

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Science de L'ingéniorat

Département : Electronique

Domaine : Science et technologie

Filière : AUTOMATIQUE

Spécialité : AUTOMATIQUE ET INFORMATIQUE

INDUSTRIELLE

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Balle en lévitation dans le tube via une architecture de contrôleur PID non linéaire

Présenté par : Mokrane Mohamed Fayçal

Ouled Ouali Mehdi

Encadrant : Pr BENOURET Mohamed

Grade : PROF

Université :UBMA

Jury de Soutenance :

SAADI Mohamed Nacer	Maître de conférences (B)	UBMA	Président
BENOURET Mohamed	Professeur	UBMA	Encadrant
BOULEBTATECHE Brahim	Maître de conférences (B)	UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2023/2022

Remercîment

Je souhaite tout d'abord exprimer ma gratitude envers le Dieu Tout-Puissant, Allah, qui nous a accordé la force et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail. Mes sincères remerciements vont à mon superviseur, le Pr. BENOUARETH MOUHAMED, pour son encadrement, sa patience, ses conseils précieux et ses directives qui ont grandement contribué à mon progrès et à la réalisation de ce mémoire.

Je tiens également à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer mon travail, et je leur exprime mes sentiments d'estime et de profonde considération. J'exprime ma gratitude envers l'ensemble des enseignants du domaine de l'automatique. Enfin, je suis extrêmement reconnaissant envers ma famille, mon père, ma mère, mon frère, mes sœurs et tous mes proches, pour leur soutien, leurs encouragements et leur présence constante à mes côtés, ainsi que pour tous les soucis que je leur ai occasionnés.

Dédicace

Je souhaite dédier ce modeste travail à mes parents bien-aimés, pour leur patience, leurs sacrifices et leurs encouragements constants. À ma mère, qui m'a soutenu, encouragé et prié tout au long de sa vie pour que je réussisse, et à mon père, toujours prêt à tout donner pour moi, mes sœurs. Sans eux, je ne serais jamais arrivé là où je suis aujourd'hui. Je tiens également à remercier tous mes amis qui m'ont apporté leur aide et m'ont donné le courage de persévérer.

RESUME

Cette mémoire présente l'étude et la réalisation d'un système de régulation PID à l'aide de cartes Arduino. L'objectif était de comprendre les principes de base de la régulation PID et de construire un prototype fonctionnel. Nous avons exploré les différents composants matériels utilisés, tels que les cartes Arduino, les moteurs universels, les écrans LCD, et le capteur de distance VL53L0X. En suivant les étapes pratiques, nous avons réussi à programmer les cartes Arduino, à configurer les capteurs, et à réaliser un prototype opérationnel. Cette étude nous a permis d'acquérir des connaissances approfondies sur la régulation PID et de développer nos compétences en matière de conception et de réalisation de systèmes embarqués.

mot clé : PID Arduino système embarqué programmation levitation de balle

ABSTRACT

This thesis presents the study and implementation of a PID control system using Arduino boards. The objective was to understand the basic principles of PID control and build a functional prototype. We explored various hardware components used, such as Arduino boards, universal motors, LCD screens, and the VL53L0X distance sensor. Following practical steps, we successfully programmed the Arduino boards, configured the sensors, and built an operational prototype. This study provided us with in-depth knowledge of PID control and enhanced our skills in designing and implementing embedded systems.

Keywords: PID control, Arduino, embedded system, programming, ball levitation.

