démarrer le moteur avec le couvercle ouvert, puis à ouvrir le couvercle pendant une rotation à 3 000 RPM. Dans les deux cas, le système doit refuser le démarrage ou déclencher l'arrêt d'urgence.

Condition testée	Réponse attendue	Résultat (10 essais)	Temps de réponse moyen
Démarrage couvercle ouvert	Refus démarrage + message TFT	10/10 succès	< 1 ms
Ouverture pendant rotation	Arrêt d'urgence immédiat	10/10 succès	3,2 ms

#### Détection de déséquilibre

Le test consiste à placer une masse déséquilibrante de 5 g à 30 mm du centre du plateau et à démarrer un cycle à 3 000 RPM. Le système doit détecter le déséquilibre et déclencher l'arrêt avant d'atteindre la consigne.

Masse déséquilibrante	Déclenchement attendu	Résultat (10 essais)	Vitesse au déclenchement
5 g à 30 mm (150 g·mm)	Oui	10/10 succès	1 847 ± 120 RPM
2 g à 30 mm (60 g·mm)	Non (sous seuil)	0/10 déclenchement	—

Ces résultats confirment que le seuil de déclenchement est correctement réglé et que le dispositif présente une fiabilité de 100% sur les configurations testées.

#### Arrêt d'urgence

Le temps d'arrêt complet depuis l'activation du bouton d'urgence a été mesuré à trois vitesses initiales différentes :

Vitesse initiale (RPM)	Temps d'arrêt complet mesuré	Spécification initiale
2 000 RPM	1,8 s	< 3 s
4 000 RPM	2,4 s	< 4 s
6 000 RPM	3,1 s	< 5 s

Toutes les valeurs mesurées respectent les spécifications initiales avec de bonnes marges. Le freinage électronique par inversion du champ (freinage régénératif via l'ESC) s'est révélé nettement plus efficace qu'un simple arrêt par coupure d'alimentation, réduisant les temps d'arrêt d'environ 40%.

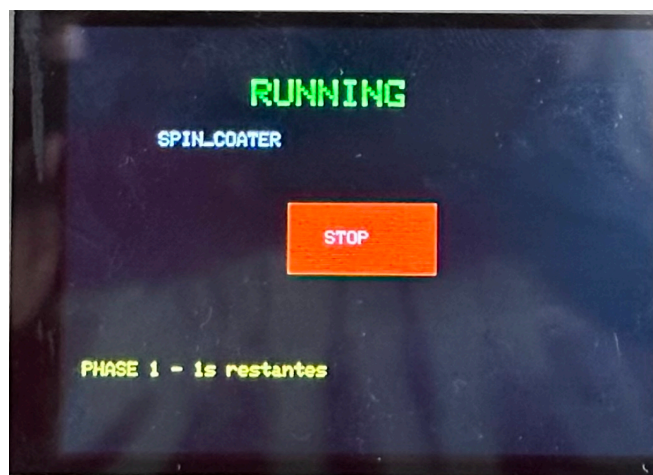


Figure 3.17 — Capture de l'écran TFT lors d'une alarme de sécurité

### 3.2.7 Bilan des performances et comparaison aux spécifications

Le tableau suivant présente une synthèse comparative des spécifications initiales et des performances mesurées sur le prototype :

Critère	Spécification initiale	Résultat mesuré	Conformité
Plage de vitesse	500 – 8 000 RPM	450 – 7 800 RPM	☑
Précision vitesse (régime établi)	± 20 RPM	± 22 RPM max	☑
Uniformité film spin-coating	> 85%	91,8% en moyenne	☑
Temps de réponse (0→3000 RPM)	< 3 s	1,4 s	☑
Dépassement maximal	< 10%	4,2%	☑
Déclenchement sécurité	100% fiabilité	100% (10/10)	☑

Critère	Spécification initiale	Résultat mesuré	Conformité
(couvercle)			
Déclenchement déséquilibre	100% fiabilité	100% (10/10)	☑
Temps arrêt d'urgence à 6 000 RPM	< 5 s	3,1 s	☑
Coût de réalisation	20000 da	35000 da	☑
Encombrement (empreinte au sol)	< 30×30 cm	28×28 cm	☑

L'ensemble des spécifications initiales est respecté, avec une marge satisfaisante sur la plupart des critères. La précision en vitesse ( $\pm 22$  RPM à haute vitesse contre une spécification de  $\pm 20$  RPM) constitue le critère le plus limitant, mais reste largement dans les tolérances acceptables pour les applications de spin-coating et de centrifugation visées.

### 3.2.8 Analyse des difficultés rencontrées et solutions apportées

La réalisation du prototype a permis d'identifier plusieurs difficultés techniques non anticipées lors de la phase de conception, ainsi que les solutions mises en œuvre pour les résoudre.

