



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie Électrique et d'Informatique
Département d'Électronique



MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme
de Master 2 en Électronique
Spécialité : Systèmes Embarqués

**Conception et développement
d'un système de projection
contrôlé pour applications IOT.**

Présenté par : **Zakaria SIAGHI** et **Siham SAIDANI**

Mémoire encadré par : Massine GANA

REMERCIEMENT

Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, tout particulièrement notre encadrant Mr GANA Massine pour ses précieux conseils tout au long de ce projet, la directrice de l'incubateur madame AMNACHE et tous ses membres ainsi les formateurs.

Nos remerciements vont également à nos familles pour leur soutien moral constant, leur patience et leur compréhension durant cette période de travail intense.

Ainsi qu'à l'ensemble des enseignants qui nous ont transmis leur savoir.

Enfin, un grand merci à nos amis pour leur encouragement, leur aide et leur bonne humeur, qui ont été d'un précieux réconfort tout au long de cette aventure.

Résumé

Ce projet présente le développement d'un système de projection laser mobile, intelligent et sans fil, contrôlé à distance via une application Android. Le système repose sur une carte STM32 et deux moteurs pas à pas permettant de positionner un faisceau laser avec une grande précision. Les coordonnées de déplacement sont transmises en temps réel depuis l'application mobile vers la STM32 via Bluetooth. Ce système a des applications potentielles dans les domaines médicaux (rééducation, guidage chirurgical), militaires (désignation de cibles), industriels (marquage et automatisation), sportifs (entraînement et analyse) et pédagogiques. Le prototype développé démontre la faisabilité technique et ouvre la voie à des améliorations futures telles que l'intégration de l'IA, de la vision par ordinateur, et d'une communication Wi-Fi.

Abstract

This project presents the development of a mobile, intelligent, and wireless laser projection system, remotely controlled via an Android application. The system is based on an STM32 microcontroller and two stepper motors, enabling precise positioning of a laser beam. Movement coordinates are transmitted in real time from the mobile app to the STM32 via Bluetooth. The system has potential applications in the medical field (rehabilitation, surgical guidance), military (target designation), industrial (marking and automation), sports (training and analysis), and education. The developed prototype demonstrates technical feasibility and paves the way for future improvements, such as AI integration, computer vision, and Wi-Fi communication.

ملخص

يعرض هذا المشروع تطوير نظام إسقاط ليزري ذكي، محمول ولاسلكي، يتم التحكم فيه عن بُعد عبر تطبيق أندرويد. يعتمد النظام على متحكم STM32 ومحركين خطيين لتحريك شعاع الليزر بدقة عالية. يتم إرسال إحداثيات الحركة في الوقت الفعلي من التطبيق إلى STM32 عبر البلوتوث. للنظام تطبيقات واعدة في المجالات الطبية (إعادة التأهيل، التوجيه الجراحي)، العسكرية (تحديد الأهداف)، الصناعية (الوسم والأتمتة)، الرياضية (التدريب والتحليل)، والتعليمية. يثبت النموذج الأولي الذي تم تطويره جدوى التنفيذ ويفتح آفاقاً لتطويرات مستقبلية مثل دمج الذكاء الاصطناعي، الرؤية الحاسوبية، والاتصال عبر Wi-Fi.

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
PWM	Pulse Width Modulation
GPIO	General Purpose Input/Output
FreeRTOS	Real-Time Operating System FreeRTOS
IDE	Integrated Development Environment
IA	Intelligence Artificielle
PCB	Printed Circuit Board
LoRa	Long Range Radio (mentionné comme future évolution)
FPU	Floating Point Unit
CMSIS	Cortex Microcontroller Software Interface Standard
MCU	Microcontroller Unit
BMC	Business Model Canvas
SWOT	Strengths, weaknesses, opportunities, threats
PESTEL	Politique, économique, social, technologique, écologique, légal
CAP	Caractéristiques, avantages, preuves
SONCASE	Sécurité, orgueil, nouveauté, confort, argent, sécurité, environnement

Table de matières

Liste des abréviations

Table de figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre 1 : Étude et conception du système

I.1	Introduction.....	1
I.2	Présentation du projet.....	1
I.2.1	Application mobile Android (développée sous Android Studio en Java).....	2
I.2.2	Carte STM32 (programmée en C avec IAR EW / STM32CUBEMX)	3
I.2.3	Moteurs pas à pas et driver (TB6600)	4
I.3	Justification du choix.....	6
I.3.1	Contrôle moteur avancé.....	6
I.3.2	Programmation embarquée.....	6
I.3.3	Communication sans fil.....	7
I.3.4	Développement mobile.....	7
I.3.5	Algorithmes de transformation géométrique.....	7
I.3.6	Applications pratiques et perspectives d'évolution.....	7
I.3.7	Pertinence académique et professionnelle	8
I.4	Objectifs et enjeux du système.....	8
I.4.1	Objectifs du projet	8
I.4.1.1	Développer une application Android interactive	8
I.4.1.2	Assurer une communication sans fil stable.....	8
I.4.1.3	Piloter un système de moteurs pas à pas.....	9
I.4.1.4	Traduire les coordonnées en déplacements moteurs.....	9
I.4.1.5	Évaluer les performances du système.....	9
I.4.2	Enjeux du système.....	10
I.4.2.1	Enjeux techniques.....	10
I.4.2.2	Enjeux fonctionnels	10
I.5	Applications potentielles	11
I.5.1	Applications médicales.....	11
I.5.2	Applications militaires et de sécurité.....	11
I.5.3	Applications industrielles et technologiques	11

I.6	Les systèmes embarqués et leur rôle dans le contrôle de dispositifs électroniques.....	11
I.6.1	Définition.....	12
I.6.2	Cas d'application	12
I.6.3	Architecture technique.....	13
I.6.4	Le rôle des systèmes embarqués.....	14
I.6.5	Les différents types de systèmes embarqués	14
I.7	Travaux similaires	14
I.7.1	Applications mobiles pour le contrôle à distance.....	15
I.7.1.1	Applications Domotiques (Smart Home, maison connectée).....	15
I.7.1.2	Applications de l'Automatisation Industrielle.....	15
I.7.1.3	Applications de contrôle de robots	15
I.7.1.4	Applications de Contrôle d'Objets IoT.....	16
I.7.1.5	Application pour le contrôle de véhicules (drones, voitures, etc.).....	16
I.7.1.6	Applications de Surveillance et Sécurité	16
I.7.1.7	Applications pour la gestion énergétique	16
I.8	Communication entre un smartphone et un microcontrôleur.....	17
I.8.1	Intérêt de la communication smartphone-microcontrôleur.....	17
I.8.2	Modèles de communication.....	17
I.8.3	Technologies de communication sans fil.....	18
I.8.3.1	Bluetooth.....	18
I.8.3.2	Wi-Fi.....	19
I.8.3.3	LoRa / LoRaWAN.....	19
I.8.4	Critères de choix pour le projet	19
I.9	Étude des moteurs pas à pas et de leur contrôle	20
I.9.1	Définition d'un moteur pas à pas.....	20
I.9.2	Principe de fonctionnement	20
I.9.3	Types de moteurs pas à pas.....	21
I.9.3.1	Moteurs à aimants permanents (Permanent Magnet)	21
I.9.3.2	Moteurs à réluctance variable.....	21
I.9.3.3	Moteurs hybrides.....	21
I.9.4	Modes de pilotage.....	22
I.9.4.1	Mode ondulatoire (Wave Drive).....	22
I.9.4.2	Mode pas complet (Full Step)	23
I.9.4.3	Mode demi-pas (Half Step)	23
I.9.4.4	Mode micro-pas (Microstepping).....	23
I.9.5	Sélection d'un moteur pas à pas	24
I.10	Conclusion	24

Chapitre 2: *Implémentation et développement*

II.1	Introduction	25
II.2	Spécifications et conception	26
II.2.1	Description de l'architecture globale du système	26
II.2.2	Choix des composants matériels.....	27
II.2.2.1	Microcontrôleur : STM32 Nucleo-L476RG.....	27
II.2.2.2	Moteur pas à pas (TANDON KP4M2-203).....	28
II.2.2.3	Driver de moteur pas à pas : TB6600	28
II.2.2.4	Module Bluetooth : HC-05	29
II.2.3	Conception de l'interface utilisateur sur smartphone	30
II.2.3.1	L'écran d'accueil	30
II.2.3.2	L'écran de suivi tactile.....	31
II.3	Développement du système embarqué	31
II.3.1	Programmation de la STM32 pour le contrôle du moteur pas à pas.....	31
II.3.1.1	Configuration du module Bluetooth HC-05	34
II.3.1.2	Programmation de la STM32 pour la communication Bluetooth.....	35
II.4	Développement de l'application mobile.....	36
II.4.1	Présentation des outils	36
II.4.1.1	Android Studio	37
II.4.1.2	Langage Java	37
II.4.1.3	API Bluetooth Android	37
II.4.2	Interface graphique et interaction tactile.....	38
II.4.2.1	Gestion des événements tactiles	38
II.4.2.2	Transmission des coordonnées à la STM32	38
II.4.2.3	Gestion de la connexion Bluetooth.....	39
II.5	Intégration et tests	40
II.5.1	Tests unitaires	41
II.5.2	Tests d'intégration du système complet	41
II.6	Conclusion.....	42

Chapitre 3: *Évaluation et perspectives*

III. 1	Introduction	43
III. 2	Conception et Prototypage.....	43
III.2.1	Description de la Conception du Prototype.....	43
III.2.1.1	Spécifications Matérielles et Logicielles Utilisées.....	44
III.2.1.2	Choix des Technologies et Justification	45
III.2.2	Développement du Prototypage.....	46
III.2.2.1	Étapes du Développement du Logiciel	46

III.2.2.2	Aspects Techniques de l'Intégration Matériel-Logiciel.....	49
III.3	Tests et Validation.....	52
III.3.1	Méthodologie de test.....	52
III.3.1.1	Types de tests réalisés.....	52
III.3.1.2	Critères d'évaluation et mesures utilisées.....	53
III.3.2	Résultats des tests	53
III.3.2.1	Points forts et limites identifiés	53
III.4	Études de cas et Applications.....	54
III.5	Discussion.....	55
III.5.1	Analyse Critique des Résultats par Rapport aux Objectifs Initiaux	55
III.5.2	Comparaison avec les Méthodes Existantes et Autres Projets Similaires	55
III.5.3	Implication des Résultats Obtenus pour les Applications Futures et les Développements Technologiques.....	55
III.6	Optimisations possibles	56
III.7	Conclusion.....	57

StartUP

IV.1	Introduction.....	58
IV.2	Premier axe : Présentation du Projet	58
IV.2.1	Problème constaté	58
IV.2.2	Solution proposée	58
IV.2.3	Les Valeurs proposées.....	59
IV.2.4	Equipe de travail	61
IV.2.5	Objectifs du projet	62
IV.2.5.1	Objectif global	62
IV.2.5.2	Objectifs Techniques	62
IV.2.5.3	Objectifs Commerciaux	62
IV.2.5.4	Objectifs à court, moyen et long terme	62
IV.2.6	Calendrier de réalisation du projet	63
IV.3	Deuxième axe : Aspects Innovant	64
IV.3.1	Nature de l'innovation	64
IV.3.2	Domaines d'innovation.....	64
IV.4	Troisième axe : Analyse stratégique du marché.....	66
IV.4.1	Le segment du marché	66
	Les segments cibles incluent.....	66
IV.4.2	Intensité de la concurrence	66
IV.4.2.1	Concurrence actuelle.....	66
IV.4.2.2	Avantages concurrentiels	67

IV43	Analyse PESTEL.....	67
IV44	Analyse SWOT.....	68
IV44.1	Analyse croisée de la matrice SWOT.....	68
IV45	Stratégie Marketing	69
IV5	Quatrième axe : Plan de production de l'organisation.....	70
IV5.1	Le processus de production	70
IV52	L'approvisionnement	70
IV53	La main d'œuvre.....	71
IV54	Les principaux partenaires.....	71
IV6	Cinquième axe : Plan financier.....	72
IV7	Sixième axe : Prototype expérimental	76
IV7.1	Présentation du prototype réalisé.....	76
IV72	Fonctionnalités actuellement testées.....	77
IV73	Résultats obtenus lors des essais	77
IV8	Conclusion	80
Conclusion générale		

Table de Figures

Figure I. 1 : Interface utilisateur d'Android studio.....	2
Figure I. 2 : GPIO de la STM32L476RG.....	3
Figure I. 3 : TB6600 et moteur pas à pas.....	4
Figure I. 4 : Domaines d'intégration des systèmes embarqués.....	12
Figure I. 5 : L'architecture technique d'un système embarqué.....	13
Figure I. 6 : Communication entre les dispositifs.....	17
Figure I. 7 : Evolution du Bluetooth.....	18
Figure I. 8 : Structure interne des moteurs pas à pas.....	20
Figure I. 9 : Structure d'un moteur pas à pas unipolaire.....	21
Figure I. 10 : Structure d'un moteur pas à pas Bipolaire.....	22
Figure I. 11 : Wave Drive du moteur pas à pas.....	22
Figure I. 12 : Full step du moteur pas à pas.....	23
Figure I. 13 : Mode demi-pas d'un moteur pas à pas.....	23
Figure I. 14 : Microstepping du moteur pas à pas.....	24
Figure II. 1 : schéma fonctionnel de l'architecture global du système.....	26
Figure II. 2 : Carte STM32 Nucleo-L476RG.....	27
Figure II. 3 : Moteur pas à pas TANDON KP4M2-203.....	28
Figure II. 4 : Driver TB6600.....	29
Figure II. 5 : le module HC-05.....	29
Figure II. 6 : Câblage du moteur avec driver et STM32.....	31
Figure II. 7 : Diagramme de la tâche moteur assurant le déplacement sur les deux axes.....	33
Figure II. 8 : Câblage STM32 et HC-05.....	34
Figure II. 9 : schematic de HC-05.....	34
Figure II. 10 : Configuration de l'UART.....	35
Figure II. 12 : Organigramme de la tâche UART pour la réception des coordonnées.....	36
Figure II. 13 : Organigramme du déroulement fonctionnel de l'application mobile.....	40
Figure III. 1 : Boitier du système.....	43
Figure III. 2 : UI du STM32CUBEMX.....	44
Figure III. 3 : Palette dans Android Studio.....	45
Figure III. 4 : version alpha du System de projection.....	46
Figure III. 5 : Ecran d'accueil de l'application android.....	47
Figure III. 6 : Toast demande d'activation Bluetooth.....	48
Figure III. 7 : Liste des appareils Bluetooth.....	48
Figure III. 8 : Toast echoue de connexion.....	48
Figure III. 9 : Toast connexion.....	48
Figure III. 10 : Toast deconnexion.....	48
Figure III. 11 : Interface tactile de l'application Android.....	49
Figure III. 12 : TB6600 brancher a Kp4m2-203.....	50
Figure III. 13 : STM32L476RG brancher avec HC05.....	51
Figure IV.1 : Prototype réalisé.....	64

Liste des tableaux

<i>Tableau (IV.1) : Objectifs à court, moyen et long terme.....</i>	<i>62</i>
<i>Tableau (IV.2) : Calendrier de réalisation du projet.....</i>	<i>63</i>
<i>Tableau (IV.3) : Analyse PESTEL</i>	<i>67</i>
<i>Tableau (IV.4) : Analyse SWOT</i>	<i>68</i>
<i>Tableau (IV.5) : Stratégie de SONCASE / CAP.....</i>	<i>69</i>
<i>Tableau (IV.6) : Tableau des bilans</i>	<i>72</i>
<i>Tableau (IV.7) : Tableau de la ligne de trésorerie année N.....</i>	<i>73</i>
<i>Tableau (IV.8) : Tableau de la ligne de trésorerie année N+1 ...</i>	<i>74</i>
<i>Tableau (IV.9) : Tableau de la ligne de trésorerie année N+2</i>	<i>75</i>
<i>Tableau (IV.10) : Tableau du compte de résultat.....</i>	<i>76</i>
<i>Tableau (IV.11) : Business Model Canvas</i>	<i>79</i>

Introduction Générale

Ces dernières années, le développement rapide des systèmes embarqués et des technologies de communication sans fil a profondément transformé le paysage technologique mondial. Des domaines variés tels que la domotique, la robotique, la médecine ou encore l'industrie s'appuient désormais sur des systèmes intelligents, capables de fonctionner de manière autonome ou sous le contrôle de l'utilisateur via des interfaces intuitives.

Dans ce contexte d'évolution technologique constante, la nécessité d'interagir à distance avec des dispositifs électroniques devient cruciale. Que ce soit pour guider un robot, ajuster un capteur ou contrôler un dispositif mécanique, l'utilisateur doit disposer d'un moyen simple, rapide et efficace pour transmettre des commandes et recevoir des retours. Les smartphones, grâce à leur portabilité, leur puissance de calcul et leur connectivité Bluetooth, s'imposent comme des interfaces idéales pour cette interaction.

Cependant, concevoir un système capable de réagir en temps réel aux gestes de l'utilisateur et de traduire ces commandes en mouvements précis d'un dispositif mécanique, tout en garantissant la fiabilité et la simplicité d'utilisation, reste un défi. Ce défi implique la coordination de plusieurs modules technologiques : microcontrôleurs, moteurs pas à pas, interfaces mobiles, protocoles de communication, etc.

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre projet : concevoir et développer un système de projection laser contrôlé par smartphone, permettant de diriger précisément un faisceau laser à l'aide de simples mouvements du doigt sur un écran. Ce système repose sur une carte STM32 qui pilote deux moteurs pas à pas, en fonction des coordonnées envoyées via Bluetooth par une application Android développée spécifiquement à cet effet.

Notre objectif principal est donc de mettre en œuvre un système embarqué interactif, basé sur une interface mobile conviviale et une communication sans fil fiable, permettant de commander un dispositif de manière précise et intuitive. À travers ce projet, nous explorons non seulement la conception matérielle, mais également les aspects logiciels liés à l'embarqué et au développement mobile.

Ce système apparaît eu de nombreux débouchés dans différentes organisations :

- Domaine médical : guidage pour la chirurgie assistée par ordinateur.

INTRODUCTION GENERALE

- Domaine militaire : désignation de cibles ou déroulement de simulations d'opérations.
- Domaine industriel : contrôle laser pour la découpe, le marquage ou l'alignement.
- Domaine sportif et ludique : entraînements, spectacles de lumières interactifs, simulation.

Ce mémoire comprend trois parties :

Le premier chapitre présente l'étude effectuée sur le projet, sa conception et la sélection des choix technologiques.

Le deuxième chapitre se consacre à l'implémentation du système, de la réalisation du firmware STM32 à celle de l'application Android.

Le troisième chapitre propose une étude sur l'évaluation des performances du système et sur ses perspectives d'évolutions.

Enfin, le quatrième chapitre évoque les possibilités d'évolution vers une application industrielle, voire commerciale.

Ce projet se veut une démonstration de la faisabilité et de l'intérêt d'un système interactif basé sur des technologies embarquées et sur des moyens de communication sans fil, qui ouvre de nombreuses voies d'applications innovant

Chapitre 1

Étude et conception du système

I.1 Introduction

Dans un contexte où l'interaction entre l'homme et les systèmes électroniques devient de plus en plus sophistiquée, la conception de solutions embarquées intelligentes constitue un enjeu majeur. Ce chapitre est consacré à l'étude et à la conception d'un système de contrôle de projection laser, piloté à distance via un smartphone. L'objectif principal est de développer une solution flexible, précise et accessible, capable de positionner un faisceau laser à l'aide de moteurs pas à pas commandés par une carte STM32.

Nous commencerons par présenter le projet dans son ensemble ainsi que les raisons ayant motivé son choix. Ensuite, nous définirons les objectifs fonctionnels et techniques du système, avant d'examiner ses enjeux dans divers domaines d'application tels que le médical, le militaire ou encore le sport.

Ce chapitre aborde également les fondements des systèmes embarqués, leur rôle dans le contrôle de dispositifs électroniques, ainsi que les travaux similaires existants dans la littérature ou l'industrie. Enfin, une attention particulière sera accordée aux moyens de communication entre un smartphone et un microcontrôleur, avec un focus sur les technologies sans fil telles que le Bluetooth, ainsi qu'à l'étude détaillée des moteurs pas à pas et de leur pilotage.

Cette étude préliminaire est essentielle pour poser les bases techniques solides du système, avant d'aborder sa mise en œuvre dans les chapitres suivants.

I.2 Présentation du projet

Le but du présent projet est d'élaborer un système de guidage laser piloté par un smartphone via une carte STM32 et un moteur pas à pas avec un driver microstep TB6600. Comme point d'orgue de ce projet, permettre à l'utilisateur de faire glisser son doigt sur l'écran d'une application mobile tournée vers une plateforme Android pour pouvoir déplacer un laser, en d'autres termes, le téléguider au gré de ses besoins.

Les coordonnées (X, Y) qui sont calculées en temps réel sont envoyées à la carte STM32 via un module Bluetooth HC-05, carte électronique qui doit les interpréter afin de les transmettre à un driver de moteurs pas à pas, ce qui appelle à travet de son propre déplacement (X, Y) le laser sur ses axes X et Y.

Les éléments constitutifs de ce projet intègrent des ressources matérielles et logicielles:

I.2.1 Application mobile Android (développée sous Android Studio en Java) :

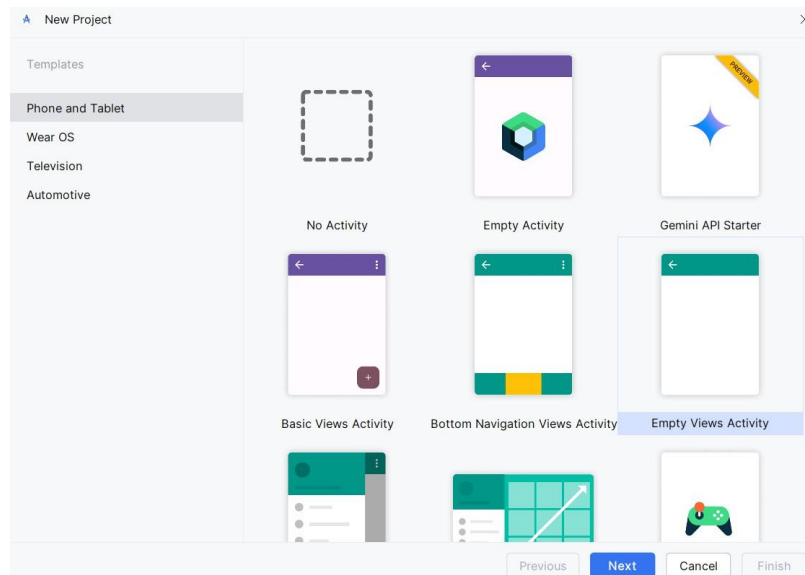


Figure I.1 : Interface utilisateur d'Android studio

L'application mobile Android permet à l'utilisateur de tracer une trajectoire en cliquant avec son doigt sur l'écran tactile. Les coordonnées X et Y du point touché sont récupérées en temps réel. Ces coordonnées sont ensuite converties dans un repère adapté, où l'origine (0,0) se situe au centre de l'écran.

Le développement de cette application a été réalisé à l'aide de l'environnement Android Studio, l'outil officiel de développement d'applications Android, en utilisant le langage de programmation Java. Ce choix s'est imposé naturellement en raison de la stabilité, de la richesse de l'écosystème Android, et de la facilité d'accès aux bibliothèques standards de gestion de l'interface utilisateur, de traitement d'événements tactiles, et surtout de communication Bluetooth.

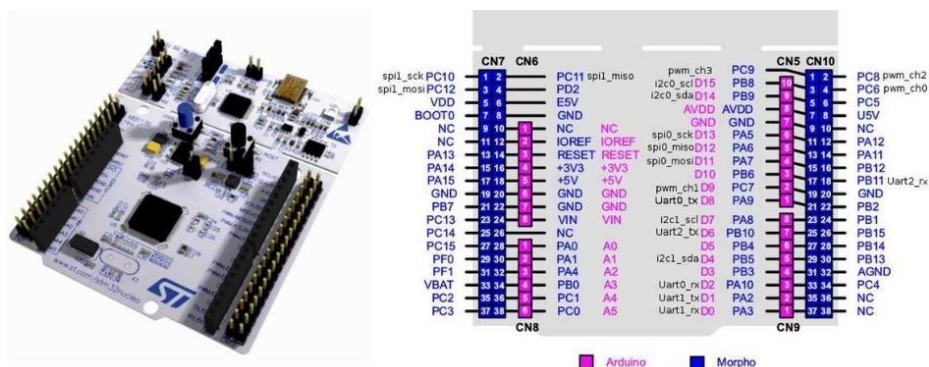
L'application repose sur l'utilisation de l'API Bluetooth fournie par Android, qui permet de scanner les périphériques disponibles, d'établir une connexion avec un module Bluetooth série (en l'occurrence le module HC-05 connecté à la carte STM32), et d'envoyer en temps réel les données nécessaires au déplacement du laser. Chaque mouvement du doigt sur l'écran est converti en coordonnées X et Y puis en centimètres, qui sont ensuite envoyées via la liaison Bluetooth sous forme de chaînes de caractères, suivant un format prédéfini compréhensible par le microcontrôleur.

I.2.2 Carte STM32 (programmée en C avec IAR EW / STM32CUBEMX) :

La carte utilisée dans ce projet est une NUCLEO-64 STM32L476RG, développée par STMicroelectronics. Elle est basée sur un microcontrôleur ARM Cortex-M4 32 bits avec unité de calcul en virgule flottante (FPU), appartenant à la famille STM32L4. Cette famille de microcontrôleurs est optimisée pour offrir un excellent compromis entre performance et faible consommation d'énergie, ce qui la rend idéale pour les applications embarquées nécessitant à la fois de bonnes capacités de traitement et une grande efficacité énergétique.

Le microcontrôleur **STM32L476RG** fonctionne jusqu'à une fréquence de 80 MHz, dispose de 1 Mo de mémoire Flash et de 128 Ko de SRAM. Il intègre de nombreux périphériques avancés, tels que :

- Interfaces de communication : UART, SPI, I2C,
- Convertisseurs analogique-numérique (ADC) 12 bits,
- Convertisseurs numérique-analogique (DAC),
- Timers avancés et de précision,
- PWM (Pulse Width Modulation),
- GPIO configurables,
- Contrôleurs DMA pour le transfert de données sans charge processeur.



développement STM32CubeMX, qui facilite la configuration matérielle des périphériques, ainsi qu'avec des IDE tels que IAR Embedded Workbench ou STM32CubeIDE.