SOMMAIRE

Table des matières

Mémoire	1
Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master	1
Remerciement	2
Dédicace	3
RESUME	4
ABSTRACT	4
SOMMAIRE.....	5
LISTES DES FIGURES	7
LISTES DES ABRIVIATION	8
INTRODUCTION GENERAL	9
CHAPITRE I : L'ETAT DE L'ART	11
INTRODUCTION	11
I.1 HISTORIQUE.....	11
I.2 LE REGULATEUR PID QUELQUES NOTIONS ET CONCEPTS.....	12
I.3 TYPES DE REGULATEURS.....	13
I.4 PRINCIPE DE LA REGULATION PID.....	14
I.5 STRUCTURE D'UN PID:.....	14
I.6 OBJECTIF DE LA REGULATION :	14
I.7 PRINCIPE DE LA COMMANDE PID :	15
I.8 PARAMETRES D'UN REGULATEUR PID :	15
I.9 CADRE DU PROJET :	17
I.10 PROPOSITION DU CAHIER DES CHARGES ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	18
I.10.1 APERÇU DE LA CONSTRUCTION DU PROTOTYPE	18
CONCLUSION:	19
CHAPITRE II : GENERALITE SUR LE MATERIEL UTILISEE DANS NOTRE ETUDE	21
INTRODUCTION :	21
II.1 LE MATERIEL UTILISER DANS L'ETUDE	22
II.1.1 LE MODULE ARDUINO :	22
DEFINITION DU MODULE ARDUINO	22
II.1.2 CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE LA CARTE ARDUINO UNO :	23
II.1.2 FONCTIONNALITES DES CARTES ARDUINO :	24
II.2 MODULATION DE LA LARGEUR D'IMPULSIONS	25
II.2.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	26

II.2.2 OBJECTIFS DE L'MLI	28
II.3 MACHINE A COURANT CONTINU :	28
II.3.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE	28
II.4 MOTEUR UNIVERSEL.....	29
II.5 ALIMENTATION	30
II.6 UN RELAIS STATIQUE	31
II.7 ECRAN LCD	32
II.8 LE CAPTEUR DE DISTANCE VL53L0X :	32
CHAPITRE III : PARTIE PRATIQUE PRESENTATION DE PROJET	35
II.1 LES CRITERES DE CHOIX DE LA CARTE ARDUINO UNO ET NANO	35
III.2 MODELISATION ET IDENTIFICATION DU SYSTEME.....	36
III.3 LA REALISATION DE PROJET	37
III.4 REALISATION DE PROJET:	43
III.4 PROTOTYPAGE	50
CONCLUSION PARTIELLE :	51
CONCLUSION GENERAL	52
BIBLIOGRAPHIE.....	53

LISTES DES FIGURES ET TABLEAUX

FIGURE 1 SCHEMA DE BLOC DU REGULATEUR PID	12
FIGURE 2 STRUCTURE D'UN CORRECTEUR PID « STANDARD »	15
FIGURE 3 SYSTEME ABORDEE DE NOTRE PROJET	18
FIGURE 4 APERÇU DE LA CONSTRUCTION DU PROTOTYPE	18
FIGURE 5 LA CARTE ARDUINO UNO	22
FIGURE 6 CARTE ARDUINO UNO	23
FIGURE 7 SCHEMA SIMPLIFIE DE LA CARTE ARDUINO UNO	24
FIGURE 8 SORTIES PWM SUR ARDUINO UNO, NANO SCHEMA SIMPLIFIE	27
FIGURE 9 SCHEMA SORTIES PWM SUR ARDUINO UNO, NANO	28
FIGURE 10 MOTEUR UNIVERSEL	29
FIGURE 11 ALIMENTATION 12 V	31
FIGURE 12 UN RELAIS STATIQUE	31
FIGURE 13 ECRAN LCD	32
FIGURE 14 LE CAPTEUR DE DISTANCE VL53L0X	32
FIGURE 15 ORGANIGRAMME DE CODE	42
FIGURE 16 ARDUINO UNO – CPU- PRINCIPALE	43
FIGURE 17 CAPTEUR LASER VL53L0X V2 POUR LA POSITION DE BALLE	44
FIGURE 18 CAPTEUR LASER VL53L0X V2 POUR LA POSITION DE LA MAIN	44
FIGURE 19 CONNEXION DES CAPTEURS AVEC LA CARTE	45
FIGURE 20 L'AJOUTE DES ARDUINO NANO AVEC LES CAPTEURS	46
FIGURE 21 AFFICHEUR LCD	47
FIGURE 22 AJOUTER ET ALIMENTER LE MOTEUR AVEC ARDUINO ET CARTE DESSAI	48
FIGURE 23 TUBE EN PLASTIQUE	49
FIGURE 24 PROTOTYPE DE NOTRE PROJET	50
TABLE 1 LE MATERIELLE UTILISE DAN L'ETUDE	22