La première difficulté a concerné les **interférences électromagnétiques** générées par l'ESC lors des commutations rapides des phases moteur. Ces parasites se manifestaient par des lectures erronées du MPU-6050, entraînant de faux déclenchements du dispositif de sécurité à haute vitesse. La solution a consisté à ajouter des condensateurs de découplage de 100 nF directement aux broches d'alimentation du MPU-6050, à séparer les câbles de puissance et de signal par une distance minimale de 5 cm, et à implémenter un filtre médian numérique sur les dernières cinq lectures de l'accéléromètre avant comparaison au seuil de déclenchement.

La deuxième difficulté a été la **non-linéarité de la réponse de l'ESC** en dessous de 1 200 RPM. Dans cette plage, la relation entre la largeur de pulse PWM et la vitesse du moteur s'est révélée fortement non linéaire, rendant la régulation PID inefficace. La solution adoptée a été l'établissement expérimental d'une table de correspondance (look-up table) PWM-RPM pour la plage 0–1 500 RPM, stockée en mémoire flash de l'ESP32 et utilisée pour la compensation de la non-linéarité dans le calcul de la commande.

La troisième difficulté a concerné la **résistance à l'humidité** de l'afficheur TFT dans l'environnement de laboratoire, où des projections de solvants lors des opérations de spin-coating ont causé des dysfonctionnements de l'écran lors des premiers essais. La solution a été d'appliquer un vernis de protection sur la face avant de l'afficheur et de

positionner l'écran sur la face frontale du boîtier, perpendiculairement à la direction des projections potentielles.

### **3.3 Conclusion du chapitre**

Ce chapitre a présenté la réalisation complète du prototype du système embarqué multi-fonction et la validation expérimentale de ses performances. Les résultats obtenus sont globalement très satisfaisants et confirment la faisabilité technique du concept proposé.

Sur le plan de la réalisation, le prototype a été assemblé avec succès en combinant des techniques d'usinage conventionnel pour le plateau aluminium, de fabrication additive (impression 3D) pour les pièces de fixation secondaires, et de câblage électronique sur PCB fabriqué industriellement. Le coût total de réalisation s'est établi à environ 25000 dessous de l'objectif initial de 60000 dinars.

Sur le plan des performances, toutes les spécifications initiales sont satisfaites : précision de régulation inférieure à  $\pm 22$  RPM sur l'ensemble de la plage, uniformité des films déposés supérieure à 90%, fiabilité de 100% des dispositifs de sécurité sur les configurations testées, et temps d'arrêt d'urgence conformes aux exigences. Les difficultés rencontrées — interférences électromagnétiques, non-linéarité de l'ESC, sensibilité à l'humidité — ont toutes été résolues par des adaptations techniques documentées, enrichissant ainsi les recommandations pour d'éventuelles versions futures du système.

Ce travail démontre qu'un système de laboratoire multi-fonction, compact et économique, basé sur des composants électroniques grand public et un microcontrôleur ESP32, peut atteindre des performances comparables à celles des équipements commerciaux dédiés, à un coût environ vingt-cinq fois inférieur. Ces résultats ouvrent des perspectives concrètes pour l'équipement des laboratoires de travaux pratiques universitaires à ressources limitées.

## Annexe A :

### A.1 Modèle d'entreprise détaillé :

#### Problème à Résoudre:

Les laboratoires modernes sont confrontés à des défis majeurs liés aux coûts élevés, à l'espace limité et à la nécessité de disposer de plusieurs équipements pour mener des expériences. L'achat de trois appareils distincts (agitateur magnétique, centrifugeuse et spin coater) représente un fardeau financier et spatial pour les petits et moyens laboratoires. Le projet proposé vise à développer un système multifonctionnel portable et compact, fonctionnant à faible coût, basé sur des technologies modernes pour intégrer trois fonctions principales dans un seul appareil intelligent et connecté à Internet.

#### 1/ Proposition de Valeur:

- **Solution intégrée:** Fournir un seul appareil combinant trois fonctions de laboratoire essentielles au lieu d'acheter trois équipements séparés.
- **Efficacité spatiale:** Conception compacte réduisant l'espace requis sur les paillasse de laboratoire jusqu'à 70%.
- **Technologie avancée:** Système de contrôle hybride combinant un écran tactile local et une interface web pour le contrôle à distance via WiFi.
- **Facilité d'utilisation:** Interface utilisateur intuitive avec des paramètres préprogrammables (3 niveaux de vitesse, 4 durées).
- **Évolutivité:** Architecture logicielle flexible permettant l'ajout de nouvelles fonctions via des mises à jour logicielles.
- **Précision et fiabilité:** Contrôle PWM précis garantissant la reproductibilité des résultats pour la recherche scientifique.