La carte NUCLEO-L476RG est par ailleurs conçue pour être modulaire et extensible, grâce à ses connecteurs Arduino Uno R3 et ST morpho, permettant de connecter facilement des modules complémentaires (shields, capteurs, moteurs, etc.).

Grâce à ces caractéristiques, cette carte constitue une solution souple et performante pour la mise en œuvre de systèmes embarqués, et a été retenue dans ce projet pour son rapport performance/consommation, sa richesse fonctionnelle, sa facilité d'intégration, ainsi que pour l'abondance de ressources logicielles et documentaires mises à disposition par la communauté STM32.

I.2.3 Moteurs pas à pas et driver (TB6600) :

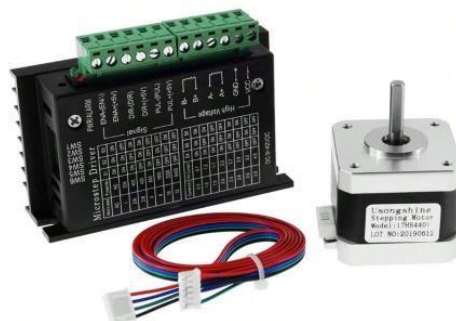


Figure I 3 : TB6600 et moteur pas à pas

Le TB6600 microstep driver est un contrôleur de moteur pas à pas couramment utilisé dans les applications industrielles et de prototypage nécessitant un contrôle précis de moteurs bipolaires. Il permet de piloter des moteurs pas à pas en fournissant les signaux de puissance nécessaires, tout en gérant différentes résolutions de micro-pas pour améliorer la fluidité et la précision des déplacements.

Basé sur le circuit intégré TB6600HG de Toshiba, ce driver supporte des tensions d'alimentation allant généralement de 9 V à 42 V et des courants de sortie jusqu'à 3,5 A (valeur maximale selon le modèle). Il est conçu pour contrôler des moteurs pas à pas de type bipolaire 2 phases.

Le driver est configurable pour différents niveaux de subdivision (microstepping), permettant ainsi d'adapter le comportement du moteur en fonction des besoins de l'application:

- Pas complets,
- 1/2 pas,
- 1/4 de pas,
- 1/8 de pas,
- 1/16 de pas (et parfois plus selon les versions).

Le TB6600 reçoit en entrée des signaux logiques simples (STEP et DIR) provenant d'un microcontrôleur (comme la carte STM32), ce qui facilite son intégration dans un système embarqué. Ces signaux contrôlent respectivement :

- La direction de rotation du moteur (DIR),
- Le déclenchement des pas ou micro-pas (STEP).

En complément, le driver dispose de réglages matériels (par dip-switch ou cavaliers) permettant de configurer le courant maximal fourni au moteur, la résolution de micro-pas, ainsi que des protections intégrées contre la surchauffe, les surintensités, et les sous-tensions.

Le choix du TB6600 dans ce projet s'explique par sa robustesse, sa large compatibilité avec divers moteurs pas à pas, sa simplicité d'utilisation, ainsi que sa capacité à fournir un courant élevé, garantissant un fonctionnement fiable et performant pour le pilotage des moteurs contrôlant le système de projection laser.

Concernant Le KP4M203 est un moteur pas à pas bipolaire 2 phases, conçu pour des applications nécessitant un positionnement précis, un contrôle fiable de la vitesse, et une excellente répétabilité. Les moteurs pas à pas, contrairement aux moteurs à courant continu classiques, permettent un contrôle direct de la position angulaire sans avoir besoin de retour de position (codeur), en fonction du nombre de pas commandés.

Le modèle KP4M203 est un moteur compact, robuste et adapté aux montages de type CNC, imprimantes 3D, systèmes de déplacement linéaire ou robotique légère.

Ses principales caractéristiques sont généralement les suivantes (selon la fiche technique du fabricant et le modèle exact) :

- **Type** : moteur pas à pas bipolaire 2 phases
- **Pas par tour** : $1,8^\circ$ par pas (soit 200 pas pour un tour complet en mode pas entier)
- **Tension nominale** : typiquement 3 V à 4 V
- **Courant par phase** : environ 1,5 A à 2 A (à vérifier selon le modèle utilisé)
- **Couple maximal** : jusqu'à environ 3,5 kg·cm (ou plus selon le modèle)
- **Dimensions** : format NEMA 17 ou équivalent compact
- **Construction** : rotor à aimants permanents, stator à enroulements bipolaires

I.3 Justification du choix

Le choix de développer un système de projection laser contrôlé par smartphone repose sur plusieurs aspects techniques et applicatifs qui s'articulent autour des technologies émergentes et des compétences recherchées dans le domaine de l'ingénierie embarquée et de la robotique de précision :

I.3.1 Contrôle moteur avancé :

L'utilisation de moteurs pas à pas pour le positionnement du faisceau laser constitue un élément fondamental de ce projet car elle permet d'atteindre une précision angulaire exceptionnelle, essentielle pour les applications de projection. Ces moteurs offrent un contrôle exact de la position angulaire, garantissant ainsi une répétabilité des pointages laser avec une résolution de l'ordre du pas moteur (généralement $1,8^\circ$) Cette technologie est largement utilisée dans les applications industrielles de haute précision telles que les systèmes de découpe laser, les projecteurs astronomiques et les dispositifs de mesure topographique. La maîtrise de ce type de contrôle moteur bidimensionnel (axes X et Y) représente un défi technique considérable qui permet d'appréhender les systèmes de positionnement multi-axes.

I.3.2 Programmation embarquée :

L'implémentation sur microcontrôleur STM32 permet de développer des algorithmes complexes de transformation géométrique en temps réel. Le système doit traiter les coordonnées cartésiennes reçues depuis l'application mobile, les convertir en distances métriques puis en angles de rotation pour chaque moteur pas à pas. Cette chaîne de traitement nécessite la maîtrise de concepts mathématiques avancés (trigonométrie), et leur implémentation optimisée sur architecture ARM Cortex-M. La gestion simultanée de la

communication UART Bluetooth, des calculs de conversion et du contrôle des moteurs constitue un excellent exercice de programmation temps réel et de gestion des ressources système.

I.3.3 Communication sans fil :

L'intégration du module Bluetooth HC-05 permet d'établir une liaison sans fil robuste entre l'interface utilisateur mobile et le système de contrôle embarqué. Cette communication bidirectionnelle permet non seulement l'envoi de coordonnées de pointage, mais aussi la réception de données de statut du système (position actuelle, état des moteurs, diagnostics). La technologie Bluetooth, standard dans les applications IoT modernes, offre un excellent compromis entre portée de communication (jusqu'à 10 mètres), consommation énergétique et simplicité d'implémentation. Cette approche permet d'explorer les problématiques de protocoles de communication, de gestion des erreurs de transmission et de synchronisation des données.

I.3.4 Développement mobile :

La création d'une application Android personnalisée avec Android Studio en langage Java représente un aspect innovant du projet. L'interface développée permet à l'utilisateur de sélectionner des points de destination par simple clique sur l'écran tactile, avec calcul automatique et affichage des coordonnées XY correspondantes. Cette approche ergonomique transforme une interface de contrôle complexe en un système intuitif accessible à tout utilisateur. L'application intègre également des fonctionnalités avancées telles que la visualisation en temps réel de la position du laser, la gestion de la connexion Bluetooth et la configuration des paramètres de précision du système.

I.3.5 Algorithmes de transformation géométrique :

Le cœur technique du projet réside dans la conversion des coordonnées écran en coordonnées métriques puis en angles de rotation moteur. Cette chaîne algorithmique nécessite :

- La calibration de l'espace de projection (mapping écran/réalité)
- La gestion des limites physiques du système (butées mécaniques, vitesses maximales).

I.3.6 Applications pratiques et perspectives d'évolution :

Ce système de projection trouve des applications concrètes dans de nombreux domaines : présentations interactives, systèmes de guidage et ciblage, la rééducation. La nature modulaire du projet permet également des évolutions futures telles que l'intégration de capteurs de distance, ou le développement d'interfaces gestuelles avancées et intégration de l'IA avec une caméra.

I.3.7 Pertinence académique et professionnelle :

Ce projet multidisciplinaire combine harmonieusement l'électronique embarquée, l'informatique mobile, les mathématiques appliquées et la mécanique de précision. Il permet de mettre en application les connaissances théoriques dans un contexte pratique tout en développant des compétences recherchées dans l'industrie 4.0, notamment dans les secteurs de la robotique de précision, de l'optronique et des systèmes interactifs. La complexité du projet favorise le développement de compétences transversales essentielles : analyse de problèmes complexes, conception de solutions intégrées et documentation technique rigoureuse.

I.4 Objectifs et enjeux du système**I.4.1 Objectifs du projet**

L'objectif principal de ce projet est de concevoir et réaliser un système innovant permettant de contrôler un laser en temps réel à l'aide d'un smartphone, créant ainsi une interface de commande intuitive et précise pour des applications de projection. Cette approche vise à démocratiser l'utilisation des systèmes de pointage en remplaçant les interfaces de contrôle traditionnelles, souvent complexes et coûteuses, par une solution mobile accessible et ergonomique.

I.4.1.1 Développer une application Android interactive :

Le premier objectif consiste à développer une application Android native offrant une interface utilisateur intuitive et réactive. Cette application doit permettre à l'utilisateur de sélectionner des points de destination par simple interaction tactile sur l'écran de son smartphone, transformant automatiquement ces coordonnées cartésiennes précises en centimètres. L'application doit calculer en temps réel les coordonnées X et Y correspondant aux points sélectionnés et les transmettre instantanément via la liaison Bluetooth vers le système de contrôle embarqué. L'interface doit également fournir un retour visuel immédiat à l'utilisateur, affichant les coordonnées sélectionnées.

I.4.1.2 Assurer une communication sans fil stable :

Le deuxième objectif vise à établir une liaison Bluetooth fonctionnelle entre l'application mobile et le système embarqué. Cette connexion permet la transmission des coordonnées calculées vers le système de contrôle du laser. L'application doit offrir à l'utilisateur la possibilité de se connecter manuellement à l'appareil via un bouton dédié, et fournir un retour visuel clair, tel qu'un message indiquant le succès ou l'échec de la connexion. Bien que la reconnexion automatique ne soit pas implémentée, la stabilité de la communication

lors d'une session active doit être assurée afin d'éviter toute perte de données ou interruption durant le pilotage du système.

I.4.1.3 Piloter un système de moteurs pas à pas :

Le troisième objectif concerne la mise en œuvre d'un système de contrôle moteur biaxial permettant le déplacement précis selon les axes X et Y. Ce système doit piloter deux moteurs pas à pas de manière synchronisée pour assurer un positionnement exact dans l'espace de projection. L'utilisation du driver moteur TB6600 doit permettre d'obtenir un mouvement fluide et précis, avec une résolution angulaire adaptée aux exigences de précision du système. Le contrôle des moteurs doit intégrer des fonctionnalités avancées telles que la gestion de l'accélération et de la décélération pour éviter les vibrations et les dépassements de position, ainsi que la possibilité d'ajuster dynamiquement la vitesse de déplacement en fonction de la distance à parcourir.

I.4.1.4 Traduire les coordonnées en déplacements moteurs :

Le quatrième objectif consiste à développer un algorithme de transformation permettant de convertir les coordonnées cartésiennes reçues depuis l'application mobile (exprimées en centimètres) en commandes exploitables par les moteurs pas à pas. Dans un premier temps, ces coordonnées sont converties en mètres afin de correspondre à l'échelle réelle du plan de projection. Ensuite, ces positions métriques sont traduites en angles de rotation nécessaires au positionnement du faisceau laser, en tenant compte de la configuration mécanique du système. Les angles obtenus sont enfin convertis en impulsions adaptées aux drivers TB6600, permettant le déplacement précis des moteurs selon les axes X et Y. Ce processus inclut la gestion de l'accélération et de la décélération pour garantir un mouvement fluide. Une étape de calibration initiale permet d'assurer la correspondance exacte entre l'espace virtuel de l'application et l'espace physique de projection.

I.4.1.5 Évaluer les performances du système :

Le cinquième objectif consiste à évaluer de manière rigoureuse les performances globales du système développé en mesurant la précision de positionnement, la réactivité du système et la stabilité de fonctionnement sur des périodes prolongées. Cette évaluation doit permettre d'identifier les erreurs de positionnement systématiques ou aléatoires, ainsi que les facteurs limitant les performances du système. Sur la base de ces mesures, des ajustements et optimisations doivent être apportés tant au niveau logiciel qu'au niveau de la configuration hardware pour améliorer la fiabilité, la précision et la réactivité du système. Cette phase

d'optimisation inclut également la validation du système dans différentes conditions d'utilisation et environnements pour garantir sa robustesse et sa polyvalence d'usage.

I.4.2 Enjeux du système

Le développement du système de projection laser contrôlé par smartphone présente plusieurs enjeux techniques, fonctionnels et applicatifs. Ces défis doivent être pris en compte afin de garantir un fonctionnement fiable, précis et ergonomique du dispositif.

I.4.2.1 Enjeux techniques

- Précision du contrôle : La correspondance entre les coordonnées envoyées depuis le smartphone et la position réelle du laser doit être exacte pour éviter tout décalage ou erreur. Une gestion optimale des moteurs pas à pas est nécessaire pour assurer une bonne résolution et une fluidité dans les déplacements du laser.
- Fiabilité de la communication Bluetooth : Le module HC-05 doit garantir une transmission stable des données sans perte d'information ni interférences pouvant perturber le fonctionnement du système.
- Réactivité et latence minimale : L'envoi des coordonnées depuis le smartphone et leur exécution par la STM32 doivent être quasi instantanés pour assurer une expérience fluide à l'utilisateur. Cela implique une optimisation du traitement des signaux et de la gestion des moteurs.
- Consommation énergétique : Les moteurs pas à pas sont énergivores, nécessitant une alimentation adaptée et une gestion efficace pour prolonger l'autonomie du système et éviter toute surchauffe.
- Gestion des limites physiques du système : La plage de mouvement du laser est définie par les moteurs et leur support mécanique. Il faut donc intégrer des mécanismes de calibration et des limitations logicielles pour éviter tout dépassement des bornes mécaniques.

I.4.2.2 Enjeux fonctionnels

- Ergonomie et facilité d'utilisation : L'interface de l'application mobile doit être intuitive, permettant à l'utilisateur de guider le laser facilement en cliquant sur l'écran avec un affichage des coordonnées en haut de l'écran.
- Robustesse et fiabilité : Le système doit fonctionner de manière stable sur une longue période sans dysfonctionnements ni dérèglements des moteurs.

I.5 Applications potentielles

Le système de projection laser contrôlé par smartphone offre un large éventail d'applications dans plusieurs domaines. Grâce à sa précision, sa flexibilité et son contrôle à distance, il peut être exploité dans divers secteurs technologiques et industriels.

I.5.1 Applications médicales

- Guidage en chirurgie assistée par laser : L'utilisation d'un laser contrôlé avec précision peut aider à effectuer des incisions fines ou à guider certains instruments médicaux dans des interventions délicates.
- Rééducation motrice interactive : Un système de projection laser contrôlé par smartphone peut être utilisé comme outil visuel pour accompagner les exercices de rééducation. En projetant des cibles mouvantes ou fixes sur un mur ou un sol, le patient peut être amené à effectuer des gestes spécifiques, favorisant la coordination et le renforcement musculaire.

I.5.2 Applications militaires et de sécurité

- Systèmes de ciblage et de désignation d'objectifs : Un laser contrôlé à distance peut être utilisé pour pointer des cibles avec précision, par exemple pour des opérations de surveillance ou d'orientation de tirs téléguidés.
- Guidage de drones ou de robots : Dans certaines missions, un laser pourrait être utilisé pour indiquer des points d'intérêt à un drone ou un robot autonome.

I.5.3 Applications industrielles et technologiques

- Automatisation et contrôle de machines : Dans certaines lignes de production, un laser est utilisé pour des tâches de découpe, de gravure ou de positionnement précis. Ce système pourrait être adapté à ces besoins.
- Calibration et mesure de précision : L'industrie nécessite souvent des outils de mesure et d'alignement précis. Un laser mobile contrôlé pourrait être utilisé pour effectuer ces opérations à distance.

I.6 Les systèmes embarqués et leur rôle dans le contrôle de dispositifs électroniques

Les systèmes embarqués sont intégrés dans de nombreux objets du quotidien, allant des appareils électroménagers comme les fours et micro-ondes jusqu'aux technologies avancées de

l'aérospatial (fusées, satellites) et des équipements médicaux. Ils sont omniprésents, jouant un rôle essentiel aussi bien dans notre vie quotidienne que dans des domaines plus complexes.

Mais au fond, qu'est-ce qu'un système embarqué et comment fonctionne-t-il ?

I.6.1 Définition :

Un système embarqué est une combinaison de composants électroniques et informatiques, conçue pour fonctionner de manière autonome et accomplir une tâche spécifique en temps réel au sein d'un appareil. Il se distingue par sa taille réduite et sa faible consommation énergétique, tout en devant assurer un équilibre optimal entre performance, encombrement, mémoire, fiabilité, poids et coût [1].

I.6.2 Cas d'application

Les systèmes embarqués sont conçus pour exécuter diverses tâches au sein des appareils dans lesquels ils sont intégrés. Leur fonction dépend du domaine d'application, qu'il s'agisse du matériel médical, de l'électroménager, de l'informatique ou des transports. Présents dans notre quotidien sans que nous en ayons conscience, ils équipent de nombreux dispositifs comme les lave-vaisselles, téléviseurs, consoles de jeux, imprimantes, régulateurs de vitesse ou portails automatiques.

Par exemple, un portail automatique utilise un système embarqué doté de capteurs pour détecter la présence d'un véhicule et activer l'ouverture du portail. Selon l'appareil et son usage, ces systèmes peuvent être plus ou moins sophistiqués, allant de simples commandes par bouton jusqu'à des interfaces tactiles et connectées, ouvrant ainsi la voie à d'innombrables innovations.

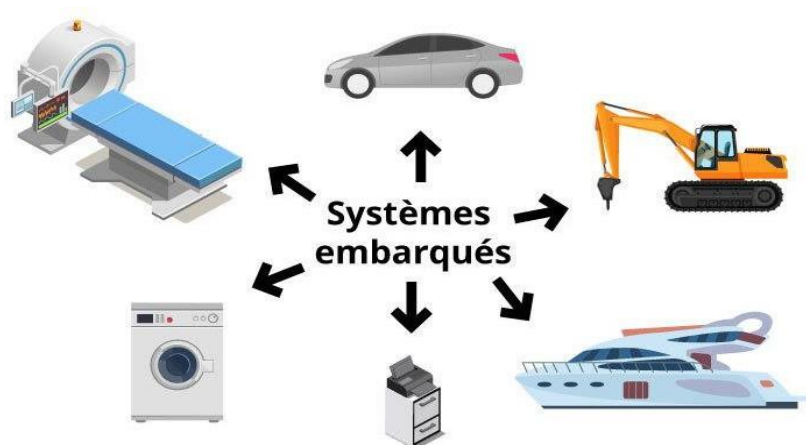


Figure I 4 : Domaines d'intégration des systèmes embarqués

I.6.3 Architecture technique

Un système embarqué traite des données d'entrée, afin de produire des actions en sortie ; une fois que les données sont recueillies et traitées, le logiciel prend en effet une décision que le système réalise matériellement.

Dans le cadre du système de contrôle de laser par smartphone, le choix s'est naturellement porté sur la technologie Bluetooth classique, en raison de ses nombreux avantages adaptés aux exigences du projet. Tout d'abord, cette technologie offre une mise en œuvre matérielle et logicielle simple avec la carte STM32, notamment grâce à l'utilisation du protocole UART, largement supporté par les bibliothèques de développement embarquées. De plus, le Bluetooth assure une portée suffisante pour un usage en laboratoire ou en environnement intérieur, tout en garantissant une transmission rapide et fiable de données légères, telles que les coordonnées X et Y nécessaires au positionnement du laser. Enfin, le Bluetooth classique présente une compatibilité directe avec les applications mobiles développées sous Android Studio, permettant une intégration aisée de l'interface tactile et une communication fluide entre le smartphone et la carte STM32 [2].

Grâce à ces caractéristiques, cette technologie s'est révélée particulièrement adaptée aux besoins de ce projet embarqué.

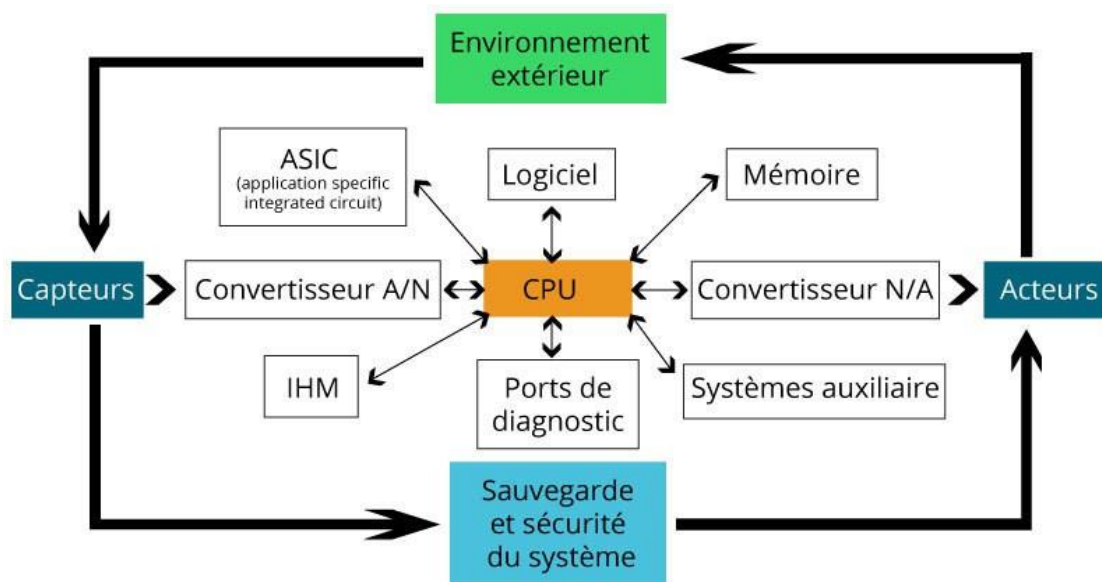


Figure I 5 : L'architecture technique d'un système embarqué

I.6.4 Le rôle des systèmes embarqués

Un système embarqué est un dispositif électronique et informatique autonome conçu pour exécuter une tâche spécifique. Il est intégré à divers équipements tels que les dispositifs industriels, les calculateurs miniatures, les interfaces utilisateur, les modules de communication (radio, Ethernet) et même certains ordinateurs portables. Ce concept englobe à la fois le matériel (Hardware) et le logiciel (Software).

Aujourd'hui, les ordinateurs ne sont plus de simples machines autonomes et isolées. La transformation numérique a profondément modifié notre mode de vie. Grâce à Internet, l'accès à l'information est facilité, permettant aux utilisateurs de naviguer sur des plateformes multilingues, de stocker leurs fichiers en ligne via le cloud, d'éditer des contenus multimédias et de rédiger des documents à distance. En parallèle, les microcontrôleurs utilisés dans les systèmes embarqués sont conçus pour une faible consommation énergétique, garantissant une utilisation efficace et optimisée des ressources [3].

I.6.5 Les différents types de systèmes embarqués

Les systèmes embarqués sont omniprésents dans de nombreux appareils intégrant une puce ou une carte mémoire. Ils jouent un rôle essentiel dans l'informatique industrielle en assurant le bon fonctionnement des machines. Conçus par des ingénieurs spécialisés, ces systèmes sont intégrés à divers équipements bureautiques et mobiles, tels que les répondeurs, smartphones, imprimantes et photocopieuses. Ils sont également utilisés dans les infrastructures des bâtiments, notamment pour le contrôle des ascenseurs, des escalators, des systèmes d'accès, de surveillance et d'éclairage.

Grâce à la miniaturisation des composants, la taille des microprocesseurs a été optimisée, bien que leur capacité mémoire reste généralement limitée à quelques gigaoctet.

Par ailleurs, les systèmes embarqués jouent un rôle crucial dans le développement de secteurs stratégiques tels que l'aéronautique, l'automobile, le spatial et les télécommunications. Leur utilisation ne cesse de croître, notamment dans l'industrie automobile, où ils représentent déjà environ 40 % des coûts globaux, un chiffre qui devrait continuer d'augmenter dans les années à venir.

I.7 Travaux similaires

Les technologies utilisées dans ce projet s'inspirent de plusieurs travaux existants, mais elles sont adaptées pour répondre à des besoins spécifiques. L'association d'une interface

tactile, d'un contrôle par Bluetooth et d'un système de déplacement précis du laser apporte une solution innovante qui peut être appliquée dans divers domaines.

Cette section explore quelques travaux qui partagent des concepts similaires à ce projet.

I.7.1 Applications mobiles pour le contrôle à distance

L'utilisation d'une application mobile pour piloter un système embarqué via Bluetooth ou Wi-Fi est de plus en plus répandue :

I.7.1.1 Applications Domotiques (Smart Home, maison connectée) :

À titre d'exemple, citons Google Home, Apple HomeKit, Amazon Alexa.

Ces applications permettent de contrôler à distance et de manière centralisée divers appareils domestiques tels que les lumières, les thermostats, les caméras de sécurité, les serrures..., en utilisant le réseau Wi-Fi ou d'autres protocoles (Zigbee, Z-Wave...).

Les fonctionnalités : contrôle d'appareils, création de scénarios automatiques, notifications, commandes vocales.

I.7.1.2 Applications de l'Automatisation Industrielle

À titre d'exemple, citons Siemens TIA Portal, Rockwell Automation Studio 5000.

Ces applications sont utilisées pour surveiller et contrôler les équipements industriels (machines, capteurs, actionneurs...). Elles fournissent des outils de supervision, de diagnostic, de gestion à distance...

Les fonctionnalités : suivi de la performance, réglage de paramètres, envoi des alertes, pilotage de l'énergie.