LISTES DES ABRIVIATION

PID - Régulateur Proportionnel Intégral Dérivé

PWM - Modulation de Largeur d'Impulsion

VL53L0X - Capteur de Distance

CPU - Unité Centrale de Traitement

PCB - Circuit Imprimé

RAM - Mémoire Vive

ROM - Mémoire Morte

ADC - Convertisseur Analogique-Numérique

GPIO - Entrées/Sorties Généralistes

I2C - Inter-Integrated Circuit (Bus Série Bidirectionnel)

PWM - Modulation de Largeur d'Impulsion

PID - Identificateur de Processus

LCD - Afficheur à Cristaux Liquides

UART - Récepteur-Émetteur Asynchrone Universel

IDE - Environnement de Développement Intégré

INTRODUCTION GENERAL

Avec l'évolution constante de l'informatique, les méthodes d'optimisation connaissent actuellement une croissance significative. En parallèle, les contrôleurs de type PID sont souvent suffisants pour résoudre de nombreux problèmes de contrôle, notamment lorsque la dynamique du système est faible et que les exigences en termes de performances sont modestes.

Le contrôle PID fait partie intégrante de l'automatisation industrielle. Il est utilisé pour contrôler automatiquement les variables de processus telles que la température, le niveau de liquide, la pression, les débits, etc. Bien que les contrôleurs logiques programmables (PLC) aient des fonctions logicielles pour mettre en œuvre le contrôle PID à l'aide de modules d'entrée et de sortie analogiques, tous les principaux fabricants proposent des solutions autonomes. Les contrôleurs PID car ils sont plus faciles à programmer, à surveiller et à entretenir. Cela crée un besoin d'enseigner ce calcul de contrôle de base aux étudiants de niveau universitaire. L'applicabilité du PID dans de nombreux domaines de carrière différents implique que de nombreux industries mondiale.

Ces systèmes sont généralement coûteux, orientés application et propriétaires. Cet étude décrit la conception d'une unité de démonstration PID plus petite et plus facilement reproductible, ainsi que le programme de trois courtes expériences de laboratoire pour interagir et apprendre avec elle.

Chapitre 01 : On va parler de l'état de l'art.

Chapitre 02 : On va donner des généralités sur le matérielle utilisé

Chapitre 03 : Présentation de projet.

CHAPITRE I

L'ETAT DE L'ART

CHAPITRE I : L'ETAT DE L'ART

INTRODUCTION

Le régulateur standard le plus utilisé dans l'industrie est le régulateur PID (proportionnel, Intégral, dérivé), car il permet de régler à l'aide de ses trois paramètres les performances (Amortissement, temps de réponse) d'une régulation d'un processus modélisé par un deuxième ordre. Nombreux sont les systèmes physiques qui ont un comportement voisin de celui de deuxième ordre dans une certaine échelle de temps. Par conséquent, le régulateur PID est bien adapté à la plupart des processus de type industriel et il est relativement robuste par rapport aux variations des paramètres de procédé, quand on n'est pas trop exigeant pour les performances de la boucle fermée par rapport à celles de la boucle ouverte (par exemple, accélération très importante de la réponse ou augmentation très importante de l'amortissement en boucle fermée).

I.1 HISTORIQUE

Le contrôle PID (proportionnel-intégral-dérivé), une technologie de contrôle fondamentale pour les fabricants de processus, est avec nous depuis le début des années 1900.

Le premier véritable contrôleur de type PID a été développé par Elmer Sperry en 1911. Cependant, c'est en 1922 que Nicolas Minorsky a publié la première analyse théorique d'un contrôleur PID. Ses observations sont nées des efforts de conception de systèmes de direction automatique pour l'US Navy.