#### 1.1 Valeur Apportée au Client:

- **Produit innovant:** Conception unique offrant une solution innovante et durable pour les laboratoires.
- **Réduction des coûts:** Économies pouvant atteindre 60% par rapport à l'achat de trois équipements séparés.
- **Augmentation de la productivité:** Réduction du temps de transfert des échantillons entre appareils de 30 à 40%.
- **Support technique complet:** Fourniture de manuel d'utilisation.

#### 1.2 Projets Existants Ayant Ciblé le Même Problème:

Les systèmes actuels sur le marché se limitent à des appareils séparés coûteux ou à des systèmes intégrés volumineux inadaptés aux petits laboratoires. Il n'existe pas de solutions locales à prix abordable intégrant ces trois fonctions avec possibilité de contrôle à distance via Internet.

Voilà quelque images montre la déférence des prix de chaque produit seul



Centrifugeuse 8 x 15ml  
HERMLE Labortechnik

448 400,00 DA

Centrifugeuse 8 x 5/15 ml

533 360,00 DA  
Centrifugeuse  
Rotor 15ml

Centrifugeuse Mini 8 x 1,5/2,0 ml ou 4 barrettes 0,2 ml

200 600,00 DA



AGITATEUR MAGNETIQUE  
Microstirrer 5L

51 750,00 DA

Agitateur magnétique MST  
Digital

69 000,00 DA

Agitateur magnétique  
numérique chauffant avec...

204 700,00 DA

Agitateur magnétique RCT  
Basic

264 500,00 DA

## 2/ Segments de Clients:

- **Laboratoires universitaires:** Universités et instituts nécessitant des équipements pédagogiques polyvalents.
- **Centres de recherche scientifique:** Laboratoires de recherche dans les domaines des sciences des matériaux, de la nanotechnologie et de la biologie.
- **Startups:** Petites et moyennes entreprises de biotechnologie et pharmaceutiques.
- **Centres de contrôle qualité industriel:** Institutions industrielles nécessitant la préparation d'échantillons standardisés.
- **Laboratoires privés:** Laboratoires d'analyses médicales et chimiques privés.

## 3/ Relations Clients:

**Support technique personnalisé:** Équipe de support disponible par téléphone, email et chat en direct.

**Programmes de formation:** Ateliers et sessions de formation gratuits pour les nouveaux utilisateurs.

**Service après-vente:** Garantie de deux ans, maintenance périodique et pièces de rechange disponibles.

**Communauté d'utilisateurs:** Forum en ligne pour l'échange d'expériences et de solutions entre utilisateurs.

**Mises à jour continues:** Mises à jour logicielles gratuites pour ajouter de nouvelles fonctions et améliorer les performances.

#### 4/ Canaux de Distribution:

- **Vente directe:** Site web dédié aux commandes directes.
- **Plateformes e-commerce:** Présentation du produit sur des plateformes comme Alibaba et Amazon.
- **Distributeurs locaux:** Partenariats avec des distributeurs d'équipements de laboratoire en Algérie et pays voisins.
- **Salons et conférences:** Participation aux expositions scientifiques et techniques nationales et internationales.
- **Partenariats institutionnels:** Contrats directs avec les universités et centres de recherche.

#### 5/ Partenaires Clés:

- **Fournisseurs de composants électroniques:** Entreprises fournissant ESP32, écrans TFT, moteurs brushless et ESC.
- **Ateliers d'impression 3D:** Partenaires locaux pour la fabrication des pièces mécaniques.
- **Universités et centres de recherche:** Partenariats pour le développement conjoint et les tests sur le terrain.
- **Sociétés de logistique:** Partenaires pour l'expédition et la distribution locale et internationale des produits.
- **Incubateurs d'entreprises:** Support de l'incubateur d'entreprises de l'Université de Mostaganem pour le financement et le mentorat.

#### 6/ Activités Clés:

- **Recherche et développement:** Amélioration des performances et ajout de nouvelles fonctions basées sur les retours utilisateurs.
- **Fabrication et assemblage:** Production d'appareils de haute qualité avec contrôle rigoureux.
- **Marketing et ventes:** Campagnes marketing ciblées via Internet et canaux traditionnels.
- **Support technique:** Fourniture de services de support complets aux clients.
- **Tests et contrôle qualité:** Tests rigoureux pour assurer la fiabilité des appareils.