I.7.1.3 Applications de contrôle de robots

À titre d'exemple, citons Robot Operating System (ROS) sur Android, Arduino Controller.

Ces applications permettent de piloter des robots (robots mobiles, bras robotisés, drones) à distance. Elles utilisent des interfaces de communication variées (Bluetooth, Wi-Fi, 4G...).

Les fonctionnalités : commande manuelle, suivi de positions, vision en temps réel, commandes automatisées.

I.7.1.4 Applications de Contrôle d'Objets IoT

Exemple : Blynk, ThingSpeak

Ces applications permettent de contrôler et de surveiller des objets IoT (Internet of Things). Elles permettent notamment de recevoir des données des capteurs et d'envoyer des commandes aux actionneurs.

Fonctionnalités : Vigilance des capteurs, envoi de commandes, alertes.

I.7.1.5 Application pour le contrôle de véhicules (drones, voitures, etc.)

Exemple : DJI GO (pour les drones DJI), application Tesla

Ces applications permettent de contrôler des véhicules comme des drones ou des voitures électriques à distance via leur interface qui permet le pilotage en temps réel, la visualisation des données de télémétrie et la gestion des paramètres.

Fonctionnalités : Pilotage en temps réel, visualisation vidéo, navigation GPS, mise à jour logicielle.

I.7.1.6 Applications de Surveillance et Sécurité

Exemple : Nest, Ring

Ces applications servent à contrôler à distance des systèmes de sécurité de maison (caméras, détecteurs de mouvements, sonnettes vidéo). Elles proposent souvent de surveiller en temps réel le flux vidéo de la caméra, recevoir alertes lorsqu'un mouvement est détecté, voire interagir avec un visiteur via une sonnette vidéo.

Fonctionnalités : Vidéo surveillance, alertes en temps réel, historique des événements.

I.7.1.7 Applications pour la gestion énergétique

Exemples : SolarEdge, Tesla Powerwall

Ces applications permettent de contrôler et de surveiller des systèmes de production et de stockage de l'énergie (panneaux solaires, batteries). Elles fournissent des données sur la consommation, la production, et le bon fonctionnement du système.

Fonctionnalités : Suivi de consommation et production d'énergie, gestion de batterie, rapports de performance.

I.8 Communication entre un smartphone et un microcontrôleur



Figure I 6 : Communication entre les dispositifs

La communication entre un smartphone et un microcontrôleur constitue aujourd'hui une composante essentielle dans le développement des systèmes embarqués interactifs. Ce type d'interfaçage permet à un système physique contrôlé par un microcontrôleur de recevoir des instructions à distance, tout en offrant à l'utilisateur une interface conviviale, accessible via son smartphone.

Avec l'émergence de l'Internet des Objets (IoT), les applications de ce type de communication se sont multipliées dans les domaines de la domotique, des objets connectés, de la robotique ou encore des systèmes de commande industrielle.

I.8.1 Intérêt de la communication smartphone-microcontrôleur

L'intégration d'un smartphone comme interface de commande dans un système embarqué offre plusieurs avantages :

- **Interface utilisateur riche et intuitive** : grâce à l'écran tactile, l'utilisateur peut interagir de manière simple et ergonomique avec le système.
- **Mobilité et connectivité** : le smartphone permet un accès distant au système sans fil, éliminant le besoin d'un poste de contrôle fixe.
- **Réduction du coût matériel** : l'écran, les boutons et les fonctionnalités avancées (GPS, gyroscope, etc.) sont intégrés au smartphone, ce qui allège le système embarqué en composants.

I.8.2 Modèles de communication

La communication entre un smartphone et un microcontrôleur peut être mise en œuvre selon différents modèles, en fonction de la nature de l'application et des contraintes techniques :

- Communication unidirectionnelle : le smartphone envoie uniquement des commandes au microcontrôleur.
- Communication bidirectionnelle : le smartphone envoie des commandes, et reçoit des données en retour (états du système, mesures, confirmations...).
- Mode maître-esclave : le smartphone agit comme maître initiateur de la communication, tandis que le microcontrôleur est esclave et répond aux requêtes.

Ces échanges de données s'effectuent généralement au moyen de protocoles simples, comme l'UART, encapsulés dans une technologie de communication sans fil.

I.8.3 Technologies de communication sans fil

Différentes technologies permettent de mettre en place cette communication. Le choix dépend de plusieurs critères : portée, débit, consommation énergétique, simplicité d'implémentation, etc.

I.8.3.1 Bluetooth

Le Bluetooth est une technologie de communication sans fil à courte portée, très répandue pour les interactions entre smartphones et systèmes embarqués. Il fonctionne sur la bande ISM 2,4 GHz, et permet des débits suffisants pour la transmission de commandes ou de données simples.

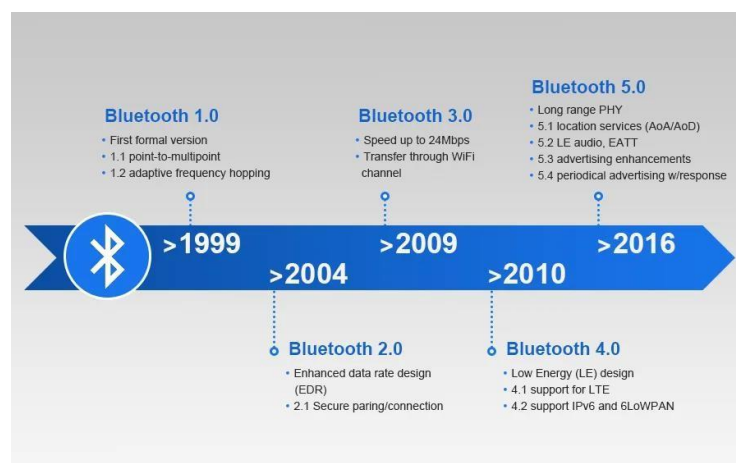


Figure I 7 : Evolution du Bluetooth

- Bluetooth classique (SPP) : simule un port série UART, idéal pour les échanges directs entre microcontrôleur et smartphone.
- Bluetooth Low Energy (BLE) : adapté aux applications nécessitant une très faible consommation d'énergie (ex : capteurs autonomes).

Le Bluetooth est facile à mettre en œuvre grâce à des modules populaires comme le HC-05, souvent utilisé avec des microcontrôleurs comme l'STM32.

I.8.3.2 Wi-Fi

Le Wi-Fi offre une portée plus grande et des débits plus élevés, adaptés aux systèmes nécessitant des échanges plus volumineux ou une connexion à Internet. Il permet notamment :

- La création d'un point d'accès (AP) par le microcontrôleur pour connexion directe du smartphone.
- L'utilisation d'un mode station (STA) où les deux dispositifs se connectent à un réseau Wi-Fi commun.

Les microcontrôleurs tels que l'ESP8266 ou l'ESP32 intègrent nativement la connectivité Wi-Fi.

I.8.3.3 LoRa / LoRaWAN

La technologie LoRa (Long Range) permet des communications sans fil à très longue portée avec une très faible consommation énergétique, mais à un débit réduit. Elle est adaptée à des systèmes embarqués distants transmettant de petites quantités de données, notamment dans des applications environnementales ou industrielles [4].

I.8.4 Critères de choix pour le projet

Dans le cadre du système de contrôle de laser par smartphone, le choix s'est naturellement porté sur la technologie Bluetooth classique, en raison de ses nombreux avantages adaptés aux exigences du projet. Tout d'abord, cette technologie offre une mise en œuvre matérielle et logicielle simple avec la carte STM32, notamment grâce à l'utilisation du protocole UART, largement supporté par les bibliothèques de développement embarquées. De plus, le Bluetooth assure une portée suffisante pour un usage en laboratoire ou en environnement intérieur, tout en garantissant une transmission rapide et fiable de données légères, telles que les coordonnées X et Y nécessaires au positionnement du laser. Enfin, le Bluetooth classique présente une compatibilité directe avec les applications mobiles développées sous Android Studio, permettant une intégration aisée de l'interface tactile et une communication fluide entre le smartphone et la carte STM32. Grâce à ces caractéristiques, cette technologie s'est révélée particulièrement adaptée aux besoins de ce projet embarqué.

I.9 Étude des moteurs pas à pas et de leur contrôle

I.9.1 Définition d'un moteur pas à pas

Un moteur pas à pas est un dispositif électromécanique qui transforme des impulsions électriques en mouvements mécaniques discrets. Contrairement aux moteurs classiques qui tournent de façon continue lorsqu'ils sont alimentés, le moteur pas à pas effectue un déplacement par "pas" successifs, ce qui permet un contrôle précis de la position, de la vitesse et de l'accélération.

Chaque impulsion envoyée au moteur entraîne une rotation d'un angle fixe, appelé "angle de pas" (souvent $1,8^\circ$, soit 200 pas par tour). Ce comportement fait du moteur pas à pas un dispositif d'entrée-sortie numérique, bien adapté aux systèmes embarqués pilotés par des signaux en logique tout ou rien. L'augmentation de la fréquence des impulsions peut générer une rotation continue, proportionnelle à la cadence d'horloge.

Les moteurs pas à pas sont utilisés dans de nombreuses applications industrielles et scientifiques telles que : l'automatisation, la robotique, les imprimantes 3D, les CNC, les dispositifs médicaux, ou encore le positionnement laser, comme dans notre projet.[5].

I.9.2 Principe de fonctionnement

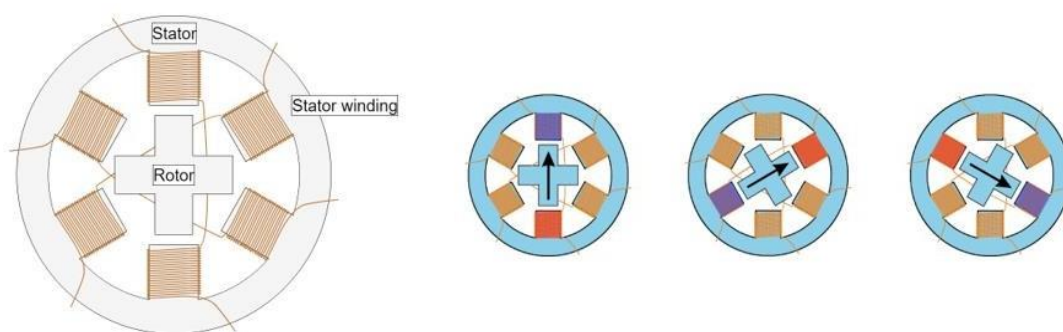


Figure 18 : Structure interne des moteurs pas à pas

Un moteur pas à pas est constitué d'un rotor (souvent aimanté) et d'un stator formé de bobines. En alimentant ces bobines dans un ordre spécifique, un champ magnétique est généré, attirant le rotor vers une position d'équilibre.

Lorsqu'une ou plusieurs phases sont activées, le rotor s'aligne avec le champ magnétique résultant. La commutation séquentielle des phases provoque un déplacement incrémental du rotor. À chaque impulsion, le rotor avance d'un pas, ce qui permet un positionnement sans recours à un capteur de retour (dans des conditions normales de

fonctionnement). Par exemple, pour un moteur de 200 pas par tour, chaque impulsion produit une rotation de $1,8^\circ$. Cette précision est essentielle dans les systèmes embarqués nécessitant un contrôle fin, comme notre système de projection laser.

I.9.3 Types de moteurs pas à pas

I.9.3.1 Moteurs à aimants permanents (Permanent Magnet)

Ces moteurs utilisent un rotor en aimant permanent. Le champ magnétique du rotor interagit avec le champ électromagnétique du stator. Ils offrent un bon couple, adaptés aux applications où une précision modérée est suffisante.

I.9.3.2 Moteurs à réluctance variable

Le rotor, composé de dents en fer doux, n'est pas aimanté. Il s'aligne naturellement avec les pôles du stator pour minimiser la réluctance (résistance au flux magnétique). Ces moteurs permettent des vitesses et résolutions élevées, mais avec un couple plus faible et sans couple de maintien.

I.9.3.3 Moteurs hybrides

Les moteurs hybrides combinent les avantages des moteurs à aimants permanents et à réluctance variable. Leur rotor est magnétisé axialement avec des dents alternées. Ils offrent un couple élevé, une grande précision et une vitesse de réponse intéressante. C'est le type le plus utilisé dans les systèmes de précision, notamment les imprimantes 3D, CNC et systèmes de positionnement comme le nôtre.[6]

I.9.3.3.1 Moteurs unipolaires

Les moteurs unipolaires disposent d'un enroulement à point central par phase. Le courant y circule dans un seul sens, ce qui simplifie le circuit de commande. En revanche, le couple obtenu est généralement plus faible. Ces moteurs comportent en général 5 ou 6 fils.

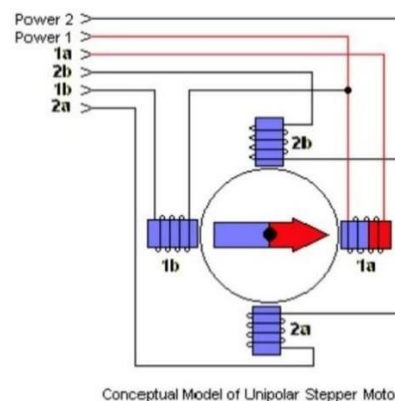


Figure I 9 : Structure d'un moteur pas à pas unipolaire

I.9.3.2 Moteurs bipolaires

Les moteurs bipolaires possèdent deux enroulements indépendants sans point central (4 fils). Le courant y circule dans les deux sens, ce qui demande un pilote plus complexe, souvent basé sur un pont en H. En contrepartie, ils offrent un couple plus élevé et une meilleure efficacité. C'est le type que nous avons retenu dans notre projet.

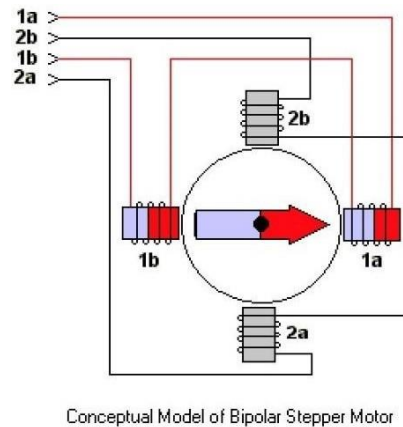


Figure I 10 : Structure d'un moteur pas à pas Bipolaire

I.9.4 Modes de pilotage

Le mode de pilotage influence la résolution, le couple, la consommation et la douceur de fonctionnement. On distingue plusieurs techniques :

I.9.4.1 Mode ondulatoire (Wave Drive)

Une seule phase est activée à la fois. Ce mode est simple mais génère un couple relativement faible. Le rotor effectue des pas de 90° , aligné successivement avec les champs magnétiques générés par chaque phase.

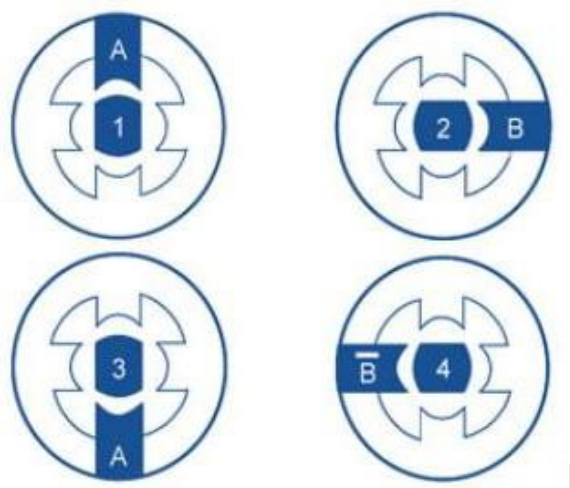


Figure I 11 : Wave Drive du moteur pas à pas

I.9.4.2 Mode pas complet (Full Step)

Deux phases sont activées simultanément, générant un couple plus élevé. Ce mode est plus performant que le mode ondulatoire en termes de stabilité.

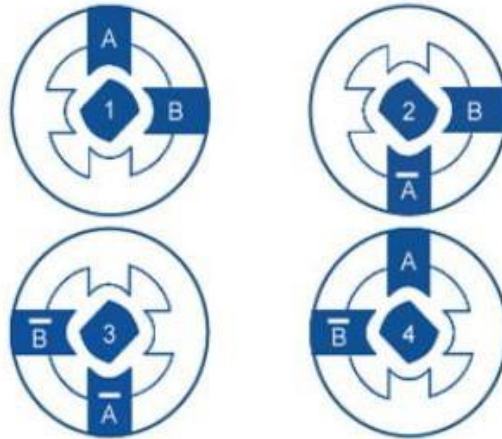


Figure I 12 : Full step du moteur pas à pas

I.9.4.3 Mode demi-pas (Half Step)

Ce mode alterne entre l'activation d'une phase et deux phases, réduisant l'angle de pas de moitié (ex. : $0,9^\circ$ pour un moteur de $1,8^\circ$). Il permet une meilleure résolution et une réduction des vibrations.

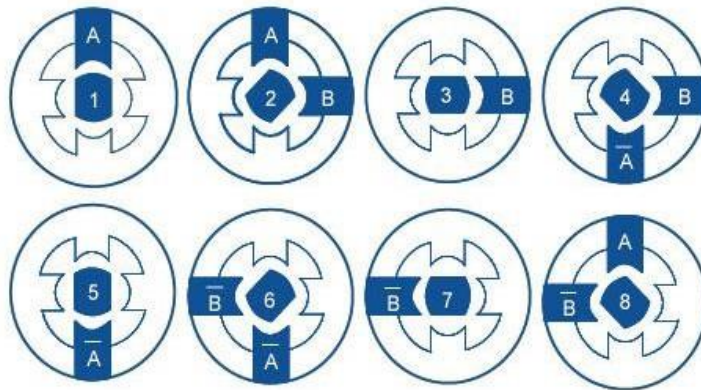


Figure I 13 : Mode demi-pas d'un moteur pas à pas

I.9.4.4 Mode micro-pas (Microstepping)

Ce mode consiste à contrôler les courants dans les phases par des signaux sinusoïdaux déphasés (généralement via PWM), permettant un déplacement encore plus fin du rotor. Ce mode offre la meilleure précision mais nécessite un pilote adapté. Le couple γ est souvent réduit, et le système peut devenir plus sensible aux charges variables.

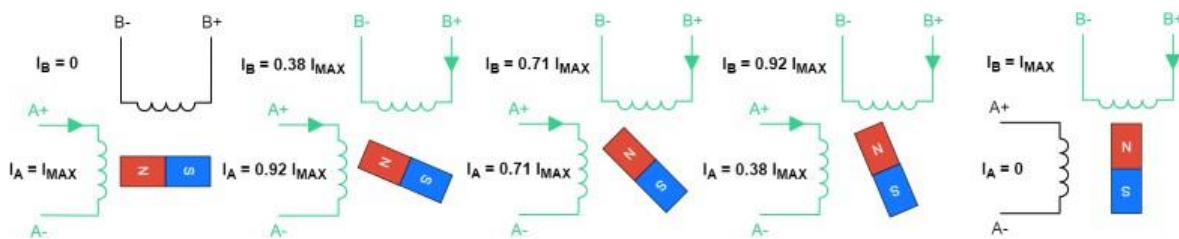


Figure I 14 : Microstepping du moteur pas à pas

I.9.5 Sélection d'un moteur pas à pas

Le choix d'un moteur dépend des exigences de l'application. Les principaux critères à considérer sont :

- Couplage mécanique : méthode de liaison moteur-charge (direct, courroie, engrenage, etc.)
- Vitesse et accélération nécessaires pour le déplacement
- Couple exigé pour surmonter les frottements ou l'inertie
- Précision du positionnement souhaitée

En général, les moteurs biphasés (2 phases) sont les plus répandus. Il existe aussi des moteurs triphasés ou cinq-phasés offrant de meilleures performances mais nécessitant des circuits plus complexes. Le moteur hybride bipolaire à deux phases est souvent privilégié pour sa précision et son bon compromis performance/coût.

I.10 Conclusion

L'étude réalisée dans ce chapitre a permis de poser les fondements nécessaires à la conception du système de contrôle de projection laser. Nous avons pu définir les objectifs et les enjeux du projet, en soulignant son utilité dans des contextes variés, qu'ils soient médicaux, militaires ou industriels. L'analyse des systèmes embarqués a mis en évidence leur rôle central dans le contrôle précis des dispositifs électroniques, notamment à travers l'utilisation de microcontrôleurs performants tels que la STM32.

La comparaison avec des travaux similaires a permis de mieux situer notre solution dans un paysage technologique en constante évolution. En parallèle, l'évaluation des différentes méthodes de communication sans fil a confirmé le choix du Bluetooth comme solution simple, économique et adaptée à une application mobile. Enfin, l'étude du fonctionnement des moteurs pas à pas et des techniques de commande associées a renforcé notre compréhension du pilotage précis requis pour guider le laser avec efficacité. Cette étape d'analyse nous a ainsi permis de structurer notre approche de développement. Elle constitue un socle solide pour aborder, dans le prochain chapitre, l'implémentation concrète du système tant au niveau matériel que logiciel.

Chapitre 2

Implémentation et développement

II.1 Introduction

Après avoir défini les fondements théoriques et technologiques dans le chapitre précédent, ce chapitre se concentre sur la phase pratique du projet, à savoir l'implémentation et le développement du système de contrôle de projection laser. Cette étape est cruciale pour passer de la conception à la réalisation effective, en traduisant les choix techniques en un système fonctionnel, cohérent et opérationnel.

Nous débuterons par la description des spécifications matérielles et logicielles, accompagnée d'une présentation de l'architecture globale du système. Le choix des composants tels que la carte STM32, les moteurs pas à pas, et le module Bluetooth y sera justifié. Nous aborderons ensuite la conception de l'interface utilisateur mobile, élément clé de l'interaction homme-machine.

La deuxième section sera dédiée au développement du système embarqué, comprenant la programmation de la STM32 pour le pilotage des moteurs ainsi que l'établissement de la communication sans fil via Bluetooth. La troisième section détaillera la création de l'application mobile Android, depuis le choix des outils de développement jusqu'à la gestion de l'interaction tactile et l'envoi des coordonnées vers la carte.

Enfin, l'intégration et les tests du système complet seront décrits, avec un accent particulier sur la validation des communications et la précision des mouvements du faisceau laser. Ce chapitre constitue ainsi le cœur technique du projet, où les différents éléments sont mis en œuvre de manière coordonnée pour répondre aux objectifs définis en amont.

II.2 Spécifications et conception

II.2.1 Description de l'architecture globale du système

Le système conçu repose sur une architecture simple et modulaire. Il se compose principalement d'un smartphone servant d'interface de commande, d'un module Bluetooth HC-05 assurant la communication sans fil, d'une carte STM32 pour le traitement et le contrôle, et de deux moteurs pas à pas pilotant le positionnement d'un laser.

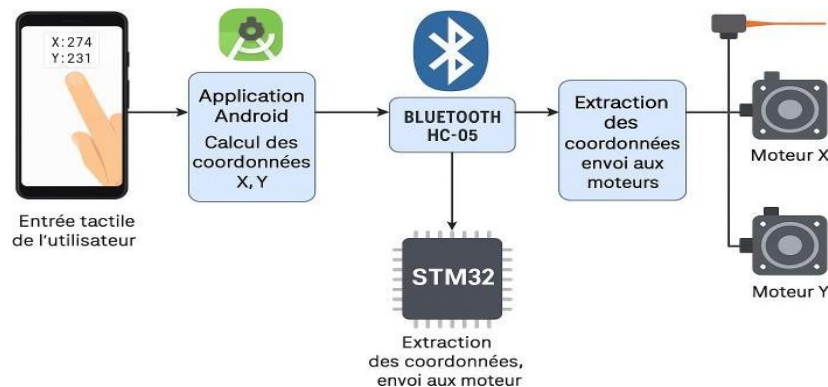


Figure II. 1 : schéma fonctionnel de l'architecture global du système

Le fonctionnement général du système repose sur une interaction coordonnée entre plusieurs couches logicielles et matérielles : l'application mobile, le module de communication Bluetooth, la carte STM32 et les actionneurs mécaniques. Lorsqu'un utilisateur effectue une clique sur l'écran de l'application Android, les coordonnées X et Y sont générées dynamiquement à partir des événements tactiles, puis formatées en chaîne de caractères (par exemple, « X120, Y200\n »). Ces données sont immédiatement transmises via la liaison Bluetooth établie entre le smartphone et le module HC-05. Ce dernier envoie les informations à la STM32 par l'interface UART sous forme de centimètres. Une fois les données reçues, le microcontrôleur les interprète en analysant la chaîne afin d'extraire les valeurs numériques des coordonnées. Il convertit ensuite ces valeurs en mètres puis en angles à effectuer pour chaque moteur pas à pas. La STM32 les envoie aux drivers TB6600, qui pilotent les moteurs en fournissant le courant adéquat. Le déplacement des moteurs entraîne celui du support sur lequel est fixé le pointeur laser, positionnant ainsi le faisceau lumineux aux coordonnées indiquées. Ce processus met en évidence une hiérarchie d'interaction entre les couches : la couche application agit comme une interface utilisateur et source de commande, la couche communication assure la transmission sans fil, la couche traitement (STM32) effectue l'analyse et la conversion, et enfin la couche

actionneur (drivers et moteurs) exécute physiquement les instructions. Cette architecture modulaire permet une réponse rapide et précise, tout en facilitant le débogage, les extensions futures ou le remplacement de composants individuels.

II.2.2 Choix des composants matériels

Dans le cadre de la conception de notre système de projection laser contrôlé par smartphone, le choix des composants matériels est une étape cruciale. Il repose sur plusieurs critères : performance, fiabilité, compatibilité, coût, consommation énergétique et facilité d'intégration.