Historiquement, le réglage du contrôleur PID a débuté par l'observation d'une boucle avec une action proportionnelle à la limite de la stabilité, puis en réduisant le gain proportionnel pour obtenir un fonctionnement stable, et en calculant les termes intégral et dérivé à partir de la période d'oscillation de la boucle. En réalité, tous les éléments mentionnés ci-dessus sont liés d'une certaine manière aux paramètres du modèle de processus. Par conséquent, si tous les paramètres du modèle de processus sont explicitement connus, il est possible de satisfaire au mieux les exigences de réglage. Il existe plusieurs règles de réglage basées sur un modèle qui offrent une méthode simple et intuitivement compréhensible pour définir les performances et la robustesse souhaitées de la boucle pour un processus donné.

Au fil des décennies, le contrôle PID a connu de nombreux développements et améliorations. Des

méthodes plus sophistiquées de réglage ont été développées, telles que le réglage adaptatif et le réglage robuste, pour faire face à des situations de processus complexes et variables. De plus, avec l'avènement des ordinateurs et des systèmes de contrôle avancés, le PID est devenu encore plus précis et efficace dans la régulation des processus industriels.

Aujourd'hui, le contrôle PID est largement utilisé dans de nombreux domaines industriels tels que l'automatisation, la robotique, la fabrication, la chimie, l'énergie et bien d'autres. Sa simplicité et son efficacité en font une méthode de contrôle populaire et largement adoptée. Malgré les avancées technologiques continues, le contrôle PID reste un pilier essentiel de l'industrie et continue de jouer un rôle crucial dans la régulation des processus.¹

I.2 LE REGULATEUR PID QUELQUES NOTIONS ET CONCEPTS

Définition

Le régulateur PID, appelé aussi correcteur PID (proportionnel, intégrateur, dérivateur) est un système de contrôle, il est constitué d'un comparateur pour observer l'écart (erreur) entre la mesure et la consigne, et d'un correcteur dont l'algorithme permet d'obtenir une loi d'évolution de la mesure du procédé conforme au cahier des charges. Il permettant d'effectuer un asservissement en boucle fermée d'un système industriel ou « procédé ».²

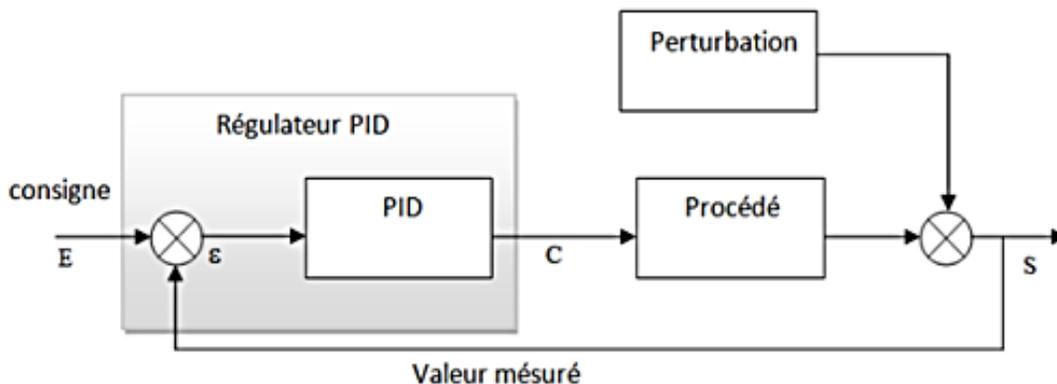


Figure 1 Schéma de bloc du régulateur PID

¹ KERCHOUCHE Lamia Régulation analogique P, PI et PID de la vitesse d'un moteur à courant continu d'un banc didactique 33-033.

² BEN KHERIF Oussama Etude Comparative en Simulation entre un Régulateur PID Classique et un Régulateur PID Intelligent p32-40

I.3 TYPES DE REGULATEURS

La régulation PID

L'avantage d'un régulateur PID est sa performance dynamique, sa précision de réglage et sa stabilité. Les éléments de ce régulateur sont une combinaison d'actions P (Proportionnelle), I (Intégrale) et D (Dérivée) choisies en fonction du type d'application.

Action proportionnelle(P):

Elle permet de réduire l'erreur statique (améliorer la précision):

Plus l'action est grande (K grand), plus l'erreur statique est réduite,

Plus l'action est grande, plus les oscillations sont importantes durant le régime transitoire,

Un excès d'action (k très élevé) conduit à l'instabilité du système.