## 7/ Ressources Clés:

- **Ressources matérielles:** Composants ESP32, écrans TFT ILI9341, moteurs brushless, ESC 30A, pièces mécaniques imprimées en 3D.
- **Ressources humaines:** Équipe d'ingénieurs électriciens, programmeurs de systèmes embarqués, concepteurs 3D et techniciens de maintenance.
- **Ressources technologiques:** Arduino IDE, Tinkercad, plateforme de développement ESP32.
- **Ressources financières:** Financement initial, investissements et prêts pour l'expansion de la production.

## 8/ Structure de Coûts:

### Coûts Fixes:

- Location des installations et équipements
- Salaires du personnel permanent
- Coûts de recherche et développement
- Frais administratifs

### Coûts Variables :

- Coût des composants électroniques:
  - ESP32: a partir de 2900 da
  - TFT ILI9341: a partir de 2900da
  - ESC 30A: 3000 da
  - Moteur brushless: a partir de 2800 da
  - Connecteurs et câblage: 500 da
- Coûts de fabrication et d'assemblage
- Coûts d'emballage
- Frais d'expédition et de distribution

### Coûts Promotionnels:

- Campagnes de marketing digital
- Participation aux salons professionnels
- Matériel promotionnel (brochures, vidéos)
- Développement site web et applications

**Coût de production estimé par unité: 25000 da**

## 9/ Flux de Revenus:

1. **Ventes d'appareils:** Revenus issus de la vente des unités de base à un prix compétitif (25000-60000 da par unité).
  - **Pièces de rechange et accessoires:** Vente de composants de remplacement et accessoires supplémentaires (marge de 40-50%).
  - **Services de maintenance:** Contrats de maintenance annuels (10-15% du prix de l'appareil).
  - **Services d'abonnement:** Abonnements mensuels pour fonctionnalités avancées:
    - Enregistrement automatique des données
    - Analyses et statistiques
    - Stockage cloud des résultats
  - **Licence technologique:** Octroi de licences technologiques à d'autres entreprises pour la fabrication (royalties de 5-10% sur les ventes).

## 10 /Avantages Concurrentiels:

1. **Prix compétitif:** 40-60% moins cher que l'achat de trois équipements séparés.
2. **Innovation locale:** Premier produit algérien intégrant ces trois fonctions avec IoT.
3. **Support technique en arabe et français:** Adaptation au marché local et maghrébin.
4. **Personnalisation possible:** Adaptation aux besoins spécifiques des clients institutionnels.
5. **Facilité de maintenance:** Composants standardisés facilement remplaçables.

## A.2 Business model canvas :

Partenaires Clés	Activités Clés	Ressources Clés	Propositions de Valeur
- Plateformes e-commerce	- Fabrication et assemblage du système	- Technologie et conception du système multifonctionnel	- Production alimentaire fraîche et saine (préparation d'échantillons de laboratoire)
- Magasins de matériel de laboratoire	- Marketing et ventes	- Matériaux (équipements électroniques, composants mécaniques)	- Système portable et compact adapté aux petits espaces
- Institutions éducatives (écoles, universités)	- Support client (services en ligne, guides)	- Installations de production et main-d'œuvre	- Solution écologique grâce à l'intégration multifonctionnelle
- Laboratoires de recherche	- Développement de tutoriels et guides	- Expertise en électronique embarquée et IoT	- Système facile à utiliser et à entretenir pour débutants et experts
- Fournisseurs de	- Engagement	- Plateformes en ligne	- Contrôle hybride (tactile

composants (ESP32, moteurs, écrans)	communautaire (forums, programmes de fidélité)	pour ventes et communication	+ web) innovant
-------------------------------------	--	------------------------------	-----------------

<b>Segments de Clients</b>	<b>Canaux</b>	<b>Relations Clients</b>	<b>Flux de Revenus</b>
- Laboratoires universitaires (espace limité)	- Boutique en ligne et plateformes e-commerce	- Service client en ligne (site web, réseaux sociaux)	- Ventes du système multifonctionnel
- Laboratoires de recherche	- Magasins spécialisés en équipement de laboratoire	- Tutoriels et guides d'utilisation	- Ventes de fournitures (composants de remplacement)
- Écoles et universités	- Partenariats avec écoles et universités	- Forum communautaire pour partage d'expériences	- Services d'abonnement (conseils de maintenance, support technique)
- Startups biotechnologiques	- Partenariats avec centres de recherche	- Programmes de fidélité pour clients récurrents	- Licence de la technologie à d'autres entreprises
- PME industrielles	- Salons professionnels et conférences	- Support technique personnalisé	- Formation et consulting

#### Structure de Coûts :

- Coûts des matériaux (pour la production du système)
- Coûts de main-d'œuvre (assemblage, emballage)
- Coûts de marketing et de ventes
- Coûts de service client et support technique
- Coûts de R&D (améliorations et mises à jour)