II.2.2.1 Microcontrôleur : STM32 Nucleo-L476RG

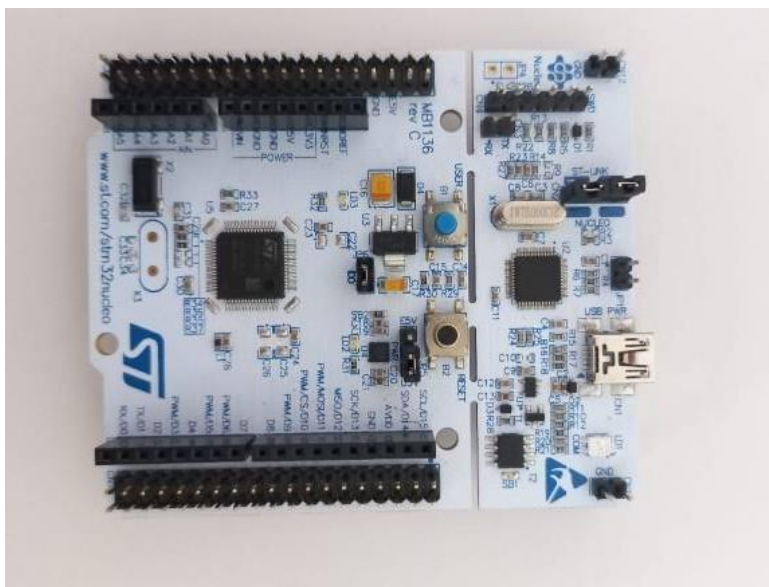


Figure II. 2 : Carte STM32 Nucleo-L476RG

Dans ce projet, la carte de développement STM32 Nucleo-L476RG a été choisie comme unité centrale de commande. Elle repose sur un microcontrôleur ARM Cortex-M4, reconnu pour sa puissance de calcul adaptée aux traitements embarqués en temps réel. Cette carte offre une grande richesse en interfaces de communication telles que l'UART (utilisée ici pour la réception des coordonnées via Bluetooth) et de nombreuses broches GPIO, utilisées pour le pilotage direct des moteurs pas à pas. Bien que cette carte soit compatible avec STM32CubeIDE, le développement du programme a été effectué à l'aide de l'environnement IAR Embedded Workbench, connu pour sa robustesse, son optimisation de la compilation, ainsi que ses fonctionnalités avancées de débogage temps réel. De plus, la carte STM32 Nucleo-L476RG est compatible avec les bibliothèques HAL (Hardware Abstraction Layer), ce qui a simplifié l'accès au matériel et permis une gestion claire des périphériques. Son faible coût, sa

faible consommation d'énergie et sa souplesse d'intégration en font une plateforme idéale pour les applications embarquées comme le contrôle précis d'un système de projection laser.[7].

II.2.2.2 Moteur pas à pas (TANDON KP4M2-203)

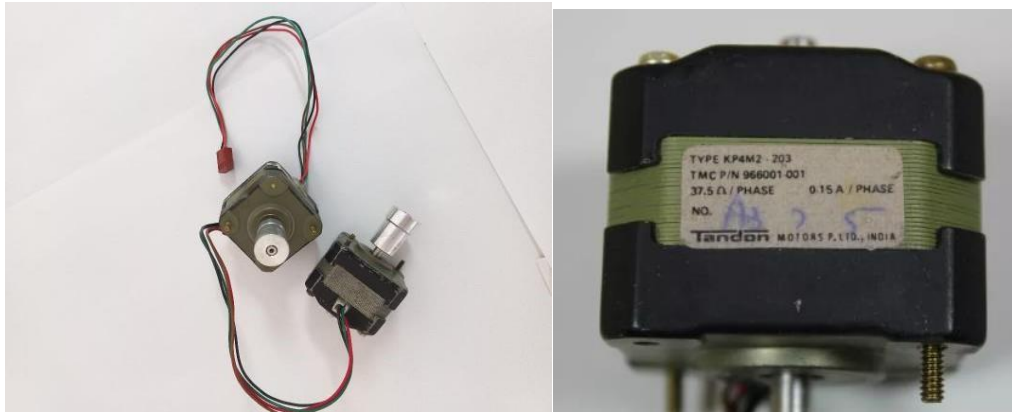


Figure II. 3 : Moteur pas à pas TANDON KP4M2-203

Pour assurer un positionnement précis du faisceau laser, le moteur pas à pas TANDON KP4M2-203 a été retenu. Ce moteur, de type bipolaire, offre un angle de pas de $1,8^\circ$, soit 200 pas par tour, ce qui permet d'obtenir une bonne résolution angulaire, essentielle dans les systèmes de visée et de suivi comme celui développé. Fonctionnant sous 12V avec un courant par phase de 0,15 A, il présente une consommation modérée en énergie, limitant ainsi la génération de chaleur tout en assurant une efficacité énergétique appréciable pour une application embarquée.

Son couple de maintien d'environ 0,09 Nm est suffisant pour garantir un déplacement stable et sans perte de pas du support laser. Par ailleurs, ses dimensions compactes ($39 \times 39 \times 34$ mm) permettent une intégration mécanique aisée dans la structure globale du système. Enfin, sa compatibilité avec des drivers standards comme le TB6600, utilisés dans ce projet, facilite l'interfaçage avec la STM32 et assure un pilotage fluide et précis.

Ce moteur bénéficie également d'une bonne disponibilité sur le marché et d'une documentation technique fiable, ce qui constitue un avantage considérable en phase de développement.[8].

II.2.2.3 Driver de moteur pas à pas : TB6600

Le moteur pas à pas utilisé dans ce projet ne peut pas être directement piloté par la carte STM32, car les broches GPIO ne sont pas capables de fournir l'intensité de courant nécessaire à son fonctionnement. Pour cette raison, l'intégration d'un driver de moteur pas à pas est

indispensable. Le choix s'est porté sur le modèle TB6600, un driver robuste et largement utilisé dans les applications de commande de moteurs pas à pas bipolaires.[9].

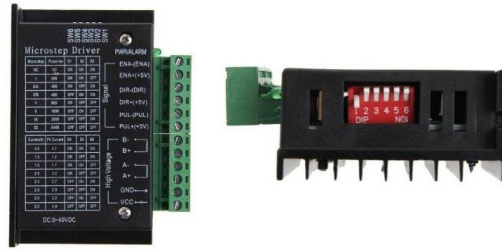


Figure II. 4 : Driver TB6600

Ce driver joue un rôle crucial à plusieurs niveaux :

- Protection de la STM32 : Il évite toute surcharge des broches de la carte, en assurant une isolation entre la partie logique (STM32) et la partie puissance (moteur).
- Contrôle simplifié : Le TB6600 n'a besoin que de deux signaux logiques – STEP (impulsions de pas) et DIR (direction du mouvement) – pour piloter le moteur, rendant le pilotage logiciel simple et efficace.
- Microstepping intégré : Ce driver permet d'augmenter la précision du mouvement grâce à différents modes de micro-pas : 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, ce qui permet un déplacement plus fluide et plus silencieux.
- Compatibilité en alimentation : Il accepte une tension d'alimentation de 12V à 24V et peut fournir jusqu'à 4A de courant, ce qui le rend compatible avec le moteur TANDON KP4M2-203 choisi.
- Facilité d'intégration : Ce driver est bien documenté, facile à configurer via des commutateurs DIP, et possède une bonne compatibilité avec les microcontrôleurs STM32, ce qui en fait un choix idéal pour ce système embarqué.

II.2.2.4 Module Bluetooth : HC-05

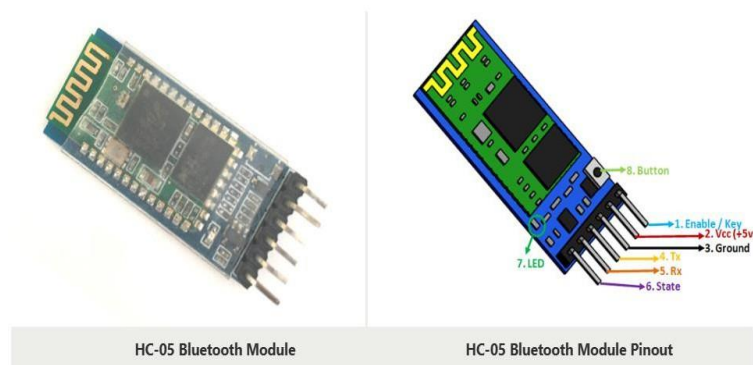


Figure II. 5 : le module HC-05

Le module HC-05 a été choisi pour assurer la communication sans fil entre le smartphone Android et la carte STM32. Ce choix repose sur sa simplicité d'intégration, sa fiabilité et sa compatibilité avec les architectures embarquées basées sur des microcontrôleurs.[10].

Le HC-05 est un module Bluetooth de type Série UART, idéal pour des projets nécessitant une communication bidirectionnelle sans fil. Il présente plusieurs avantages techniques et pratiques :

- Facilité d'intégration : Il communique avec la STM32 via une interface UART, ce qui le rend facilement utilisable avec les bibliothèques de communication série disponibles dans la majorité des environnements de développement embarqué (IAR, STM32Cube, etc.).
- Mode maître/esclave configurable : Le module peut être paramétré via des commandes AT pour fonctionner soit en mode esclave (réception de commandes depuis le smartphone), soit en maître (initiation de la connexion vers un autre périphérique).
- Documentation abondante : Il est largement utilisé dans les projets Arduino et STM32, ce qui garantit une large communauté, des tutoriels et une documentation riche, facilitant sa mise en œuvre.
- Économique : Son faible coût permet de l'intégrer dans des projets à budget réduit sans compromettre la performance.

II.2.3 Conception de l'interface utilisateur sur smartphone

L'interface utilisateur de l'application mobile a été conçue dans le but de permettre un contrôle intuitif et réactif du système de projection laser. Réalisée à l'aide d'Android Studio en Java, elle repose sur deux écrans principaux : l'écran d'accueil et l'écran de suivi tactile.

II.2.3.1 L'écran d'accueil :

Constitue le point de départ de l'application. Il propose trois boutons permettant respectivement de se connecter au module Bluetooth HC-05, de se déconnecter, et d'accéder à la zone de suivi. Le design est simple, avec une disposition verticale des boutons et un fond en dégradé de bleu, ce qui facilite la lisibilité et attire l'attention sur les actions essentielles. Des icônes ont

été ajoutées à chaque bouton afin de renforcer l'intuitivité et la compréhension des fonctionnalités, notamment pour les utilisateurs moins expérimentés.

II.2.3.2 L'écran de suivi tactile :

Quant à lui, est présenté en mode paysage. Ce choix ergonomique s'explique par la volonté d'offrir à l'utilisateur une plus grande surface horizontale pour contrôler les mouvements du laser, ce qui est particulièrement adapté aux déplacements sur deux axes. Le mode paysage facilite également l'accès visuel aux coordonnées affichées en temps réel en haut à gauche de l'écran, permettant de suivre précisément la position du doigt lors du click.

La zone tactile occupe l'intégralité de la surface de l'écran, offrant ainsi une liberté totale de mouvement à l'utilisateur. Une grille visuelle composée de deux lignes fines, l'une horizontale et l'autre verticale, divise l'interface en quatre quadrants égaux. Ces repères visuels facilitent l'orientation dans l'espace de contrôle, notamment pour recentrer le pointeur ou effectuer des mouvements symétriques par rapport à l'origine. Le point (0, 0) correspondant à l'origine du repère est situé au croisement de ces deux lignes, c'est-à-dire au centre exact de l'écran.

Un bouton intitulé "Recentrer", placé dans le coin supérieur droit, permet à l'utilisateur de ramener le pointeur à sa position initiale à tout moment. Cette fonctionnalité est particulièrement utile pour réinitialiser le système, corriger un décalage ou recalibrer la position du laser après une séquence de déplacement. Les coordonnées X et Y sont affichées sous la forme "X: 0 Y: 0" et mises à jour en temps réel selon le déplacement du doigt.

II.3 Développement du système embarqué

II.3.1 Programmation de la STM32 pour le contrôle du moteur pas à pas

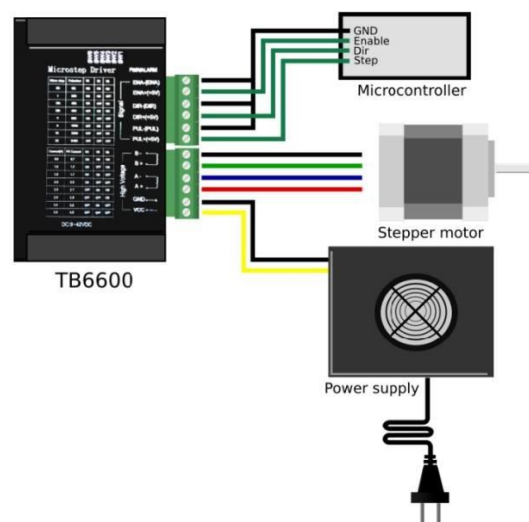


Figure II. 6 : Câblage du moteur avec driver et STM32

Le contrôle des moteurs pas à pas dans notre système repose sur une architecture logicielle robuste, conçue autour de la STM32, configurée via STM32CubeMX et programmée sous IAR Embedded Workbench for ARM. Dans un premier temps, les broches GPIO nécessaires ont été configurées : les signaux STEP et DIR ont été assignés à des sorties numériques (Push-Pull) pour chaque moteur, tandis que les broches UART (PA9 pour TX et PA10 pour RX) ont été configurées en mode asynchrone, avec une vitesse de communication de 9600 bauds, afin d'assurer l'échange de données avec le module Bluetooth HC-05.[11]

Le timer TIM2 a été utilisé pour générer les impulsions nécessaires au mouvement des moteurs. Il a été configuré avec une fréquence ajustable selon les besoins, par le biais des registres Prescaler et Auto-Reload (ARR). Cela permet d'adapter finement la vitesse de rotation des moteurs pour garantir un déplacement fluide du laser.

Le système embarqué repose sur FreeRTOS, dans lequel deux tâches principales ont été créées : la tâche UART (priorité haute), chargée de recevoir les coordonnées depuis le smartphone via Bluetooth, et la tâche moteur (priorité normale), chargée de piloter les moteurs en fonction des données reçues. Les données sont transmises entre ces tâches à l'aide de parallélisme de FreeRTOS, assurant ainsi une communication fiable et non bloquante.

La logique de conversion des coordonnées a été implémentée dans la tâche moteur. Les coordonnées X et Y, reçues en centimètres, sont d'abord converties en mètres, puis transformées en angles à l'aide de la fonction $\text{atan2f}()$. Ces angles, exprimés en degrés, sont ensuite convertis en nombre de micro-pas à effectuer, en fonction de la résolution des moteurs (par exemple, 200 pas par tour, avec microstepping). Le sens de rotation est contrôlé par l'état des broches DIR, et les impulsions de déplacement sont générées via les broches STEP, activées à l'aide du timer.

Afin d'optimiser les performances, la réception des données UART s'effectue de manière séquentielle dans la tâche dédiée. Un protocole simple de lecture et de parsing des données reçues (au format texte "X,Y\n") a été mis en place, assurant une extraction fiable des coordonnées transmises. Par ailleurs, les calculs de conversion (centimètres vers angles, puis en micro-pas) utilisent la virgule flottante, profitant de l'unité FPU (Floating Point Unit) intégrée au processeur Cortex-M4 de la STM32, ce qui permet d'assurer une précision satisfaisante sans compromettre les performances globales du système.

Cette approche modulaire, basée sur une configuration visuelle (STM32CubeMX) et une programmation en couches (via FreeRTOS), a permis un développement structuré et évolutif, assurant à la fois performance, maintenabilité et portabilité du code vers d'autres plateformes STM32.

Le fonctionnement de la tâche responsable du contrôle moteur a été modélisé sous forme de diagramme pour illustrer de manière claire les différentes étapes de traitement, depuis la réception des coordonnées jusqu'à la génération des signaux de commande.

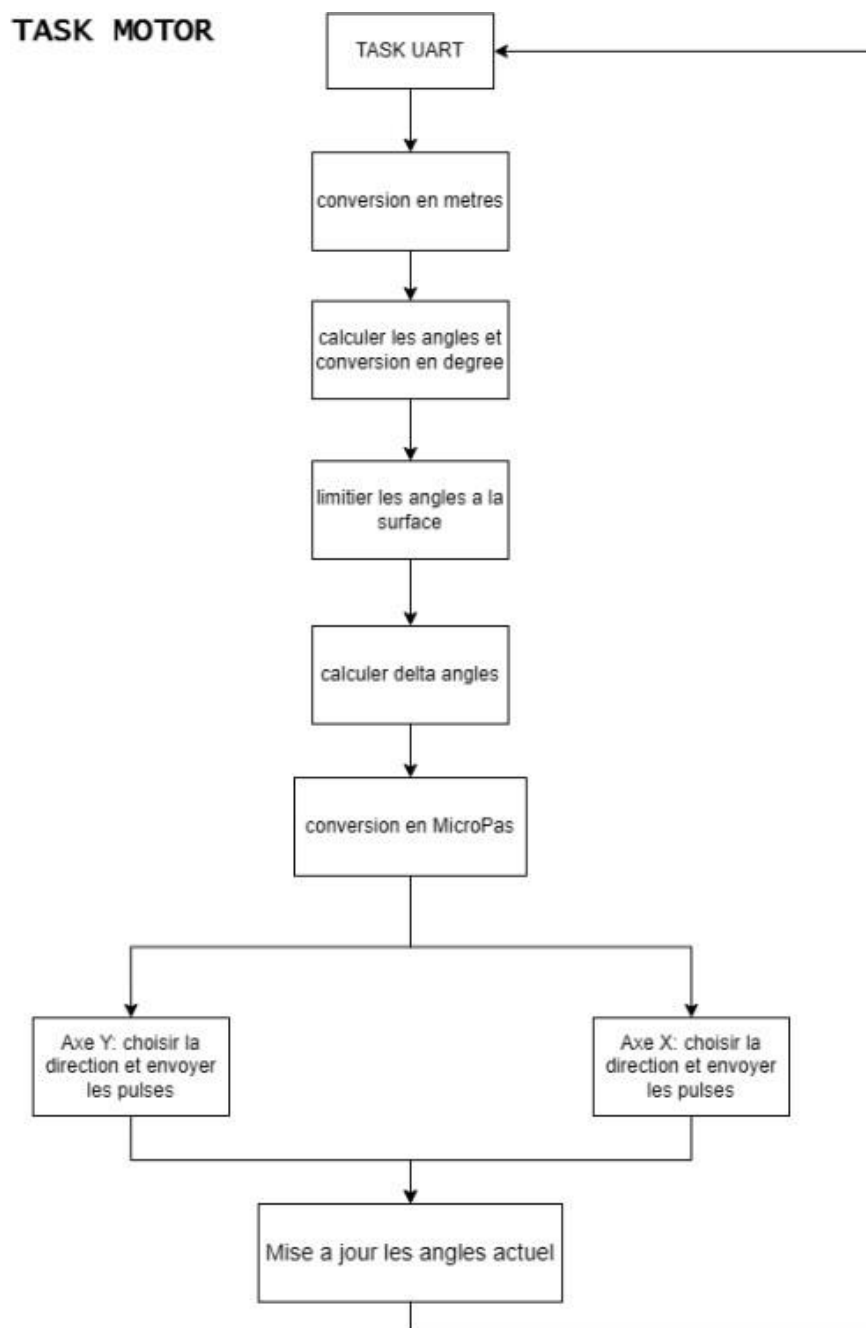


Figure II. 7 : Diagramme de la tâche moteur assurant le déplacement sur les deux axes.

La communication entre le smartphone et la carte STM32 repose sur le module Bluetooth HC-05, qui permet un échange de données en série via le protocole UART. L'objectif est d'assurer une transmission fiable et en temps réel des coordonnées X et Y, permettant ainsi le contrôle précis du déplacement du laser.[12].

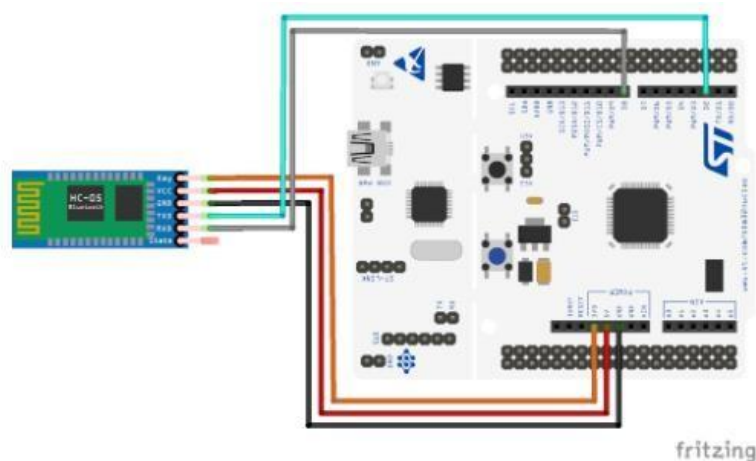


Figure II. 8 : Câblage STM32 et HC-05

II.3.1.1 Configuration du module Bluetooth HC-05

Le module HC-05 fonctionne en mode maître ou esclave. Dans ce projet, il est configuré en mode esclave afin de recevoir les données envoyées par l'application mobile.

Connexion matérielle entre la STM32 et le HC-05 :

- VCC → 5V : Alimente le module. Se connecter à une tension d'alimentation de +5V
- GND → Masse : Broche de terre du module, connectez-vous à la terre du système.
- TX du HC-05 → RX de la STM32 : Transmet les données de série. Tout ce qui est reçu via Bluetooth sera transmis par cette broche sous forme de données série.
- RX du HC-05 → TX de la STM32 : Réception des données série. Toutes les données série données à cette broche seront diffusées via Bluetooth

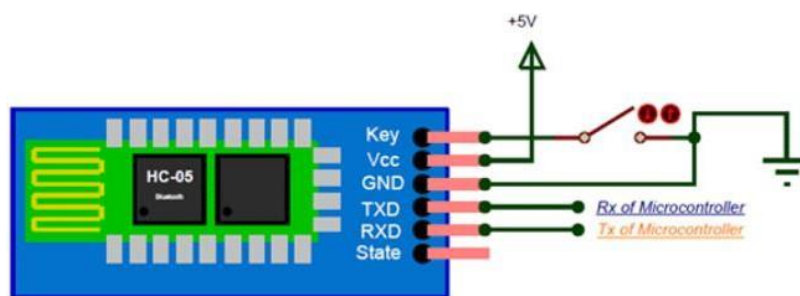


Figure II. 9 :schematic de HC-05

La communication se fait en UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) avec une vitesse typique de 9600 bauds, bien que cela puisse être modifié via des commandes AT.

- **HC-05 Paramètres par défaut :**

Nom Bluetooth par défaut : « HC-05 »

Mot de passe par défaut : 1234 ou 0000

Communication par défaut : Esclave

Mode par défaut : Mode données

Débit en bauds du mode de données : 9600, 8, N, 1

Débit en bauds du mode de commande : 38400, 8, N, 1

II.3.1.2 Programmation de la STM32 pour la communication Bluetooth

Dans le firmware de la STM32, l'USART est utilisé pour recevoir les coordonnées envoyées par le smartphone. Le programme doit :[13]

- ✓ Initialiser l'USART avec la bonne vitesse de transmission 9600 baud.

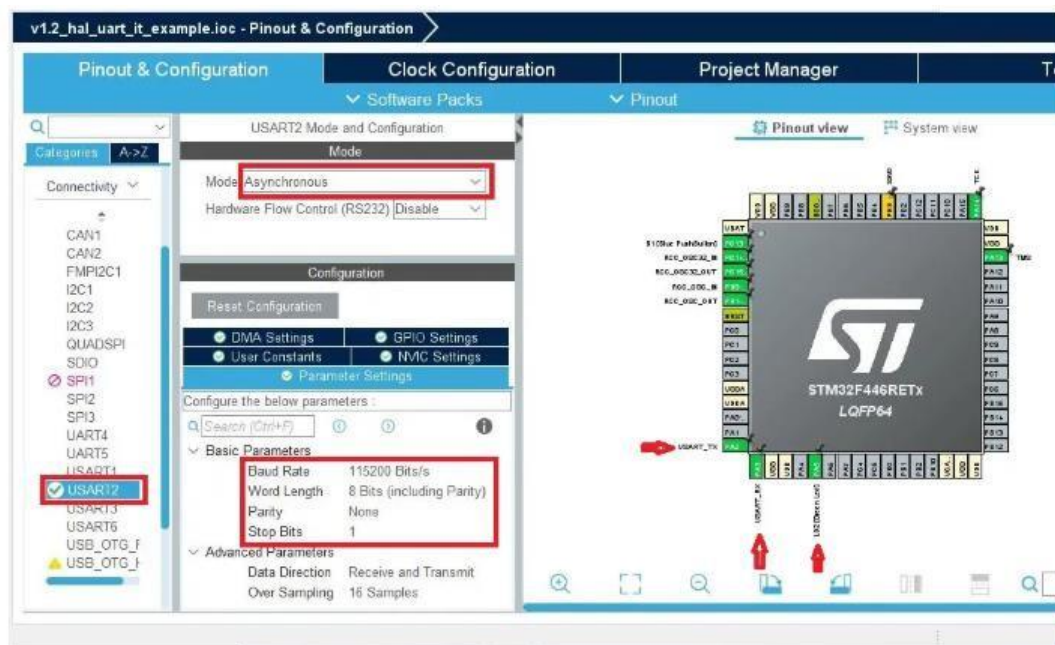


Figure II. 10 : Configuration de l'USART

- ✓ Pour recevoir des données, nous utilisons une fonction HAL appelée

```
HAL_UART_Receive(UART_HandleTypeDef *huart, uint8_t *pData, uint16_t Size, 100);
```

- ✓ La réception des données via le module Bluetooth HC-05 repose sur une tâche logicielle dédiée à l'écoute du port série UART. Cette tâche attend les messages contenant les coordonnées X et Y envoyées depuis l'application Android. Une fois les données reçues, elles sont analysées et stockées dans une structure adaptée pour être exploitées par la tâche de commande moteur.