Action intégrale (I) :

Elle permet de supprimer l'erreur statique :

→ Plus la constante T, est petite, plus l'action intégrale est forte,

Une action excessive (T, trop petit ou K, trop grand) conduit a une instabilité du système (du a l'augmentation du déphasage).

Action dérivée (D):

Plus Ta est grand plus l'action dérivée est forte, Ta très forte permet de :

→ Réduire le dépassement ou les oscillations obtenues en action proportionnelle seule,

→ Accélérer la réponse mesurée,

Améliorer la stabilité du système (apport d'une avance de phase).

L'action dérivée est limitée par un excès d'action qui peut conduire à l'instabilité du Système

I.4 PRINCIPE DE LA REGULATION PID

Afin de bien maîtriser les procédés régulés, on doit corriger leurs défauts qui se résument en trois anomalies possibles de commande et une anomalie de conception à savoir :

- Grand temps de retard ($\gg 0$)
- Lenteur d'exécution ($\gg 0$)
- Mauvaise exactitude ($e \neq 0$)
- Instabilité

Ces anomalies appelées caractéristiques apparentes du système, représentent le grand travail des régleurs et mathématiciens. Maîtriser ces anomalies n'est pas une tâche facile, surtout lorsqu'on aura le choix entre rapidité et stabilité, et ce choix n'est pas décisif. On note qu'il y a plus qu'une méthode de détermination de ces paramètres³.

I.5 STRUCTURE D'UN PID:

Les actions élémentaires d'un régulateur peuvent être associées de plusieurs façons. On parle de la structure d'algorithme du régulateur. Les valeurs des paramètres PID ne donnent pas le même comportement du procédé selon que la structure est parallèle ou mixte⁴

C'est pourquoi il est primordial que l'automaticien connaisse les structures existantes du régulateur.

Pour les différentes structures on prend:

X(p): Consigne de régulation.	e(p): Ecart mesure/consigne.
W(p): Grandeur réglée (mesure).	Y(p): Grandeur réglant.

I.6 OBJECTIF DE LA REGULATION :

Nous avons vu que les systèmes asservis pouvaient présenter des défauts, une précision insuffisante, une stabilité trop relative, un temps de réaction trop lent, un dépassement trop important.

³ Hamaloui ahmed abd erraouf - Implémentation et test en temps réel d'un bloc régulateur RST sur Le procédé industriel de régulation CE177 2-5

⁴ CHALANE Idir. Optimisation des paramètres d'un PID par essais particuliers(PSO) p 1-3

La détermination du régulateur est en fonction de cahier de charges pouvant fixer (la rapidité ; la précision ; temps de réaction)

I.7 PRINCIPE DE LA COMMANDE PID :

L'intérêt du correcteur PID est d'intégrer les effets positifs des trois correcteurs précédents. La détermination des coefficients K_p , T_i et T_d du correcteur PID permet d'améliorer à la fois la précision (T_i et K_p) ; la stabilité (T_d) ;

la rapidité (T_d).

Le réglage d'un PID est en général assez complexe, des méthodes pratiques de réglages permettent d'obtenir des bons résultats.⁵

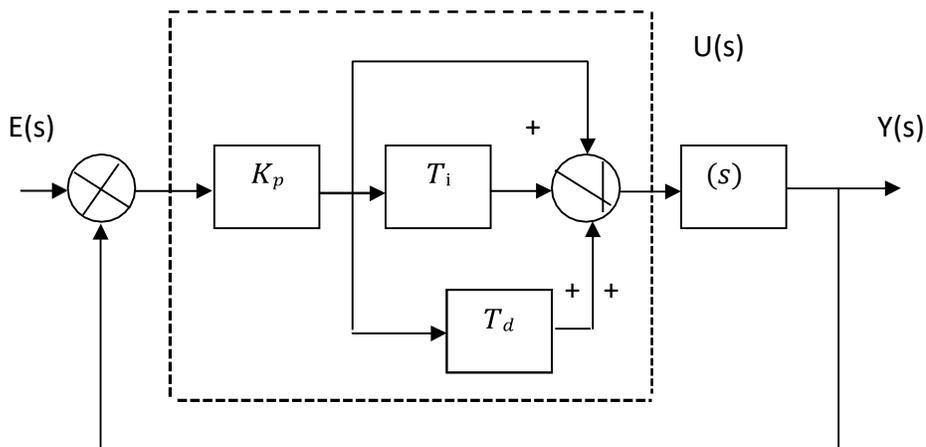


Figure 2 Structure d'un correcteur PID « standard ».