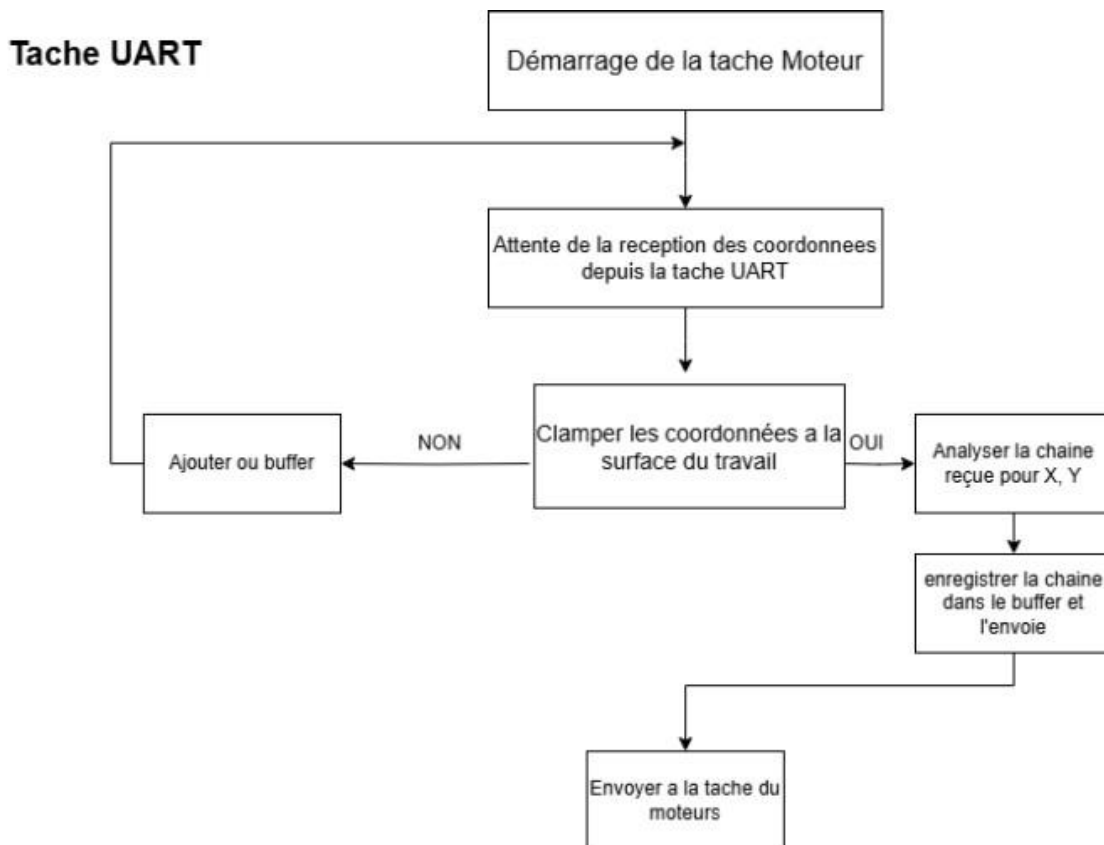


Figure II. 11 : Organigramme de la tâche UART pour la réception des coordonnées.

II.4 Développement de l'application mobile

II.4.1 Présentation des outils

Pour le développement de l'application mobile, un certain nombre d'outils logiciels ont été sélectionnés pour satisfaire les besoins fonctionnels du projet et garantir une compatibilité avec la carte STM32 et le module Bluetooth HC-05. Ces outils ont permis la conception, la programmation, la simulation et les tests de l'application mobile dédiée au pilotage du laser via un smartphone Android.

II.4.1.1 Android Studio

Android Studio est l'environnement de développement intégré (IDE) officiel pour Android, développé par Google. Il permet de concevoir des interfaces utilisateur, de coder en Java ou Kotlin, et de déployer facilement des applications sur des appareils Android physiques ou virtuels (émulateur).

Android Studio fournit un éditeur de présentation visuelle dans lequel vous pouvez glisser-déposer des composants d'interface tels que des boutons, du texte et des images. Les mises en page sont généralement définies dans des fichiers XML, permettant une séparation claire entre l'interface utilisateur et la logique de l'application.

II.4.1.2 Langage Java

Java a été choisi comme langage de programmation pour l'application mobile en raison de sa grande compatibilité avec Android, de sa maturité et de la richesse de sa documentation.[14]

Java est encore largement utilisé dans le développement mobile, bien qu'Android supporte aussi Kotlin.

Le langage Java a permis d'implémenter les différentes fonctionnalités de l'application, notamment :

- La gestion des interfaces (via les classes Activity, View, etc.)
- Le traitement des événements tactiles (onTouchEvent, MotionEvent)
- La gestion des connexions Bluetooth (via les classes BluetoothAdapter, BluetoothSocket, etc.)
- L'envoi de données série vers la carte STM32

II.4.1.3 API Bluetooth Android

L'API Bluetooth intégrée à Android permet de gérer la connectivité Bluetooth classique (non BLE). Elle a été utilisée pour établir la communication série avec le module HC-05 connecté à la STM32. Les principales fonctions utilisées sont :

- Détection et activation du Bluetooth
- Appairage avec des appareils connus
- Création d'une liaison RFCOMM (similaire à une liaison série UART)
- Envoi de données sous forme de chaînes de caractères

Cette API a permis de transmettre en temps réel les coordonnées X et Y générées par les mouvements du doigt sur l'écran du smartphone vers la carte STM32

II.4.2 Interface graphique et interaction tactile

Dans le cadre de ce projet, l'interface graphique tactile joue un rôle déterminant dans la commande précise du système de projection laser. Elle a été conçue de manière à permettre une interaction fluide entre l'utilisateur et le système, en s'appuyant sur le mécanisme d'événements tactiles de type `MotionEvent`, fourni par le framework Android.

II.4.2.1 Gestion des événements tactiles

La détection des gestes s'effectue à travers la méthode `onTouchEvent()`, qui intercepte les événements de contact avec l'écran. À chaque interaction de l'utilisateur (appui, glissement ou relâchement du doigt), un objet de type `MotionEvent` est généré. Cet objet encapsule toutes les informations relatives à l'événement, notamment la position du doigt sur l'écran et le type d'action effectuée.[15]

Les deux types d'actions principaux utilisés dans ce projet sont :

- `ACTION_DOWN` : déclenché dès que l'utilisateur pose le doigt sur l'écran.
- `ACTION_MOVE` : déclenché de manière répétée à mesure que le doigt se déplace sur la surface tactile.

La détection de ces actions permet à l'application de suivre le point de départ du mouvement ainsi que le déplacement continu du doigt, ce qui est essentiel pour contrôler dynamiquement la position du laser. Le fragment de code suivant illustre ce traitement :

```
if (event.getAction() == MotionEvent.ACTION_DOWN || event.getAction() == MotionEvent.ACTION_MOVE) {...}
```

Les méthodes `getX()` et `getY()` permettent d'extraire les coordonnées du point de contact en pixels, relativement à la vue affichée.

```
float x = event.getX();  
float y = event.getY();
```

II.4.2.2 Transmission des coordonnées à la STM32

Chaque fois qu'un événement de type `ACTION_MOVE` est détecté, les coordonnées X et Y sont recalculées par rapport au centre de l'écran. Cette approche permet une navigation intuitive dans les quatre quadrants du repère, en distinguant les directions positives et négatives.[16]

La chaîne de données est générée sous un format simple, tel que :

```
String message = "X" + coordX + ",Y" + coordY + "\n";
```

Cette chaîne est ensuite transmise via la socket Bluetooth active, à travers un OutputStream, en respectant la syntaxe attendue par la STM32. L'envoi est conditionné à la détection d'un mouvement afin d'optimiser la bande passante et d'éviter un flux de données inutile.

II.4.2.3 Gestion de la connexion Bluetooth

L'application intègre un système de gestion de la connexion Bluetooth pour assurer la fiabilité de la communication. L'utilisateur est invité à effectuer un appairage avec le module HC-05 depuis l'écran d'accueil. Une fois la connexion établie, une socket Bluetooth est créée et maintenue ouverte tant que la session est active.

En cas de perte de connexion ou d'erreur de transmission, l'application détecte l'anomalie et en informe l'utilisateur via un message visuel. Un bouton « Déconnexion » permet également de mettre fin manuellement à la session Bluetooth.

Pour renforcer l'interaction, les coordonnées envoyées sont affichées en temps réel dans une zone dédiée de l'interface. Cela offre un feedback immédiat à l'utilisateur sur les données réellement transmises à la carte STM32. Ce retour visuel est particulièrement utile pour ajuster le positionnement du doigt et garantir la précision des déplacements.

Afin d'illustrer le processus de connexion Bluetooth entre le smartphone et le module HC-05, le diagramme ci-dessous présente le déroulement logique des actions au sein de l'application mobile, depuis le lancement jusqu'à l'envoi des coordonnées.

Application Android

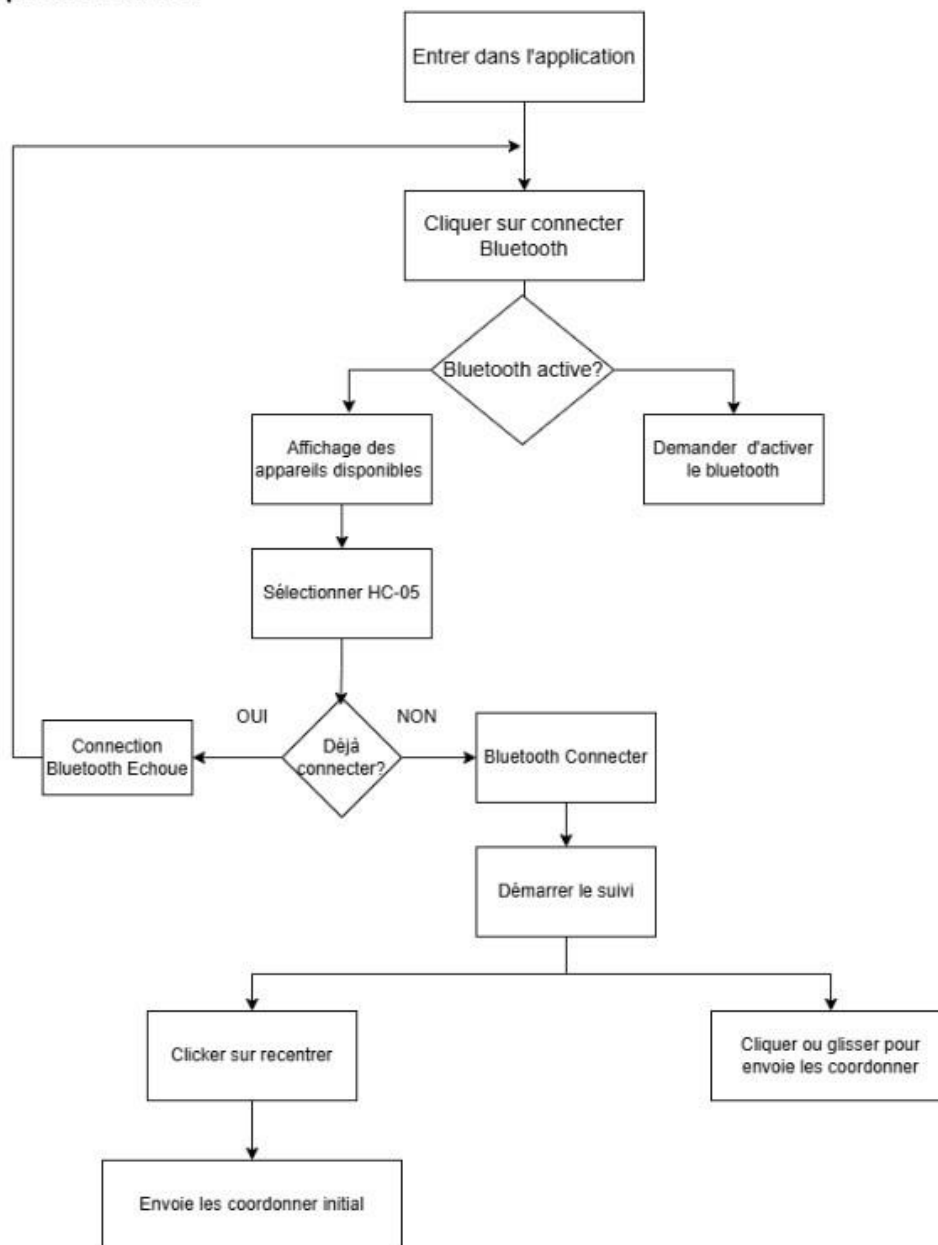


Figure II. 12 : Organigramme du déroulement fonctionnel de l'application mobile

Ce flux permet à l'utilisateur de gérer l'état de la connexion, de démarrer le suivi, de recadrer la position initiale ou d'envoyer les coordonnées du laser en temps réel.

II.5 Intégration et tests

L'intégration du système a nécessité une phase rigoureuse de validation, menée en deux étapes complémentaires : des tests unitaires sur les modules individuels du système, suivis de

tests d'intégration portant sur le fonctionnement global. L'objectif principal était de s'assurer de la fiabilité de la communication, de la précision du guidage du laser, ainsi que de la réactivité du système dans des conditions d'utilisation réelles.

II.5.1 Tests unitaires

Les tests unitaires ont permis de vérifier séparément le bon fonctionnement de chaque composant du système, avant leur intégration.

Dans un premier temps, la communication Bluetooth a été testée à l'aide de l'outil PuTTY, connecté à la carte STM32 via l'interface UART. Les coordonnées X et Y envoyées depuis l'application Android ont bien été reçues sous forme de chaînes de caractères et s'affichaient correctement dans le terminal série. Une comparaison visuelle avec les coordonnées affichées simultanément sur l'écran du smartphone a confirmé la correspondance exacte, validant ainsi la fiabilité de la transmission Bluetooth et la bonne réception côté STM32.

Les moteurs pas à pas ont également été testés indépendamment de l'application mobile, à l'aide d'un programme simple embarqué. Ce test visait à vérifier leur réponse aux impulsions générées par la carte STM32. Les deux axes (X et Y) ont été testés séparément pour confirmer leur capacité à tourner dans les deux directions. Toutefois, des vibrations importantes ont été observées, notamment à faible vitesse, suggérant la nécessité d'une amélioration du pilotage moteur

II.5.2 Tests d'intégration du système complet

Une fois les modules validés individuellement, l'ensemble du système a été testé en configuration réelle, en reliant l'application mobile, la communication Bluetooth et le pilotage des moteurs via la STM32.

La synchronisation entre le mouvement du doigt sur l'écran tactile du smartphone et le déplacement du laser a été jugée globalement satisfaisante. Toutefois, lors d'un glissement prolongé, le mouvement du faisceau s'est révélé saccadé, probablement en raison de la programmation. Cette situation a mis en évidence un besoin d'optimisation du traitement asynchrone des données, afin de fluidifier le contrôle en temps réel.

La gestion de la connexion Bluetooth a, quant à elle, montré une grande fiabilité. Les boutons « Connexion » et « Déconnexion » intégrés à l'interface Android réagissent correctement, permettant une prise en main simple et stable de l'état de la communication. Aucun bug ou perte de liaison n'a été constaté durant les tests.

Enfin, un comportement inattendu a été observé au démarrage du système : les moteurs effectuent un déplacement automatique (environ 7,5 cm sur l'axe X et 3,5 cm sur l'axe Y) dès l'alimentation, sans commande utilisateur. Ce phénomène est vraisemblablement dû à un mouvement initial non contrôlé causé par une absence de calibration des positions de départ, ou par une impulsion résiduelle au moment de l'initialisation selon le sens du rotor.

II.6 Conclusion

Ce chapitre a retracé de manière détaillée les différentes étapes de mise en œuvre du système de projection laser contrôlé par smartphone. Dans un premier temps, une étude technique a permis de définir l'architecture globale du système et de sélectionner les composants matériels les plus adaptés, notamment la carte STM32, les moteurs pas à pas et le module Bluetooth HC-05.

Ensuite, le développement du système embarqué a consisté à programmer la STM32 pour assurer le pilotage précis des moteurs et la réception des données via Bluetooth. En parallèle, une application mobile a été conçue sous Android Studio, intégrant une interface graphique tactile intuitive capable de capturer les coordonnées de l'utilisateur et de les transmettre à la carte STM32. Une attention particulière a été portée à la gestion des événements tactiles et à la fiabilité de la communication sans fil.

Enfin, une série de tests unitaires et d'intégration ont été réalisés pour valider le bon fonctionnement de chaque composant ainsi que la cohérence du système global. Ces tests ont permis de détecter d'éventuelles limitations, notamment au niveau des vibrations des moteurs ou de la fluidité du déplacement, ouvrant la voie à des pistes d'optimisation.

Ainsi, le système a pu être implémenté dans sa totalité, combinant matériel et logiciel de manière cohérente pour assurer un contrôle en temps réel du positionnement du laser à partir d'un smartphone.

Chapitre 3

Évaluation et perspectives

III.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif d'analyser la performance du système conçu, tant sur le plan fonctionnel que technique, en comparant les résultats obtenus avec les objectifs initiaux. Il s'agit d'évaluer la précision, la réactivité du contrôle, ainsi que la fiabilité de la communication entre les composants. En parallèle, une réflexion est menée sur les perspectives d'amélioration du système, ainsi que sur les potentielles applications dans divers domaines tels que le médical, le militaire ou le sport. Cette analyse critique permet de dégager des pistes concrètes d'optimisation et d'extension, essentielles à toute démarche d'ingénierie évolutive.

III.2 Conception et Prototypage

III.2.1 Description de la Conception du Prototype

Le prototype a été conçu pour diriger un laser sur une table de travail à l'aide de deux moteurs pas à pas, permettant un pointage précis et contrôlé via une interface sans fil (Application Android).

Le système va être intégré dans un boîtier compact fabriqué à l'aide de SolidWorks, qui abrite les principaux composants : un microcontrôleur STM32L476RG au centre, deux drivers TB6600 positionnés à gauche et à droite, un module HC-05 Bluetooth situé sous le microcontrôleur, et deux moteurs pas à pas KP4M2-203 placés en haut du boîtier. Le moteur Y, auquel le laser est fixé, est conçu pour que son rotor soit visible à l'extérieur du boîtier, permettant au laser de pointer directement sur la table. Le fonctionnement repose sur la réception de coordonnées cibles via Bluetooth, leur traitement par le microcontrôleur pour calculer les angles des moteurs, et l'activation des moteurs pour diriger le laser. Le prototype a été testé dans différentes configurations, démontrant une capacité à pointer avec précision sur la table, tout en étant adaptable à des distances variables grâce à des ajustements logiciels.

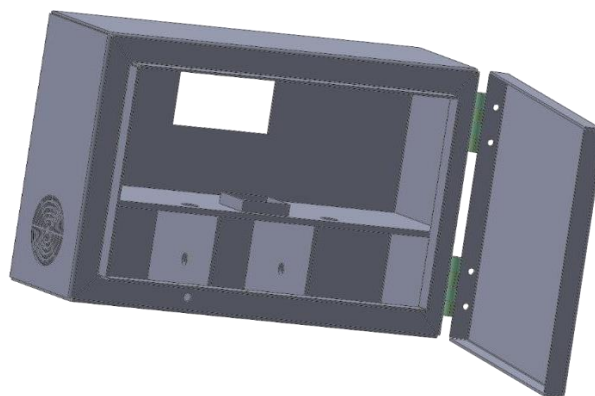


Figure III. 1 : Boîtier du système

III.2.1.1 Spécifications Matérielles et Logicielles Utilisées

Le matériel utilisé comprend un microcontrôleur STM32L476RG, choisi pour sa puissance de calcul et ses nombreuses interfaces (UART, GPIO, timers), nécessaires pour gérer les moteurs et la communication. Deux drivers TB6600 contrôlent les moteurs pas à pas KP4M2-203, offrant une gestion robuste des courants et une capacité à fonctionner en mode micro-pas, ce qui garantit une précision fine des mouvements. Les moteurs KP4M2-203, avec 200 pas par tour, sont adaptés pour des applications nécessitant un positionnement précis et un couple suffisant pour supporter le laser.

Le module HC-05 Bluetooth assure une communication sans fil avec une vitesse de transmission de 9600 bauds via UART, permettant de recevoir les coordonnées cibles depuis une interface utilisateur externe. Un laser de faible puissance est fixé sur le rotor du moteur Y pour le pointage. Côté logiciel, **STM32CubeMX** a été utilisé pour configurer le STM32 (broches GPIO, UART, timer TIM2, et FreeRTOS via CMSIS-RTOS v2 pour gérer deux tâches : réception UART et contrôle moteur), le système embarqué utilise IAR_EW_for_ARM pour le développement, avec CMSIS-RTOS v2 pour gérer deux tâches en parallèle : une pour la réception des données UART et une pour le contrôle des moteurs. Les calculs trigonométriques (arctangente) pour déterminer les angles des moteurs sont implémentés en C, et un timer matériel (TIM2) est utilisé pour générer des impulsions précises pour les moteurs.

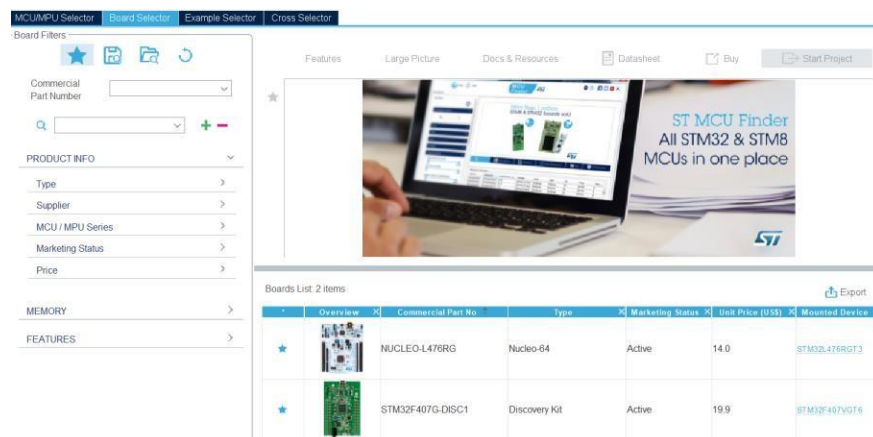


Figure III. 2 : UI du STM32CUBEMX

Par ailleurs, une application mobile a été développée avec Android Studio pour fonctionner sur des appareils Android. Cette application, codée en Java, utilise la bibliothèque Bluetooth intégrée d'Android (via BluetoothAdapter et BluetoothSocket) pour envoyer les coordonnées cibles au module HC-05, avec une interface graphique conçue en XML (incluant des EditText pour la saisie, des Button pour la connexion et l'envoi, et des TextView pour les messages d'état).

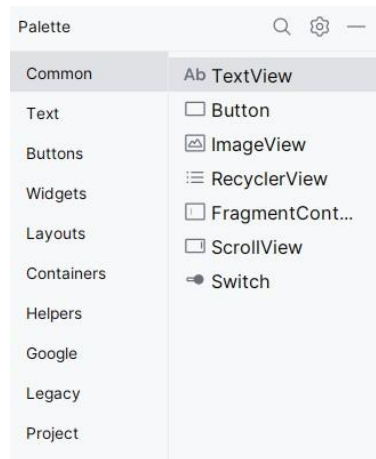


Figure III. 3 : Palette dans Android Studio

III.2.1.2 Choix des Technologies et Justification

Le choix du STM32L476RG est justifié par sa faible consommation d'énergie, sa capacité à gérer des tâches en temps réel grâce à CMSIS-RTOS v2, et ses nombreuses broches GPIO pour interfacier les drivers et le module Bluetooth. Les drivers TB6600 ont été sélectionnés pour leur fiabilité et leur capacité à gérer des moteurs pas à pas de forte puissance, tout en offrant une configuration simple pour le mode micro-pas, essentielle pour atteindre une précision élevée. Les moteurs KP4M2-203 ont été choisis pour leur compatibilité avec les drivers TB6600 et leur précision suffisante pour des mouvements fins, tout en étant économiques et largement disponibles. Le module HC-05 Bluetooth a été retenu pour sa simplicité d'utilisation, son faible coût, et sa compatibilité avec les smartphones Android, permettant une communication sans fil à courte portée (jusqu'à 10 mètres), suffisante pour les tests en environnement contrôlé.

CMSIS-RTOS v2 a été préféré à une implémentation sans FreeRTOS pour permettre une gestion parallèle des tâches, améliorant la réactivité du système face à des commandes fréquentes. **STM32CubeMX** a été retenu pour sa capacité à configurer facilement le matériel (broches, UART, timer, FreeRTOS), réduisant les erreurs et l'utilisation de IAR_EW_for_ARM a permis un développement rapide et efficace, grâce à ses outils intégrés pour la configuration du matériel et le débogage, réduisant ainsi les erreurs lors de la mise en œuvre.

Concernant l'application mobile, **Android Studio** a été choisi pour sa robustesse, sa large communauté de support, et ses outils intégrés pour le développement d'applications Android, notamment la prise en charge native de la communication Bluetooth. **Java** a été retenu pour sa compatibilité avec l'API Bluetooth d'Android et sa facilité de mise en œuvre pour une application simple, qui ne nécessite pas de fonctionnalités complexes. La décision de cibler

assure que l'application peut fonctionner sur une large gamme d'appareils, rendant le système accessible à un public plus large. L'interface utilisateur minimaliste de l'application a été privilégiée pour garantir une utilisation intuitive, même pour des utilisateurs non techniques, tout en réduisant les risques d'erreurs de saisie.

III.2.2 Développement du Prototypage

III.2.2.1 Étapes du Développement du Logiciel

Le développement logiciel du système a été réalisé en plusieurs étapes, en se concentrant sur la partie embarquée gérée par le microcontrôleur STM32L476RG.

Tout d'abord, STM32CubeMX a été utilisé pour configurer le matériel : les broches GPIO ont été activées pour contrôler les drivers TB6600 (PA0 pour DIR+ et PA1 pour PUL+ le premier moteur et PC0 pour DIR+ et PC1 pour PUL+ du deuxième moteur), les broches UART (PA9 pour TX et PA10 pour RX) ont été configurées pour la communication avec le module HC-05 à 9600 bauds, et le timer TIM2 a été initialisé pour générer des impulsions précises pour les moteurs. FreeRTOS (via CMSIS-RTOS v2) a été activé pour gérer deux tâches en parallèle : une tâche pour la réception des données UART et une autre pour le contrôle des moteurs.

Ensuite, le code a été développé dans IAR Embedded Workbench for ARM, où les fonctionnalités principales ont été implémentées : réception et traitement des coordonnées via UART, calcul des angles des moteurs à l'aide de la fonction arctangente, conversion des angles en pas ou micro-pas, et génération des impulsions pour les moteurs via TIM2.



Figure III. 4 : version alpha du Système de projection

Le développement de l'application Android a constitué une étape cruciale dans la réalisation du prototype, permettant d'assurer une interaction intuitive et efficace entre l'utilisateur et le système de projection. L'application a été développée sous Android Studio en utilisant le langage Java, et conçue spécifiquement pour un usage en mode paysage afin de maximiser la surface de contrôle disponible pour l'utilisateur. L'interface graphique a été pensée pour être simple, fluide et ergonomique, en se limitant à l'essentiel afin de ne pas surcharger l'utilisateur. Elle se compose de deux écrans principaux :

- un écran d'accueil avec trois boutons – connexion Bluetooth, déconnexion, et accès à l'interface de contrôle

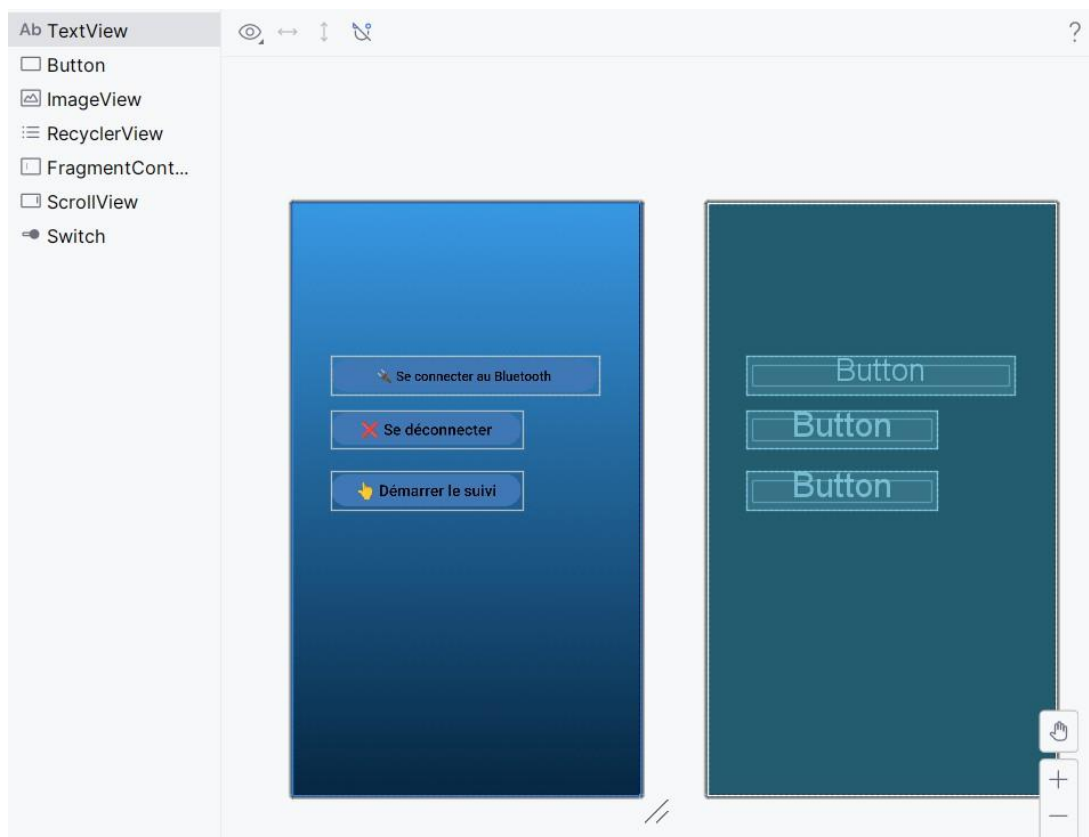


Figure III. 5 : Ecran d'accueil de l'application android

- ❖ **Activation du Bluetooth :** Lorsque l'utilisateur appuie sur le bouton "Se connecter", l'application vérifie si le Bluetooth est activé. Si ce n'est pas le cas, un message Toast s'affiche : "Veuillez activer le Bluetooth", incitant l'utilisateur à l'activer pour continuer.
- ❖ **Affichage des appareils appairés :** Une fois le Bluetooth activé, un nouvel appui sur "Se connecter" ouvre une boîte de dialogue contenant la liste des appareils Bluetooth déjà appairés. L'utilisateur sélectionne alors le module HC-05 pour initier la connexion.

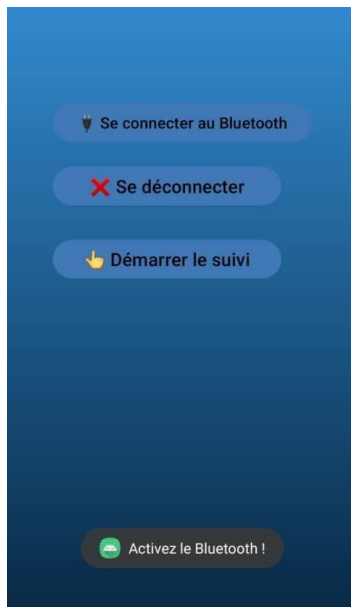


Figure III.6 : Toast demande d'activation Bluetooth

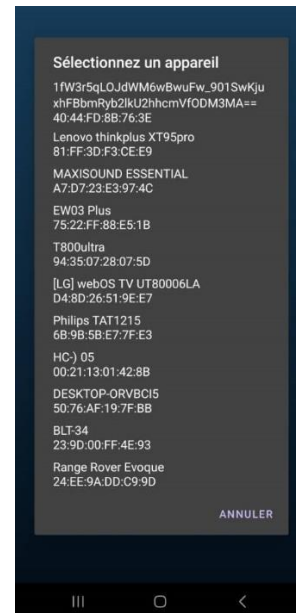


Figure III.7 : Liste des appareils Bluetooth

- ❖ **Connexion réussie** : Après sélection du module, si la connexion est établie correctement, l'application affiche un Toast indiquant : "Connexion réussie". Cela signifie que la communication entre le smartphone et la carte STM32 est prête.
- ❖ **Connexion échouée** : Si la tentative de connexion échoue (par exemple, si le module HC-05 est hors tension), un message "Connecté à HC-05 " est affiché, informant l'utilisateur que la liaison n'a pas pu être établie.
- ❖ **Déconnexion** : Lorsque l'utilisateur appuie sur le bouton "Déconnexion", la liaison Bluetooth est interrompue et un Toast "Déconnecté" s'affiche, confirmant que la communication est bien arrêtée.

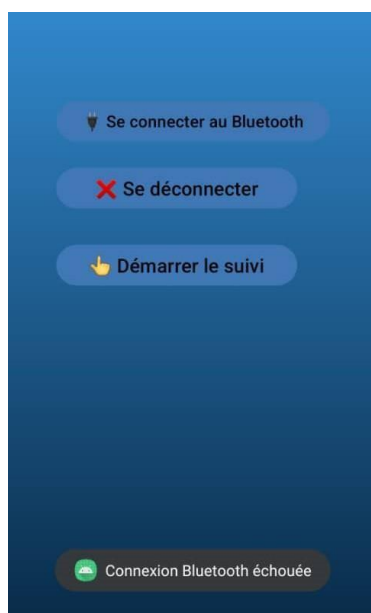


Figure III.8 : Toast échoue de connexion

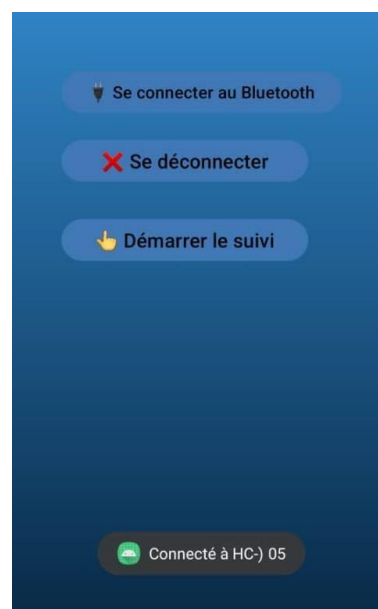


Figure III.9 : Toast connexion



Figure III.10 : Toast déconnexion

– un second écran dédié au pilotage du laser, où l'utilisateur peut glisser son doigt pour envoyer en temps réel des coordonnées à la carte STM32.

La figure montre l'interface tactile de l'application Android, permettant de transmettre les coordonnées X et Y en temps réel :

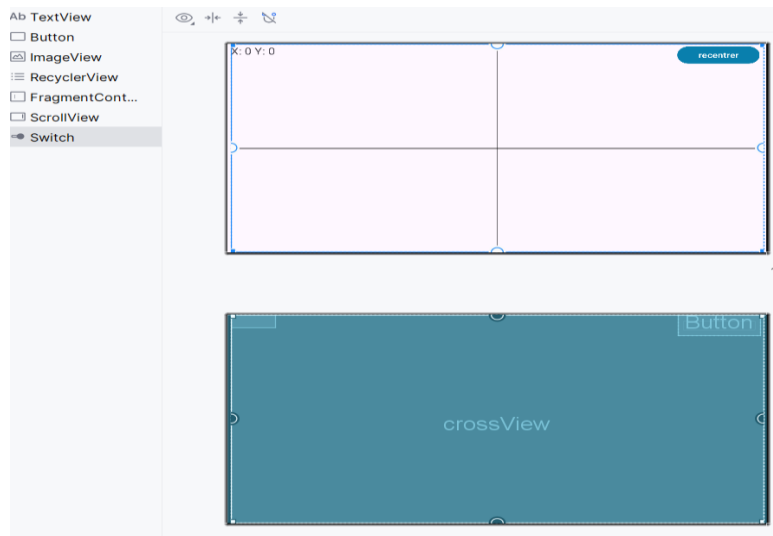


Figure III. 11 : Interface tactile de l'application Android

Cette interface de contrôle affiche dynamiquement les coordonnées X et Y du doigt, calculées en temps réel à chaque mouvement sur l'écran, avec une conversion du système de coordonnées natif d'Android vers un repère adapté au fonctionnement mécanique du système.

La détection des gestes repose sur la gestion des événements tactiles (`onTouchEvent`), capturant les phases d'appui, de glissement et de relâchement du doigt. À chaque déplacement détecté (`ACTION_MOVE`), les coordonnées sont extraites et envoyées sous forme de chaînes de caractères (ex : "X120, Y80\n") via une communication Bluetooth série avec le module HC-05, associé à la carte STM32. Pour cela, l'application gère l'appairage Bluetooth, établit une connexion à travers un `BluetoothSocket`, et envoie les données sur un flux de sortie, garantissant une transmission sans interruption de l'interface utilisateur. Enfin, des tests progressifs ont permis d'ajuster la sensibilité tactile, de corriger des erreurs de synchronisation. L'application offre ainsi une plateforme conviviale pour diriger avec précision le système de projection laser.

III.2.2.2 Aspects Techniques de l'Intégration Matériel-Logiciel

L'intégration matériel-logiciel a nécessité une coordination précise entre les composants et le firmware. Les drivers TB6600, au nombre de deux (un pour chaque moteur), disposent de 12 broches : 2 pour l'alimentation (GND et VCC à 12V), 4 pour le moteur bipolaire KP4M2-

203 (A+, A-, B+, B-), et 6 pour la connexion au STM32 (DIR-, PUL-, ENA-, ENA+ reliés à GND pour activer le driver, DIR+ connecté à PA0 pour la direction, et PUL+ à PA1 pour les impulsions). Cette configuration a été appliquée identiquement pour les deux moteurs (X et Y), avec des broches distinctes sur le STM32 pour chaque driver. Le module HC-05 est connecté via 4 broches : VCC (3.3V), GND, RX (PA10), et TX (PA9), permettant une communication UART stable avec le microcontrôleur. Le laser est mécaniquement fixé sur le rotor du moteur Y, dont la position est contrôlée par le logiciel pour pointer vers les coordonnées cibles.

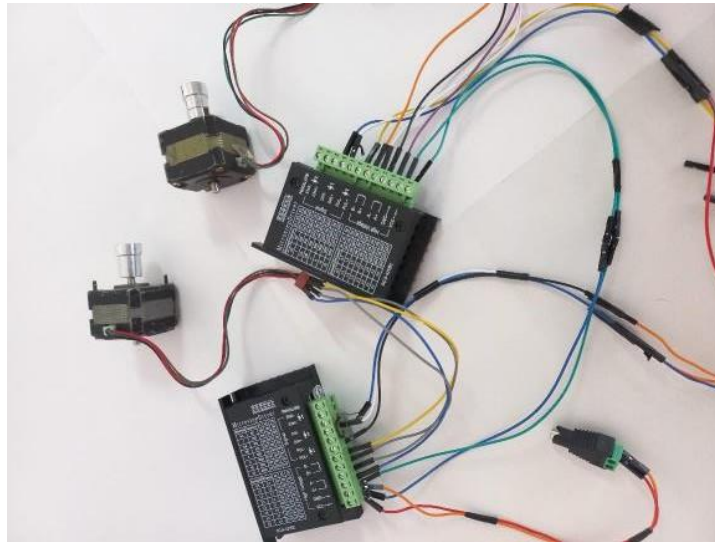


Figure III. 12 : TB6600 brancher a Kp4m2-203

L'utilisation de FreeRTOS a permis une gestion efficace des tâches, évitant les blocages lors de la réception des données et du contrôle simultané des moteurs, bien que des ajustements aient été nécessaires pour minimiser la latence due à la planification des tâches. Les tests ont montré une intégration réussie, avec une synchronisation correcte entre les impulsions générées par le logiciel et les mouvements des moteurs, assurant un pointage précis du laser.

L'intégration constitue aussi un maillon essentiel du fonctionnement harmonieux du système de projection laser contrôlé par smartphone. Cette intégration repose sur une communication bidirectionnelle efficace entre l'application mobile Android et la carte STM32, qui agit comme unité centrale de traitement. D'un point de vue matériel, le système repose sur deux moteurs pas à pas pilotés via des drivers TB6600, eux-mêmes commandés par des signaux logiques générés par la STM32.

Le module Bluetooth HC-05, connecté à l'une des interfaces UART de la carte, permet la réception sans fil des coordonnées envoyées par l'application. Ces coordonnées sont encodées sous forme de chaînes de caractères dans un format prédéfini ("X120,Y85\n"), puis

transmises en série via le module Bluetooth. Côté logiciel embarqué, la STM32 est programmée en C en utilisant IAE EW for ARM, avec une architecture modulaire basée FreeRTOS.

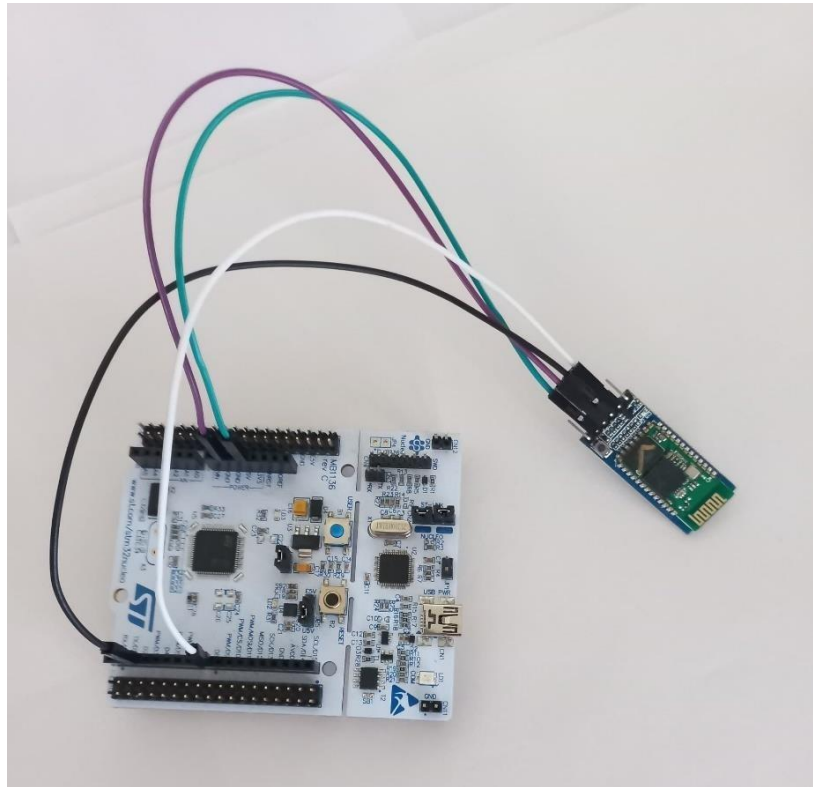


Figure III. 13 : STM32L476RG brancher avec HC05

Un parser logiciel permet d'extraire les valeurs numériques des coordonnées, qui sont ensuite utilisées pour déterminer le nombre de pas et la direction de rotation de chaque moteur. Des fonctions spécifiques génèrent les impulsions nécessaires au pilotage des drivers TB6600 en tenant compte de la résolution des moteurs, de la vitesse maximale souhaitée et des limites mécaniques du système. Un soin particulier a été apporté à la synchronisation des deux axes, pour garantir un mouvement fluide et coordonné du laser. De plus, un mécanisme de sécurité a été intégré pour vérifier la validité des coordonnées reçues et éviter des comportements imprévus en cas de transmission erronée. Côté mobile, l'envoi des coordonnées se fait en temps réel grâce à la détection tactile (onTouchEvent) et l'usage d'un flux de sortie associé à un BluetoothSocket. L'ensemble de cette architecture démontre une intégration cohérente entre les éléments logiciels (application Android, traitement sur STM32) et matériels (moteurs, drivers, Bluetooth), assurant un contrôle précis et interactif du système dans son ensemble. Cette synergie entre les couches matérielles et logicielles a permis d'atteindre un fonctionnement stable, réactif et adaptable à différents scénarios d'usage.

III.3 Tests et Validation :

La phase de tests et validation a été essentielle pour évaluer la fiabilité, la performance et l'ergonomie du système de projection laser commandé par smartphone. Une approche méthodique a été adoptée pour tester les différentes composantes du système, de manière progressive et ciblée. Cette phase s'est structurée autour de trois types de tests complémentaires : fonctionnels, de performance, et de convivialité.

III.3.1 Méthodologie de test

Chaque test a été conçu pour valider une fonction spécifique du système, en tenant compte des interactions entre les différentes couches (application Android, module Bluetooth HC-05, carte STM32, moteurs pas à pas, laser). Les tests ont été réalisés dans un environnement contrôlé, en laboratoire, avec des scénarios d'utilisation réalistes reproduisant les cas d'usage visés. Les données mesurées ont été comparées à des critères prédéfinis pour garantir l'objectivité de l'évaluation.

III.3.1.1 Types de tests réalisés :

Plusieurs types de tests ont été réalisés pour valider le fonctionnement du prototype. Les tests fonctionnels ont vérifié que le système répond correctement aux commandes : des coordonnées cibles ont été envoyées via l'application Android (par exemple, "100,0\n" pour le bord droit), et le laser s'est déplacé pour pointer vers la position correspondante, confirmant que la réception des données via Bluetooth, le traitement par le STM32, et le contrôle des moteurs fonctionnent comme prévu. Les tests de performance ont évalué la réactivité et la précision du système : des séquences de commandes ont été envoyées à intervalles réguliers pour mesurer le temps de réponse (de la réception à la fin du mouvement) et la précision du pointage laser sur des positions prédéfinies. Enfin, les tests de convivialité ont ciblé la simplicité d'utilisation pour un utilisateur non technique, à la fois pour l'application et le système global. L'application Android a été testée pour sa facilité d'utilisation : la première étape consiste à connecter le smartphone au module HC-05 via Bluetooth (un bouton "Connexion" affiche un message de confirmation), et la deuxième étape permet de sélectionner un point en touchant l'écran (une représentation graphique de la table) ou en saisissant les coordonnées manuellement, puis d'envoyer les données automatiquement.

Le système global a été évalué pour sa simplicité et son fonctionnement autonome une fois connecté, ne nécessitant aucune configuration complexe.

III.3.1.2 Critères d'évaluation et mesures utilisées

Les critères d'évaluation ont été définis pour chaque type de test. Pour les tests fonctionnels, le critère principal était la conformité du pointage : la position réelle du laser sur la table (mesurée avec une règle graduée) devait correspondre à la position cible avec une petite erreur. Un taux de succès de 100 % des commandes correctement exécutées (sans perte de données via Bluetooth) était également requis. Pour les tests de performance, deux mesures ont été utilisées : le temps de réponse total (de l'envoi de la commande à la fin du mouvement), ciblant un maximum de 500ms, et la précision évaluée en comparant la position cible et la position réelle sur 10 points différents, avec une petite erreur. Pour les tests de convivialité, l'application a été évaluée sur sa simplicité : le temps nécessaire pour connecter le Bluetooth (ciblant moins de 10 secondes) et pour envoyer une commande (ciblant moins de 5 secondes) a été mesuré lors de tests avec 5 utilisateurs non techniques. La simplicité générale du système a été jugée sur la facilité de mise en route (connexion et pointage sans intervention technique), confirmée par les retours qualitatifs des utilisateurs, qui ont apprécié la clarté de l'interface et l'autonomie du dispositif.

III.3.2 Résultats des tests

Les résultats globaux des tests ont été satisfaisants. Le système a démontré une bonne précision sur des surfaces de 200 cm × 100 cm, avec une erreur maximale 10%, ce qui est acceptable pour une application de démonstration.

La connexion Bluetooth a été jugée stable dans un rayon de 5 à 8 mètres, sans interruption. Le traitement des coordonnées dans la STM32 a montré une bonne robustesse grâce à la validation des données reçues. Côté convivialité, les utilisateurs ont trouvé l'application simple, claire et intuitive, avec des suggestions d'amélioration portant sur l'ajout d'une grille pour mieux guider le doigt.

III.3.2.1 Points forts et limites identifiés

Parmi les points forts du système, on peut citer :

- Une intégration fluide entre les composants logiciels et matériels.
- Une communication Bluetooth stable et réactive,
- Une interface mobile intuitive, adaptée à une utilisation en temps réel.
- Le système est évolutif et flexible (l'ajoute du AI, camera...etc. Au future).

- Intégration du FreeRTOS ce qui permet un parallélisme des tâches, réaction en temps réel.

En revanche, quelques limites ont été identifiées :

- Calibration au milieu manuellement au début de la projection.
- Un décalage à gauche ou à droite quand on alimente les moteurs (pas tout le temps mais selon la position du rotor).
- Manque de calibration automatique.
- Système limité à une table de 2x1m et distance de 1m
- La sensibilité aux vibrations mécaniques, pouvant légèrement perturber le positionnement du laser et la précision.

III.4 Études de cas et Applications

Le système développé, reposant sur le contrôle d'un laser à l'aide d'une application mobile connectée à une carte STM32 via Bluetooth, présente un potentiel d'application étendu dans plusieurs domaines. Dans le secteur éducatif, il peut être utilisé comme outil pédagogique interactif, aux systèmes embarqués, à la robotique ou à la programmation. En effet, la possibilité de tracer des formes sur un écran tactile et de les voir reproduites par un laser en temps réel peut capter l'attention des élèves et favoriser l'apprentissage actif.

Dans un contexte professionnel, notamment en entreprise ou lors de présentations techniques, le système peut servir de dispositif de pointage dynamique ou de tableau interactif sans contact, facilitant les démonstrations à distance ou la mise en valeur de certains éléments d'un exposé. Son fonctionnement sans fil et sa portabilité lui permettent d'être utilisé dans des salles de réunion ou des ateliers sans nécessiter d'infrastructure lourde.

Dans le domaine de la santé, ce système pourrait être adapté pour des applications de rééducation motrice. Par exemple, en associant le mouvement du doigt ou d'un geste à une trajectoire de laser, un patient pourrait effectuer des exercices visuels et moteurs de manière interactive, tout en étant suivi précisément. Des adaptations futures pourraient également permettre une utilisation en milieu chirurgical ou en télémédecine, notamment pour le guidage visuel sans contact.

Les tests pilotes réalisés auprès de quelques étudiants en électronique ont permis de recueillir des retours d'expérience constructifs. La majorité des utilisateurs ont apprécié

l'originalité de l'approche, la simplicité d'utilisation de l'application mobile, et la cohérence entre le geste et la réponse du système. Certains ont proposé des améliorations fonctionnelles, une option pour enregistrer et rejouer des trajectoires, ou encore l'intégration d'un mode automatique pour des formes prédéfinies. Ces retours confirment l'intérêt du système dans des usages variés et fournissent une base solide pour des évolutions futures, tant sur le plan logiciel que matériel.

III.5 Discussion

III.5.1 Analyse Critique des Résultats par Rapport aux Objectifs Initiaux

Les objectifs initiaux (précision, réactivité, convivialité, contrôle Bluetooth, gestion FreeRTOS) sont atteints, mais avec des limites. La précision (< 3 cm sur un tableau de 2 m x 1 m à 1 m de distance) convient pour des applications éducatives ou médicales, mais restreint les usages industriels ou militaires. La réactivité initiale du système est presque instantanée, avec un traitement des commandes en moins de 50 ms grâce à FreeRTOS, mais le temps pour atteindre la position voulue varie selon la vitesse des moteurs et la distance entre les points. Par exemple, pour un déplacement maximal sur le tableau (2 m), le laser met environ 500 ms à basse vitesse, mais ce temps peut descendre à 200 ms à haute vitesse, ce qui souligne l'importance d'un compromis entre rapidité et précision. Au démarrage, les moteurs se décalent (± 7.5 cm selon x, ± 3.5 selon y) parfois de leur position initiale selon l'orientation du rotor, nécessitant un recalibrage. L'application Android est intuitive (connexion Bluetooth < 10 s, sélection facile des coordonnées), mais la communication Bluetooth a une limite de l'usage dans des environnements exigeants et à une distance lointaine.

III.5.2 Comparaison avec les Méthodes Existantes et Autres Projets Similaires

Comparé aux systèmes commerciaux (Leica, Faro), notre prototype est économique et plus simple, mais moins précis et limité à 2 m x 1 m et 1 m de distance, contre 50 m pour ces solutions. Face à des projets Arduino, notre système est plus réactif grâce au STM32 et FreeRTOS, mais les vibrations et le décalage initial sont des faiblesses, contrairement à des projets avec calibration automatique ou moteurs plus stables.

III.5.3 Implication des Résultats Obtenus pour les Applications Futures et les Développements Technologiques

Les résultats sont prometteurs pour des applications médicales (rééducation) et éducatives (laboratoires), mais les vibrations et le décalage initial nécessitent des améliorations (caméra, calibration automatique, Ai). La limitation spatiale peut être surmontée avec un capteur à ultrasons ou l'amélioration de l'application Android en ajoutant une section pour donner ces

valeurs : la surface (X, Y) et la distance, rendant le système adaptable à des surfaces plus grandes. En militaire, une communication RF et une portée accrue sont essentielles avec l'implémentation d'algos pour la sécurité. À l'avenir, une caméra pour retour visuel et une intégration IoT (via MQTT) permettraient des usages avancés (télémédecine, supervision industrielle), transformant le système en une plateforme modulaire polyvalente.

III.6 Optimisations possibles

Dans une perspective d'amélioration continue, plusieurs axes d'optimisation peuvent être envisagés afin d'augmenter la performance, la précision et la polyvalence du système de projection laser. Ces améliorations concernent aussi bien les aspects matériels que logiciels, ainsi que les technologies de communication utilisées.

Du point de vue matériel, l'intégration de capteurs complémentaires pourrait enrichir les fonctionnalités du système. Par exemple, un capteur à ultrasons permettrait de mesurer la distance entre le dispositif et la surface cible, afin d'ajuster dynamiquement les paramètres de visée ou la précision du positionnement. L'ajout d'une caméra embarquée, associée à un traitement d'image ou à une intelligence artificielle embarquée, permettrait quant à lui de suivre le point laser en temps réel et de corriger automatiquement la trajectoire, créant ainsi une boucle de rétroaction visuelle intelligente aussi pour la détection du centre (marquage du centre avec un point) pour la calibration automatique et autres fonctionnalités. Pour réduire la taille et optimiser le système, les drivers TB6600, encombrants, pourraient être remplacés par des drivers plus compacts (comme les A4988), et les moteurs KP4M2-203, sujets aux vibrations et décalages, pourraient être substitués par une marque plus stable (comme les moteurs NEMA 17 de Moons). Enfin, au lieu du STM32L476RG, un MCU plus petit (STM32H7 ou STM32N6) pourrait être utilisé pour miniaturiser le système sur un PCB, le rendre plus flexible, et faciliter son intégration dans divers objets tout en conservant des capacités de communication sans fil. Ces améliorations rendraient le système plus compact, fiable, et polyvalent pour une commercialisation à grande échelle.

Sur le plan logiciel, le système pourrait évoluer vers l'intégration de modules d'intelligence artificielle permettant d'analyser les trajectoires, de prédire les mouvements ou de reconnaître des formes. Une telle capacité offrirait de nouvelles perspectives d'utilisation, notamment dans des domaines exigeants tels que la chirurgie assistée, le ciblage militaire ou encore la reproduction artistique automatisée.

L'application mobile elle-même peut faire l'objet d'améliorations, afin d'offrir plus de flexibilité et de personnalisation selon les besoins. On peut envisager l'ajout de profils d'utilisation prédéfinis (médical, artistique, pédagogique, etc.), la possibilité d'enregistrer et de rejouer des trajectoires, l'affichage en temps réel du mouvement du laser, ou encore l'intégration de commandes gestuelles, de boutons de réglages fins.

Enfin, un changement stratégique pourrait consister à remplacer la connexion Bluetooth classique par une communication Wi-Fi ou RF en impliquant des algorithmes de sécurité pour la protection, offrant ainsi une portée étendue, un débit plus élevé et une meilleure intégration dans les réseaux locaux. Cela permettrait également un contrôle du système via des interfaces web ou à distance, élargissant considérablement les scénarios d'utilisation dans des environnements professionnels, industriels ou éducatifs.

III.7 Conclusion

L'évaluation globale du système de projection laser a permis de mettre en évidence ses points forts ainsi que les limites actuelles à surmonter. Les tests réalisés ont confirmé la fiabilité de la communication Bluetooth, la cohérence fonctionnelle de l'architecture mise en place, ainsi que la réception correcte des coordonnées transmises par l'application mobile. Cependant, des améliorations restent nécessaires pour accroître la précision et la fluidité du contrôle, notamment en réduisant les vibrations des moteurs pas à pas et en affinant la gestion des déplacements.

La comparaison avec les objectifs initiaux montre que les fondements du système ont bien été atteints : contrôle du faisceau laser par glissement tactile, transmission efficace des coordonnées, et fonctionnement globalement stable. Toutefois, certaines limitations techniques comme le manque de fluidité ou les décalages au démarrage suggèrent l'importance d'une future phase d'optimisation.

En explorant les perspectives d'évolution, ce système présente un fort potentiel d'adaptation à des contextes variés tels que la médecine, le domaine militaire ou encore l'éducation et les arts. Des fonctionnalités avancées comme la calibration automatique, l'intégration de capteurs ou de caméras, et l'utilisation de réseaux Wi-Fi ou d'algorithmes intelligents ouvrent la voie à un système plus autonome, précis et polyvalent. Ces évolutions permettront de renforcer considérablement l'efficacité et la pertinence du dispositif dans des scénarios d'usage concret.

Chapitre 4

StartUP

IV.1 Introduction

Dans un monde de plus en plus tourné vers l'automatisation, la précision et la connectivité, les systèmes embarqués intelligents connaissent une évolution rapide. C'est dans ce contexte technologique dynamique que s'inscrit notre projet : la conception d'un système de projection contrôlé pour des applications IoT, conçu pour répondre à des besoins précis dans divers domaines tels que le médical, le militaire, l'industrie, ou encore l'éducation.

Notre ambition dépasse le simple cadre académique : nous visons la transformation d'un prototype fonctionnel en un produit commercialisable, modulable selon les besoins de plusieurs secteurs stratégiques comme la médecine, l'industrie, l'éducation, le sport ou encore la défense.

Ce chapitre vous présente l'idée centrale du projet, le problème identifié, la solution apportée, ainsi que les valeurs et les ambitions de notre startup. Il pose les bases de notre vision technique et commerciale, en mettant en avant l'innovation, la modularité et l'évolutivité de notre système.

IV.2 Premier axe : Présentation du Projet

IV.2.1 Problème constaté

De nos jours, de nombreux domaines tels que le médical, le militaire, l'industrie ou encore l'éducation nécessitent des systèmes de pointage ou de projection précis, flexibles et faciles à contrôler à distance. Cependant, les solutions existantes sont souvent limitées par leur complexité d'utilisation, leur coût élevé, ou leur manque de mobilité. En effet, peu de systèmes permettent un contrôle intuitif via smartphone tout en garantissant une exécution en temps réel, avec une grande précision et une facilité d'intégration dans divers environnements.

IV.2.2 Solution proposée

La solution que nous proposons est un système embarqué de projection laser intelligent, contrôlé via smartphone, offrant un pointage précis, interactif et mobile. Il repose sur une architecture matérielle et logicielle modulaire et évolutive, structurée autour des éléments suivants :

- ❖ **Un microcontrôleur STM32 (Séries H7 ou N6) :** Puissant et optimisé pour les applications temps réel, ce microcontrôleur assure la coordination des différentes fonctionnalités du système : traitement des coordonnées, commande des moteurs pas à pas, communication sans fil, et gestion des entrées/sorties.
- ❖ **Deux moteurs pas à pas NEMA17 couplés à des drivers A4988 :** Ce couple moteur-driver permet un positionnement angulaire ultraprécis sur deux axes (X et Y). La commande en micro-pas via les A4988 garantit une fluidité dans les déplacements, avec une précision adaptée aux applications sensibles.
- ❖ **Un module de communication sans fil (Bluetooth) :** Le système intègre un module Bluetooth pour une communication simple et fiable avec un smartphone. Une évolution vers des technologies plus avancées comme le Wi-Fi, LoRa ou RF est prévue dans les prochaines versions pour augmenter la portée, la rapidité ou la sécurité des échanges.
- ❖ **Une application Android intuitive, développée sous Android Studio :** Elle permet à l'utilisateur de contrôler le système de manière fluide et interactive. Le mouvement du doigt sur l'écran génère des coordonnées (X, Y), transmises instantanément au microcontrôleur via Bluetooth avec une possibilité d'améliorer en ajoutant un joystick et contrôle de vitesse des moteurs pour plus de précision et de liberté de contrôle et une section pour saisir les dimensions de la surface.
- ❖ **Un design compact et optimisé :** L'architecture physique du système repose sur une carte PCB personnalisée assurant l'intégration des composants électroniques, ainsi qu'un boîtier imprimé en 3D, offrant une solution esthétique, légère et facilement déployable.

IV.2.3 Les Valeurs proposées

➤ Accessibilité technologique et économique

Contrairement aux systèmes industriels traditionnels souvent coûteux et complexes, notre dispositif repose sur des composants simples et abordables. Cette architecture réduit considérablement les coûts de fabrication, rendant la technologie accessible à un plus large

public, y compris les établissements de santé, les centres de formation, et les petites structures industrielles.

➤ **Précision et fiabilité**

Le système assure un positionnement précis du faisceau laser grâce à l'utilisation de moteurs pas à pas haute résolution, à une gestion en temps réel via FreeRTOS, et à une calibration logicielle des axes X et Y. Cette combinaison garantit un contrôle fluide et fiable du point de projection.

➤ **Simplicité d'utilisation**

Une application Android simple et intuitive, accessible à tous :

- Interface tactile permettant de pointer n'importe quelle zone à viser.
- Réglages avancés pour les utilisateurs experts (ajustement manuel, paramètres de vitesse, etc.).
- Pas de formation spécifique nécessaire, ce qui favorise son adoption dans différents secteurs.

➤ **Modularité et personnalisation**

Grâce à sa conception modulaire, le système peut être facilement adapté à différents contextes d'utilisation. En médecine physique et rééducation, il permet de guider les mouvements du patient à l'aide de trajectoires lumineuses précises, optimisant ainsi l'efficacité des exercices. Dans le secteur militaire, il peut servir à la désignation de cibles ou à la simulation d'entraînements, où la précision et la réactivité sont primordiales. En environnement industriel, il facilite le marquage visuel de points d'assemblage ou de contrôle, contribuant à améliorer les processus de fabrication, d'inspection ou de maintenance.

➤ **Évolutivité technique**

Le projet est pensé pour intégrer facilement de nouvelles fonctionnalités :

- Caméra + IA pour la calibration automatique et la reconnaissance d'objets.

- Capteur ultrason pour détecter la distance à la surface et adapter les calculs d'angles.
- Passage progressif du Bluetooth au Wi-Fi ou LoRa ou RF pour une communication plus robuste et étendue.

IV.2.4 Equipe de travail

Le projet a été porté par deux étudiants spécialisés en électronique des systèmes embarqués, réunissant des compétences complémentaires en matériel, logiciel et intégration système.

- Étudiant 01 : Fort d'une formation approfondie en électronique embarquée, il a pris en charge les aspects matériels du projet. Cela comprend la conception et le développement des circuits électroniques, la programmation du microcontrôleur STM32L476RG, ainsi que la gestion des moteurs pas à pas KP4M2-203. Il a également supervisé la modélisation 3D du boîtier sous SolidWorks et son impression, assurant une précision de 90 % dans le positionnement laser conformément aux spécifications du système.
- Étudiant 02 : Issu du même domaine de formation, il s'est concentré sur la partie logicielle du projet. Il a développé l'application Android, mis en place la communication Bluetooth avec le module HC-05, et optimisé le traitement des coordonnées X/Y pour garantir un télé-guidage fluide avec une réactivité comprise entre 100 et 200 ms. Il a également travaillé sur l'interface utilisateur pour garantir une interaction intuitive.

Les deux membres de l'équipe ont collaboré étroitement sur les tâches transversales, telles que :

- La gestion des ressources (composants, délais, coûts),
- La planification du projet et des étapes de validation,
- Le marketing du produit (création de la marque, ciblage des secteurs clés),
- Et les études de marché dans les domaines médical, industriel et militaire pour définir des axes d'amélioration ou de diversification.

Enfin, dans une optique de développement futur, l'équipe envisage d'ouvrir le projet à d'autres collaborateurs ou ingénieurs, notamment dans les domaines du traitement d'image, de l'intelligence artificielle, ou de la conception produit, afin de faire évoluer notre projet vers une solution industrielle complète.

IV.2.5 Objectifs du projet

IV.2.5.1 Objectif global

Créer un système embarqué de projection contrôlé via smartphone, compact, précis et modulaire, capable de répondre aux besoins spécifiques de différents secteurs professionnels tels que le médical, l'industrie, ou le militaire.

IV.2.5.2 Objectifs Techniques

- Développer un système embarqué basé sur un microcontrôleur STM32 H7-Series / STM32 N6-Séries.
- Utiliser des moteurs pas à pas NEMA17 avec drivers A4988 pour un positionnement ultra-précis.
- Intégrer une carte PCB personnalisée et un boîtier imprimé en 3D pour une solution compacte et robuste.
- Garantir une exécution en temps réel grâce à l'utilisation de FreeRTOS.
- Prévoir une interface intuitive via une application Android développée sous Android Studio.

IV.2.5.3 Objectifs Commerciaux

- Lancer une version initiale du produit destinée aux petites entreprises industrielles et aux cabinets médicaux privés.
- Cibler progressivement les marchés nationaux puis internationaux.
- Développer une version "Pro" dotée de fonctionnalités avancées pour les clients exigeants (militaire, recherche, etc.).

IV.2.5.4 Objectifs à court, moyen et long terme

Tableau IV.1

Période	Objectifs clés
Court terme (année N)	Finaliser le prototype fonctionnel, réaliser des tests terrain dans des environnements médicaux et industriels, et valider la précision du système.
Moyen terme (N+1)	Industrialiser le produit, optimiser sa taille et son coût, et sortir une version commercialisable. Lancement de la version "Pro."
Long terme (N+2 et au-delà)	Étendre le marché à l'international, intégrer une reconnaissance visuelle avancée, et collaborer avec des acteurs majeurs dans les domaines médical et militaire.

IV.2.6 Calendrier de réalisation du projet

Tableau IV.2

Étape	Activités	Période
1. Études préliminaires et conception	- Début de l'idée du projet - Analyse du besoin et choix des composants	Août 2024 → Janvier 2025
2. Développement du matériel	- Réception des composants via le magasin du département	Janvier 2025
3. Développement logiciel	- Tests communication Bluetooth (HC-05)	Février 2025
	- Conception du boîtier	Mai → Juillet(prévu)
	- Développement application Android	Octobre → Novembre 2024
	- Programmation UART STM32	Septembre 2024
	- Programmation moteur avec FreeRTOS	Février 2025
4. Intégration matériel-logiciel	- Intégration UART – STM32 – Application	Mars 2025
5. Validation et tests	- Lien coordonnées X/Y vers moteur	Mars → Mai 2025
	- Tests unitaires (Bluetooth, moteur, etc.)	Avril 2025
	- Tests d'intégration système complet	Mai → Juin 2025
	- Test sur cible réelle (tableau 2m x 1m à 1m de distance)	Juin 2025
6. Améliorations et optimisations	- Correction des vibrations	En cours (Juin 2025)
	- Ajout futur de l'IA, calibration, capteurs (ultrason, etc.)	Prévu dans 3 ans (2028)
7. Finalisation et documentation	- Rédaction du rapport	Début Mars 2025
	- Manuel utilisateur + fiches techniques	Fin Juin 2025 (prévu)

IV.3 Deuxième axe : Aspects Innovant

IV.3.1 Nature de l'innovation

Notre projet se positionne à l'intersection de plusieurs domaines d'innovation technologique, en intégrant des solutions modernes issues de l'électronique embarquée, des interfaces mobiles et du traitement en temps réel.

- ❖ **Communication sans fil et mobilité** : Dès la phase de conception, nous avons misé sur une communication sans fil via Bluetooth, permettant un contrôle à distance du système depuis un smartphone. Cette approche élimine les contraintes physiques liées au câblage traditionnel, favorise la portabilité du dispositif, et permet une intégration aisée dans des contextes variés, du bloc opératoire à un environnement industriel ou militaire.
- ❖ **Contrôle intuitif via smartphone** : L'innovation réside également dans le pilotage tactile direct à partir d'une application Android. Grâce à une interface simple et ergonomique, l'utilisateur peut guider en temps réel le point sur une surface, en glissant simplement son doigt. Ce mode de contrôle rend le système accessible au grand public, tout en répondant aux exigences de précision de professionnels de la santé, de la formation ou de la défense.
- ❖ **Traitement en temps réel avec FreeRTOS** : Le cœur du système repose sur le système d'exploitation FreeRTOS, qui permet de gérer efficacement les tâches critiques : la réception des données via UART, leur décodage, et le pilotage coordonné des moteurs pas à pas. Cette architecture assure une réactivité élevée, une exécution précise des commandes, et une robustesse face aux sollicitations fréquentes.

IV.3.2 Domaines d'innovation

Notre projet croise plusieurs axes technologiques innovants, faisant appel à la mécatronique, aux systèmes embarqués, aux interfaces homme-machine, et ouvrant la voie à l'intégration de l'intelligence artificielle.

- **Mécatronique** : Le cœur du système repose sur une mécanique de précision : deux moteurs pas à pas orientent selon les coordonnées X et Y définies par l'utilisateur. Grâce à des algorithmes de conversion optimisés, les coordonnées tactiles sont traduites en mouvements angulaires précis, permettant un positionnement laser millimétrique. Ce

fonctionnement est particulièrement adapté à des domaines où la précision est essentielle : rééducation médicale, marquage industriel, désignation militaire ou entraînement sportif.

- **Systèmes embarqués** : L'intelligence du système est assurée par une carte STM32, utilisant FreeRTOS pour une gestion rigoureuse du temps réel. Cela permet une exécution fiable des tâches critiques, telles que la réception de données Bluetooth et le pilotage moteur, avec une réactivité acceptable. Cette structure embarquée garantit la portabilité, l'autonomie et la fiabilité du dispositif dans des contextes contraints ou mobiles.
- **Interfaces Homme-Machine (IHM)** : L'utilisateur contrôle les moteurs via une application Android intuitive, transformant l'écran tactile du smartphone en surface de guidage. Cette interface rend l'expérience simple, fluide et accessible à un public non technique, tout en conservant un haut niveau de précision. Elle ouvre la voie à des usages interactifs dans l'enseignement, l'art, ou les démonstrations scientifiques.
- **Applications mobiles synchronisées** : Grâce à la communication Bluetooth sans fil, l'application mobile est synchronisée en temps réel avec le système embarqué. L'utilisateur obtient ainsi un pilotage fluide, sans contraintes de câbles, avec une grande liberté de déplacement et d'adaptation dans l'espace.
- **Intelligence Artificielle (futur développement)** : Nous prévoyons l'ajout de fonctions intelligentes, telles que :
 - Auto-calibrage au démarrage par détection du centre de la surface via une caméra.
 - Détection et suivi automatique d'objets (ex : pointer un élément en mouvement ou une zone d'intérêt).
 - Analyse adaptative du comportement utilisateur pour ajuster automatiquement les paramètres du système.

- Ces extensions permettront de faire évoluer le système vers une plateforme intelligente, autonome et adaptative, répondant aux exigences croissantes des secteurs médical, militaire, éducatif ou industriel.

IV.4 Troisième axe : Analyse stratégique du marché

IV.4.1 Le segment du marché

Le système s'inscrit dans le marché en pleine croissance des dispositifs intelligents de projection et de pointage, combinant précision, interactivité et mobilité. Ce marché est principalement orienté B2B (Business to Business), visant des structures qui nécessitent un outil technologique avancé pour guider, désigner ou marquer des zones avec précision dans des contextes professionnels.

Les segments cibles incluent :

- **Secteur médical (hôpitaux, cliniques de rééducation) :** Utilisation du système pour le guidage chirurgical, le suivi de mouvements en kinésithérapie, ou encore l'assistance à la formation médicale via projection interactive.
- **Secteur militaire (forces armées, centres d'entraînement) :** Le système peut être exploité pour la désignation de cibles, la simulation de scénarios tactiques, ou le guidage de gestes précis à distance, en remplacement de pointeurs manuels ou filaires.
- **Secteur industriel (chaînes de production, maintenance, contrôle qualité) :** Dans l'industrie, il peut servir au marquage laser précis, à l'assistance visuelle à la maintenance, ou encore au positionnement automatique d'éléments sur une ligne de fabrication.

IV.4.2 Intensité de la concurrence

IV.4.2.1 Concurrence actuelle

Actuellement, peu de produits similaires sont disponibles sur le marché grand public. La plupart des solutions existantes appartiennent à deux catégories :

- Solutions industrielles coûteuses : systèmes professionnels utilisés dans les usines ou laboratoires (ex. : lasers robotisés).

- Projets académiques ou militaires : prototypes non commercialisables ou réservés à des marchés fermés.

Cela signifie que notre système représente une opportunité rare : une solution innovante, accessible, et fonctionnelle, qui peut combler un vide entre ces deux extrêmes.

IV.4.2.2 Avantages concurrentiels

- **Coût réduit** : Grâce à l'utilisation de composants standard (STM32, NEMA17, A4988), nous proposons une solution beaucoup plus abordable que les équipements industriels ou militaires.
- **Modularité** : Notre système peut être adapté à différents contextes grâce à sa programmation flexible et son design ouvert.
- **Contrôle intuitif** : L'utilisation d'un smartphone comme interface rend le système très simple à utiliser.
- **Évolutivité** : Possibilité d'intégrer Wi-Fi, LoRa, caméra, capteur ultrason, IA... ce qui permet de rester compétitif à long terme.

IV.4.3 Analyse PESTEL

Tableau IV.3

Facteur	Impact
Politique	En Algérie, soutien accru aux startups technologiques, facilitant l'accès au marché.
Économique	Besoin croissant de technologies accessibles dans les PME et cliniques.
Social	Demande accrue de solutions intuitives et connectées dans tous les secteurs.
Technologique	Progrès constants en matière de microcontrôleurs, communication sans fil et IA embarquée.
Environnemental	Utilisation de composants recyclables et faible consommation électrique.
Juridique	Réglementations strictes dans certains domaines (médical, militaire) → veille nécessaire.

IV.4.4 Analyse SWOT

Tableau IV.4

Opportunités	Menaces
Expansion internationale	Concurrence potentielle venue de grands groupes
Intégration IA ; vision par ordinateur	Barrières réglementaires dans certains secteurs (ex. : médical)
Marché de niche en forte demande	Volatilité des prix des composants électroniques
Partenariats universitaires/militaires	Déploiement lent dû à la phase de miniaturisation
Accompagnement stratégique de l'incubateur pour le développement et les partenariats	Forces
Faiblesses	Contrôle tactile intuitif
Dépendance à la surface de projection plane	Coût abordable
Positionnement initial limité au marché local	Évolutivité technologique
Besoin de partenariats pour la validation métier	Soutien matériel et formatif assuré par l'incubateur
Phase de test et de calibration encore manuelle	Précision élevée

IV.4.4.1 Analyse croisée de la matrice SWOT

L'analyse croisée de la matrice SWOT permet de formuler des stratégies concrètes :

➤ **Stratégie FO (Forces + Opportunités) :**

- Exploiter la modularité et l'évolutivité pour entrer dans le marché médical via des partenariats avec des cliniques ou laboratoires locaux.

➤ **Stratégie FA (Forces + Faiblesses) :**

- Utiliser le faible coût du système pour compenser sa dépendance à la surface plane, en ciblant les utilisateurs disposant d'environnements adaptés.

➤ **Stratégie DO (Défauts + Opportunités) :**

- Collaborer avec des développeurs IA et vision par ordinateur pour pallier la phase manuelle de calibration.

➤ **Stratégie DF (Défauts + Menaces) :**

- Accélérer la validation réglementaire dès la phase initiale pour anticiper les obstacles juridiques dans les secteurs sensibles.

IV.4.5 Stratégie Marketing

Afin de promouvoir efficacement notre système contrôlé via smartphone, nous adoptons une stratégie marketing proactive et ciblée, axée sur la démonstration en contexte réel, la communication digitale, et les partenariats stratégiques. Voici les actions clés :

➤ **Présentations dans les salons technologiques :**

Participation à des événements locaux et nationaux (ex. : Alger Tech Days, Startup Weekend) pour augmenter la visibilité du projet et attirer l'attention des investisseurs et clients professionnels.

➤ **Démonstration dans les facultés et laboratoires :**

Organisation de démonstrations dans les universités, centres de recherche et hôpitaux pour valider le produit auprès d'utilisateurs experts et susciter des collaborations académiques.

➤ **Réseaux sociaux et vidéos du système en action :**

Utilisation de plateformes comme LinkedIn, Instagram et YouTube pour publier des vidéos courtes montrant les fonctionnalités du système en temps réel, afin d'attirer à la fois les professionnels et le grand public et un site web vitrine simple mais efficace, avec une section démonstration, des explications techniques, une page de contact, et une documentation produit.

Tableau IV.5

SONCASE / CAP	Caractéristiques	Avantages	Preuves
Sécurité	Système embarqué avec FreeRTOS (temps réel)	Réduction des risques d'erreurs critiques lors des interventions ou opérations.	Tests validés dans des environnements médicaux/militaires.
Orgueil	Contrôle via smartphone avec interface tactile	Permet aux utilisateurs de se distinguer en adoptant une technologie innovante.	Démonstration réussie lors de salons ou démonstrations locales.
Nouveauté	Miniaturisation (PCB personnalisé + boîtier 3D)	Accès à une solution unique et techniquement avancée.	Première version du prototype fonctionnelle et modulaire.
Confort	Application Android intuitive et sans configuration complexe	Simplification des tâches techniques pour l'utilisateur.	Interface testée avec succès, facile à apprendre.
Argent	Coût réduit grâce à l'open-hardware	Économies réalisées par les clients par rapport aux solutions existantes.	Comparaison des prix avec des systèmes similaires (ex. : 50 % moins cher).
Sympathie	Design compact et intégration facile dans des environnements variés	Rend les tâches quotidiennes plus simples et rapides pour les utilisateurs.	Retours positifs de tests terrain avec des ingénieurs ou chirurgiens.
Écologie	Utilisation de composants recyclables et faible consommation énergétique	Réduction de l'impact environnemental grâce à un système éco-conçu.	Certification possible ISO 14001 ou partenariats avec des acteurs verts.

IV.5 Quatrième axe : Plan de production de l'organisation

IV.5.1 Le processus de production

Le processus de production de notre solution repose sur une approche modulaire et optimisée, conçue pour minimiser l'encombrement et maximiser la performance.

Voici les principales étapes:

- **Conception du MCU et PCB :** Nous utilisons un microcontrôleur STM32 H7-Series pour sa puissance et son efficacité. Un PCB personnalisé est développé pour intégrer le MCU, le module HC-05, et les connexions nécessaires pour les moteurs et drivers. Cette étape permet de réduire l'utilisation de fils et d'améliorer la fiabilité du système.
- **Intégration des composants :** Les moteurs pas à pas NEMA17, choisis pour leur précision, leur faible chauffe et leur compacité, sont couplés avec des drivers A4988 pour un contrôle optimal. Ces composants sont assemblés sur le PCB.
- **Développement logiciel :** Le firmware est optimisé pour tirer parti des capacités du MCU H7-Series et garantir un traitement en temps réel. L'application Android est également mise à jour pour interagir avec le nouveau design compact.
- **Fabrication du boîtier 3D :** Un boîtier 3D est conçu pour assembler tous les composants dans un format compact et portable. Ce boîtier est réalisé via impression 3D pour assurer une personnalisation et une durabilité maximales.
- **Tests et validation :** Une fois le produit assemblé, nous effectuons des tests rigoureux pour vérifier la précision, la fiabilité, et la compatibilité avec les applications ciblées (médical, industriel, militaire).

IV.5.2 L'approvisionnement

L'approvisionnement des composants est crucial pour garantir la qualité et la miniaturisation de notre produit. Voici les éléments essentiels :

- **Microcontrôleur H7-Series :** Nous travaillons avec des fournisseurs certifiés pour obtenir ce MCU hautement performant.
- **Moteurs NEMA17 et Drivers A4988 :** Ces composants sont sélectionnés pour leur précision et leur compacité. Nous collaborons avec des distributeurs spécialisés pour garantir leur disponibilité.
- **Module HC-05 et autres composants électroniques :** Ces éléments sont intégrés dans le PCB personnalisé pour réduire l'encombrement et simplifier l'assemblage.

- **Matériaux pour le boîtier 3D** : Nous utilisons des matériaux légers et robustes (par exemple, PLA ou ABS) pour imprimer le boîtier 3D.

Pour minimiser les coûts et assurer une chaîne d'approvisionnement fluide, nous explorons des alternatives locales et établissons des relations à long terme avec nos fournisseurs.

IV.5.3 La main d'œuvre

La réalisation de ce projet nécessite une équipe compétente et multidisciplinaire, capable de gérer les aspects techniques et logistiques de la miniaturisation. Voici les rôles spécifiques :

- **Ingénieur en conception PCB** : Responsable de la création du PCB personnalisé qui intègre le MCU H7-Series, le module HC-05, et les connexions pour les moteurs et drivers.
- **Développeur embarqué** : En charge de l'optimisation du firmware pour tirer parti des capacités du MCU H7-Séries et garantir un fonctionnement en temps réel.
- **Concepteur 3D** : Responsable de la conception et de l'impression 3D du boîtier pour assembler tous les composants dans un format compact.
- **Technicien en mécatronique** : Assure l'assemblage des moteurs NEMA17, des drivers A4988, et des autres composants matériels.
- **Développeur mobile** : met à jour l'application Android pour interagir avec le nouveau design optimisé.

Nous veillerons également à former notre équipe sur les nouvelles technologies et outils utilisés dans ce processus.

IV.5.4 Les principaux partenaires

Pour réussir la version optimisée de notre projet, nous collaborons avec plusieurs partenaires stratégiques :

- **Fournisseurs de composants électroniques** : Pour obtenir des MCU H7-Séries, des moteurs NEMA17, des drivers A4988, et d'autres composants nécessaires.
- **Laboratoires de test** : Pour valider la performance et la fiabilité du système après l'assemblage.
- **Institutions dans les secteurs ciblés** : Nous travaillons avec des hôpitaux, des petites entreprises industrielles, et des acteurs militaires pour tester et valider notre solution.
- **Experts en impression 3D** : Pour concevoir et produire le boîtier 3D qui assemble tous les composants dans un format compact.

À l'avenir, nous envisageons également de nouer des partenariats avec des entreprises spécialisées dans les communications sans fil (Wi-Fi / LoRa / RF) pour remplacer le module HC-05 et renforcer les capacités de communication.

IV.6 Cinquième axe : Plan financier

Tableau IV.6

POSTES DE BILAN			
	Année 1 (DZD)	Année 2 (DZD)	Année 3 (DZD)
ACTIF IMMOBILISES			
Immobilisations (Brut)	1 830 000,00 DA	2 500 000,00 DA	3 200 000,00 DA
Amortissements	45 750,00 DA	120 000,00 DA	200 000,00 DA
Immobilisations (Net)	1 784 250,00 DA	2 380 000,00 DA	3 000 000,00 DA
TOTAL ACTIFS IMMOBILISES	1 784 250,00 DA	2 380 000,00 DA	3 000 000,00 DA
ACTIFS CIRCULANTS			
Stocks	300 000,00 DA	600 000,00 DA	900 000,00 DA
Créances clients	299 857,00 DA	400 000,00 DA	600 000,00 DA
Créances TVA	- DA	- DA	- DA
Trésorerie	3 938 453,00 DA	1 200 000,00 DA	2 000 000,00 DA
TOTAL ACTIFS CIRCULANTS	4 538 309,00 DA	2 200 000,00 DA	3 500 000,00 DA
TOTAL ACTIF	6 322 559,00 DA	4 580 000,00 DA	6 500 000,00 DA
PASSIF			
CAPITAUX PROPRES			
Capital	500 000,00 DA	500 000,00 DA	500 000,00 DA
Comptes courants	500 000,00 DA	500 000,00 DA	500 000,00 DA
Réserves et Résultats	1 324 460,00 DA	2 000 000,00 DA	3 500 000,00 DA
TOTAL CAPITAUX PROPRES	2 324 460,00 DA	3 000 000,00 DA	4 500 000,00 DA
DETTES			
Prêts et avances	240 000,00 DA	500 000,00 DA	800 000,00 DA
Dettes fournisseurs	300 000,00 DA	700 000,00 DA	1 000 000,00 DA
Dettes TVA	- DA	- DA	- DA
Dettes fiscales	651 747,00 DA	800 000,00 DA	1 200 000,00 DA
TOTAL DETTES	1 251 747,00 DA	2 000 000,00 DA	3 000 000,00 DA
TOTAL PASSIF	3 576 207,00 DA	5 000 000,00 DA	7 500 000,00 DA

Tableau IV.7

	JANV	FEVR	MARS	AVRI	MAI	JUIN	JUIL	AOÛT	SEPT	OCT	NOV	DEC
LIGNE DE TRESORERIE ANNEE N												
DÉCAISSEMENTS												
FRAIS DE CONSTITUTION SOCIETE												
IMMOBILISATIONS	1 830 000,00											
IMPOTS ET TAXES												
LOYER VEHICULE CREDIT BAIL	4,000,00	4,000,00	4,000,00	4,000,00	4,000,00	4,000,00	4,000,00	4,000,00	4,000,00	4,000,00	4,000,00	4,000,00
ESSENCE/MOIS	5,000,00	5,000,00	5,000,00	5,000,00	5,000,00	5,000,00	5,000,00	5,000,00	5,000,00	5,000,00	5,000,00	5,000,00
DIVERS	10,000,00	10,000,00	10,000,00	10,000,00	10,000,00	10,000,00	10,000,00	10,000,00	10,000,00	10,000,00	10,000,00	10,000,00
LOYER	30,000,00	30,000,00	30,000,00	30,000,00	30,000,00	30,000,00	30,000,00	30,000,00	30,000,00	30,000,00	30,000,00	30,000,00
EDF EAU	2,000,00	2,000,00	2,000,00	2,000,00	2,000,00	2,000,00	2,000,00	2,000,00	2,000,00	2,000,00	2,000,00	2,000,00
TELEPHONE	1,000,00	1,000,00	1,000,00	1,000,00	1,000,00	1,000,00	1,000,00	1,000,00	1,000,00	1,000,00	1,000,00	1,000,00
COMPTABLE	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ASSURANCES	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
COTISATIONS DIVERSES	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MARKETING	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SALAIRES + CHARGES	43,500,00	43,500,00	43,500,00	43,500,00	43,500,00	43,500,00	43,500,00	43,500,00	43,500,00	43,500,00	43,500,00	43,500,00
FOURNITURES MATIERES PREMIERE	300,000,00	300,000,00	300,000,00	300,000,00	300,000,00	300,000,00	300,000,00	300,000,00	300,000,00	300,000,00	300,000,00	300,000,00
REMBOURSEMENT CREDIT	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total Décaissements	395,500,00	395,500,00	395,500,00	395,500,00	395,500,00	395,500,00	395,500,00	395,500,00	395,500,00	395,500,00	395,500,00	395,650,00
ENCAISSEMENTS												
APPORT												
PRÊT	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CLIENTS	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00
Total Encaissements	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00
ENCAISSEMENTS												
APPORT												
PRÊT	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CLIENTS	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00
Total Encaissements	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00	700,000,00

Tableau IV.8

LIGNE DE TRESORERIE ANNEE N+1												
	JANV	FEVR	MARS	AVRI	MAI	JUIN	JUIL	AOÛT	SEPT	OCT	NOV	DEC
DÉCAISSEMENTS												
IMPÔTS ET TAXES												217 650
LOYER VEHICULE CREDIT BAIL	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000
ESSENCE/MOIS	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000
DIVERS	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
LOYER	30 000	30 000	30 000	30 000	30 000	30 000	30 000	30 000	30 000	30 000	30 000	30 000
EDF EAU	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000
TELEPHONE	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000
COMPTABLE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ASSURANCES	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
COTISATIONS DIVERSES	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MARKETING	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SALAIRES + CHARGES	43 500	43 500	43 500	43 500	43 500	43 500	43 500	43 500	43 500	43 500	43 500	43 500
FOURNITURES MATIERES PREMIERE	300 000	300 000	300 000	300 000	300 000	450 000	450 000	450 000	450 000	450 000	450 000	450 000
REMBOURSEMENT CREDIT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total Décaissements	395 500	395 500	395 500	395 500	395 500	545 500	545 500	545 500	545 500	545 500	545 500	763 150
ENCAISSEMENTS												
REPORT TRÉSORERIE N	1 603 850											
CLIENTS	600 000	600 000	600 000	600 000	600 000	600 000	600 000	600 000	900 000	900 000	900 000	900 000
Total Encaissements	2 203 850	600 000	600 000	600 000	600 000	600 000	600 000	600 000	900 000	900 000	900 000	900 000
ÉCARTS MENSUELS ET TRÉSORERIE FIN DU MOIS												
Écart Mensuel	1 808 350	204 500	204 500	204 500	204 500	-145 500	-145 500	-145 500	354 500	354 500	354 500	136 850
Trésorerie Fin du Mois	1 808 350	2 012 850	2 217 350	2 421 850	2 626 350	2 480 850	2 335 350	2 190 850	2 545 350	2 900 850	3 255 350	3 392 200

Tableau IV.9

LIGNE DE TRÉSORERIE ANNÉE N+2												
	JANV	FEVR	MARS	AVRI	MAI	JUIN	JUIL	AOÛT	SEPT	OCT	NOV	DEC
Décaissements												
IMPÔTS ET TAXES												360 150
LOYER VEHICULE CREDIT BAIL	4 000,00 DA	4 000,00 DA	4 000,00 DA	4 000,00 DA	4 000,00 DA	4 000,00 DA	4 000,00 DA	4 000,00 DA	4 000,00 DA	4 000,00 DA	4 000,00 DA	4 000,00 DA
ESSENCE/MOIS	5 000,00 DA	5 000,00 DA	5 000,00 DA	5 000,00 DA	5 000,00 DA	5 000,00 DA	5 000,00 DA	5 000,00 DA	5 000,00 DA	5 000,00 DA	5 000,00 DA	5 000,00 DA
DIVERS	10 000,00 DA	10 000,00 DA	10 000,00 DA	10 000,00 DA	10 000,00 DA	10 000,00 DA	10 000,00 DA	10 000,00 DA	10 000,00 DA	10 000,00 DA	10 000,00 DA	10 000,00 DA
LOYER	30 000,00 DA	30 000,00 DA	30 000,00 DA	30 000,00 DA	30 000,00 DA	30 000,00 DA	30 000,00 DA	30 000,00 DA	30 000,00 DA	30 000,00 DA	30 000,00 DA	30 000,00 DA
EDF EAU	2 000,00 DA	2 000,00 DA	2 000,00 DA	2 000,00 DA	2 000,00 DA	2 000,00 DA	2 000,00 DA	2 000,00 DA	2 000,00 DA	2 000,00 DA	2 000,00 DA	2 000,00 DA
TELEPHONE	1 000,00 DA	1 000,00 DA	1 000,00 DA	1 000,00 DA	1 000,00 DA	1 000,00 DA	1 000,00 DA	1 000,00 DA	1 000,00 DA	1 000,00 DA	1 000,00 DA	1 000,00 DA
COMPTABLE	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA
ASSURANCES	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA
COTISATIONS DIVERSES	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA
MARKETING	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA
SALAIRES + CHARGES	43 500,00 DA	43 500,00 DA	43 500,00 DA	43 500,00 DA	43 500,00 DA	43 500,00 DA	43 500,00 DA	43 500,00 DA	43 500,00 DA	43 500,00 DA	43 500,00 DA	43 500,00 DA
FOURNITURES MATIERES PREMIERE	600 000,00 DA	600 000,00 DA	600 000,00 DA	600 000,00 DA	600 000,00 DA	600 000,00 DA	600 000,00 DA	600 000,00 DA	600 000,00 DA	600 000,00 DA	600 000,00 DA	600 000,00 DA
REMBOURSEMENT CREDIT	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA	- DA
Total Décaissements	695 500,00 DA	695 500,00 DA	695 500,00 DA	695 500,00 DA	695 500,00 DA	695 500,00 DA	695 500,00 DA	695 500,00 DA	695 500,00 DA	695 500,00 DA	695 500,00 DA	1 055 650,00 DA
ENCAISSEMENTS												
REPORT TRÉSORERIE N+1	3 938 453,00 DA											
CLIENTS	1 200 000,00 DA	1 200 000,00 DA	1 200 000,00 DA	1 200 000,00 DA	1 200 000,00 DA	1 200 000,00 DA	1 200 000,00 DA	1 200 000,00 DA	1 200 000,00 DA	1 200 000,00 DA	1 200 000,00 DA	1 200 000,00 DA
Total Encaissements	5 138 453,00 DA	1 200 000,00 DA	1 200 000,00 DA	1 200 000,00 DA	1 200 000,00 DA	1 200 000,00 DA	1 200 000,00 DA	1 200 000,00 DA	1 200 000,00 DA	1 200 000,00 DA	1 200 000,00 DA	1 200 000,00 DA
ÉCARTS MENSUELS ET TRÉSORERIE FIN DU MOIS												
Écart Mensuel	4 442 953,00 DA	504 500,00 DA	504 500,00 DA	504 500,00 DA	504 500,00 DA	504 500,00 DA	504 500,00 DA	504 500,00 DA	504 500,00 DA	504 500,00 DA	504 500,00 DA	144 350,00 DA
Trésorerie Fin du Mois	4 442 953,00 DA	4 947 453,00 DA	5 451 953,00 DA	5 956 453,00 DA	6 460 953,00 DA	6 965 453,00 DA	7 470 953,00 DA	7 975 453,00 DA	8 480 953,00 DA	8 985 453,00 DA	9 490 953,00 DA	8 796 394,00 DA

Tableau IV.10

COMPTE DE RESULTAT			
	N	N+1	N+2
Chiffre d'affaires (CA)	7 200 000,00 DA	8 700 000,00 DA	#####
Achats et charges de production	3 600 000,00 DA	4 350 000,00 DA	7 200 000,00 DA
Marge brute	3 600 000,00 DA	4 350 000,00 DA	7 200 000,00 DA
% Marge brute	50,00%	50,00%	50,00%
Charges externes	644 000,00 DA	624 000,00 DA	624 000,00 DA
Valeur ajoutée (VA)	295 600,00 DA	372 600,00 DA	657 600,00 DA
% VA/CA	4,10%	4,28%	4,57%
Impôts et taxes	651 747,00 DA	217 650,00 DA	360 150,00 DA
Subventions d'exploitation	- DA	- DA	- DA
Charges de personnel	522 000,00 DA	522 000,00 DA	522 000,00 DA
Excédent brut d'exploitation (EBI)	2 433 850,00 DA	2 986 350,00 DA	5 699 850,00 DA
% EBI/CA	33,80%	34,33%	39,54%
Dotations aux amortissements	45 750,00 DA	45 750,00 DA	45 750,00 DA
Résultat d'exploitation (REx)	1 976 350,00 DA	2 528 850,00 DA	5 236 194,00 DA
% REx/CA	27,45%	29,07%	36,36%
Charges financières	143,00 DA	156,00 DA	156,00 DA
Résultat courant	1 976 207,00 DA	2 528 694,00 DA	5 236 194,00 DA
% Résultat courant/CA	27,45%	29,07%	36,36%
Reports déficitaires	- DA	- DA	- DA
Impôts sur les sociétés (IS)	651 747,00 DA	835 909,00 DA	1 738 409,00 DA
Résultat Net (RN)	1 324 460,00 DA	1 692 784,00 DA	3 497 784,00 DA
% RN/CA	18,40%	19,46%	24,25%

IV.7 Sixième axe : Prototype expérimental

IV.7.1 Présentation du prototype réalisé

Le prototype développé est un système de projection commander à distance via une application mobile Android. Il repose sur une carte STM32L476RG, deux moteurs pas à pas Km4m2 203, des drivers TB6600, et un module Bluetooth HC-05 assurant la communication sans fil. Tous les composants électroniques sont intégrés dans un boîtier 3D conçu avec SolidWorks, spécifiquement modélisé pour accueillir l'ensemble de la structure. Le système est compact, transportable et pensé pour un usage pédagogique, médical ou industriel.

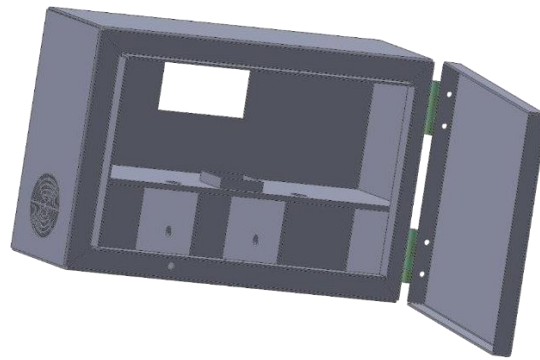
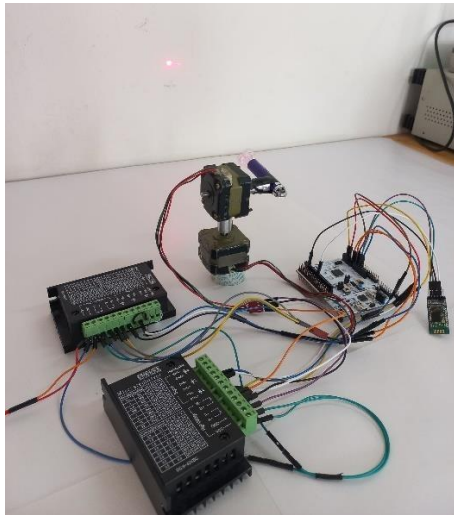


Figure IV.1 : Prototype réalisé

IV.7.2 Fonctionnalités actuellement testées

Le système a été progressivement testé et validé selon les fonctionnalités suivantes :

- **Contrôle des moteurs pas à pas** : Tests réalisés avec divers pas angulaires pour assurer un déplacement précis du point laser.
- **Communication Bluetooth** : Connexion stable avec l'application Android développée sur mesure, transmission de coordonnées X/Y en temps réel.
- **Interfaçage logiciel / matériel** : Lien entre les coordonnées envoyées par le smartphone et l'orientation du laser à travers la gestion des moteurs.
- **Interface utilisateur** : L'application permet un contrôle fluide via l'écran tactile, avec affichage des coordonnées et retour visuel direct.

IV.7.3 Résultats obtenus lors des essais

Les tests réalisés sur une surface cible de 2 m x 1 m à une distance d'environ 1 m ont permis de confirmer une précision d'environ 90%, avec une réactivité mesurée entre 100 et 200 ms selon les commandes.

Le système a démontré une stabilité fonctionnelle, notamment en ce qui concerne la gestion multitâche avec FreeRTOS. Les moteurs répondent sans latence significative, et les tests Bluetooth confirment une portée suffisante pour une utilisation en salle ou laboratoire.

- **Boîtier 3D**

Le boîtier, conçu sur SolidWorks, est prêt à être imprimé en 3D dès que l'imprimante du département sera disponible. Il comprend des emplacements adaptés pour la carte STM32, les drivers, les moteurs, le module Bluetooth, ainsi que des orifices pour les fixations mécaniques et aérations thermiques.

Tableau IV.11

BUSINESS MODEL CANVAS				
Key Partners	Key Activities	Value Propositions	Customer Relationships	Customer Segments
- Fournisseurs de composants - Fournisseurs de matériaux - Institutions académiques : - Création de PCB - Impression 3D - Tests - Améliorations - Hôpitaux - Cabines médicales - Base militaire	- Programmation - composants - Soudure - Création de PCB - Impression 3D - Tests - Améliorations - Matériel électronique - Logiciels - Compétences humaines	- Précision - Facilité d'utilisation - Téléguidage - Évolutivité	- Support technique - Tutoriels et documentation - Communauté d'utilisateurs - Mises à jour régulières	- Hôpitaux et cliniques privé - PME industrielles - Unités militaires - Universités et laboratoires - Entreprises de services techniques
	Key Resource s - Matériel électronique - Logiciels - Compétences humaines		Channels - Salons technologiques - Partenariats institutionnels - Réseaux sociaux - Distribution locale/nationale	
Cost Structure		Revenue Streams		
- Achats de composants - Fabrication - Développement logiciel - Tests et certifications - Marketing et ventes - Maintenance et support		- Ventes de produits finis - Abonnements logiciels - Services de maintenance - Partenariats commerciaux - Licences technologiques		

IV.8 Conclusion

Ce chapitre a permis de transformer notre projet technique en une vision entrepreneuriale claire et structurée. En identifiant les valeurs ajoutées, les secteurs d'application stratégiques, et en élaborant un calendrier de développement précis, nous avons jeté les bases d'un projet viable sur le marché.

Nous avons également mis en lumière les éléments d'innovation clés qui différencient notre système des solutions existantes : pilotage sans fil par smartphone, traitement en temps réel avec FreeRTOS, boîtier compact en impression 3D, et évolutivité vers l'IA et la vision artificielle.

Grâce à une analyse du marché ciblé, une étude de la concurrence, et une stratégie de production réaliste, nous avons défini une feuille de route claire pour l'industrialisation et la commercialisation de notre solution. L'appui potentiel de partenaires académiques, fournisseurs, et incubateurs universitaires renforce la crédibilité et la faisabilité de notre démarche.

Enfin, le plan financier présenté démontre la capacité du projet à évoluer vers une version professionnelle avec des investissements mesurés et une perspective de retour sur investissement prometteuse.

Ce chapitre constitue ainsi un véritable tremplin vers la création d'une start-up technologique, et ouvre la voie à un développement futur alliant technologie et innovation.

Conclusion générale

Le projet de système de projection laser contrôlé par smartphone que nous avons mené dans le cadre de ce mémoire représente une synthèse réussie des compétences acquises en électronique embarquée, mécatronique, développement logiciel et communication sans fil.

À travers les différentes phases de conception, de développement et de test, nous avons démontré la faisabilité d'un dispositif mobile, flexible et précis, capable de répondre aux besoins de domaines variés tels que la médecine, le secteur militaire, l'industrie, le sport ou l'enseignement.

Grâce à l'intégration d'une STM32, de moteurs pas à pas et d'un module Bluetooth, le système permet un contrôle intuitif en temps réel depuis une application Android, sans fil, avec des performances prometteuses en termes de réactivité et de précision.

Les résultats obtenus lors des essais confirment que la solution développée constitue une base solide pour des évolutions futures. De nombreuses pistes d'amélioration sont envisageables : intégration d'une calibration automatique, ajout de capteurs intelligents (caméra, ultrasons), exploitation de protocoles de communication avancés (Wi-Fi), ou encore développement de modules d'intelligence artificielle pour automatiser certaines fonctionnalités.

Au-delà des aspects purement techniques, ce travail ouvre également des perspectives en matière d'entrepreneuriat technologique. Le potentiel commercial de ce type de solution est réel, en particulier dans des marchés de niche en quête de dispositifs légers, mobiles et personnalisables.

Ce mémoire marque ainsi l'aboutissement d'un projet innovant, mais constitue aussi le point de départ d'une aventure industrielle et scientifique que nous comptons bien poursuivre à travers la création d'une startup et la recherche de partenaires pour le développement de futures versions du système.

Références

- [1]<https://www.kicklox.com/blog-client/systemes-embarques-definition-caracteristiques/>
- [2]<http://www.catspowerdesign.fr/actualites/systeme-embarque>
- [3]<https://www.ressources-du-web.com/role-systemes-embarques-levolution-technologique/>
- [4] Semtech LoRa Technology Overview | Semtech
- [5] Stepper Motors: Types, Uses and Working Principle | Article | MPS
- [6] Moteurs pas à pas : un guide complet - Faradyi Motors
- [7] NUCLEO-L476RG | Mbed
- [8] Difference Between Bipolar Drives and Unipolar Drives for Stepper Motors
- [9] TB6600 Contrôleur de moteur pas à pas: broche, interface Arduino et comment cela fonctionne
- [10] HC-05 Bluetooth Module Pinout, Specifications, Default Settings, Replacements & Datasheet
- [11] TB6600 Stepper Motor Driver with Arduino Tutorial (3 Examples)
- [12] Tutoriel STM32 L476RG
- [13] STM32 HC-05 Bluetooth Examples Master & Slave Pairing AT Commands
- [14] Développement d'applications mobiles avec Java (Android) : Cours Apprenez à programmer en Java complet, de la logique de programmation à l'avancé | Cursa
- [15] MotionEvent | API reference | Android Developers
- [16] Android Studio - transmission de données par bluetooth (module HC05) - InStream / OutputStream - Android Studio Java