I.8 PARAMETRES D'UN REGULATEUR PID :

L'idée de base de ce régulateur est de générer une commande $u(t)$ donnée par le régulateur PID, dans sa forme classique est décrite par l'équation

Elle est composée de la somme de trois termes :

- Le terme proportionnel « P » (proportionnel à l'erreur).

⁵ Sciences Industrielles Notion de correction des systèmes asservis Papanicola Robert Lycée Jacques Amyot p 1-6

: est le gain proportionnel

$$P = Kp e(t)$$

- Le terme intégral « I » (proportionnel à l'intégrale de l'erreur) :

T_i : est la constante de temps de l'action intégrale, intégrale, en secondes ou en minutes. T_i Peut être réglé par son inverse (répétitions par seconde ou par minute).

$$I = Kp \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

- Le terme dérivatif « D » (proportionnel à la dérive de l'erreur). : est la constante de temps de la partie dérivée

$$D = Kp Td \frac{de(t)}{dt}$$

Les paramètres du régulateur PID sont le gain proportionnel Kp , le temps intégral T_i Et le temps dérivatif Td , les temps étant exprimés en secondes.

I.8.1 L'ACTION P, I ET D:

Action P (Proportionnel):

Le but de la correction proportionnelle est de diminuer de façon importante le temps de réponse. Par contre on introduit un dépassement et surtout la précision n'est pas excellente puisqu'il existe une erreur de position.

a) Avantages:

- Corrige de manière instantanée, donc rapide.
- Permet de vaincre les grandes inerties du système.
- Augmente le gain.

b) Inconvénients :

- Amplification sur toute la bande de fréquence.
- La précision n'est pas importante.

Action I (Intégral) :

Le but de cette correction est d'annuler l'erreur de position c'est-à-dire d'obtenir en régime permanent la sortie égale à la consigne (erreur de position nulle $s=0$). Par contre le temps de réponse est long.

Avantages:

- Annuler l'erreur statique (précision parfaite).
- Réglage des variables bruitées.

Inconvénients :

- Retard de phase, l'action intégrale qui peut conduire à une instabilité si le correcteur est mal placé.

Action D (dérivateur) :

L'effet dérivée est sans influence sur le régime permanent (la dérive est nulle), mais il y a un effet important en régime transitoire.

a) Avantages:

- Accélère la réponse et améliore la stabilité du système.
- Permettant notamment un amortissement rapide des oscillations dues à l'apparition d'une perturbation ou à une variable subite de la consigne.

b) Inconvénient:

- Sensibilité aux bruits accrus.

I.9 CADRE DU PROJET :

L'objectif de ce projet est de réaliser un système embarqué simple en utilisant une carte de prototypage telle que l'Arduino Uno et Nano. Notre idée était d'utiliser des composants électroniques bon marché et un contrôleur open source pour contrôler la position d'un objet (une balle en plastique) à l'intérieur d'un tube transparent.

La partie intéressante consiste à mettre en œuvre un modèle PID générique pour le contrôle automatisé dans un modèle physique relativement simple. Cette approche de contrôle est en effet largement utilisée dans de nombreux types de systèmes et avec différents contrôleurs. Malgré la simplicité de notre système et l'utilisation de capteurs et d'actionneurs bon marché, nous avons dû mettre en place des stratégies

de codage pour résoudre des problèmes liés à la précision, à la stabilité et à la vitesse afin d'obtenir un bon compromis. Dans les pages suivantes, nous présenterons d'abord le matériel de notre projet, puis, après quelques rappels théoriques sur la loi de commande PID, nous mettrons en évidence certaines fonctionnalités de notre code Arduino.

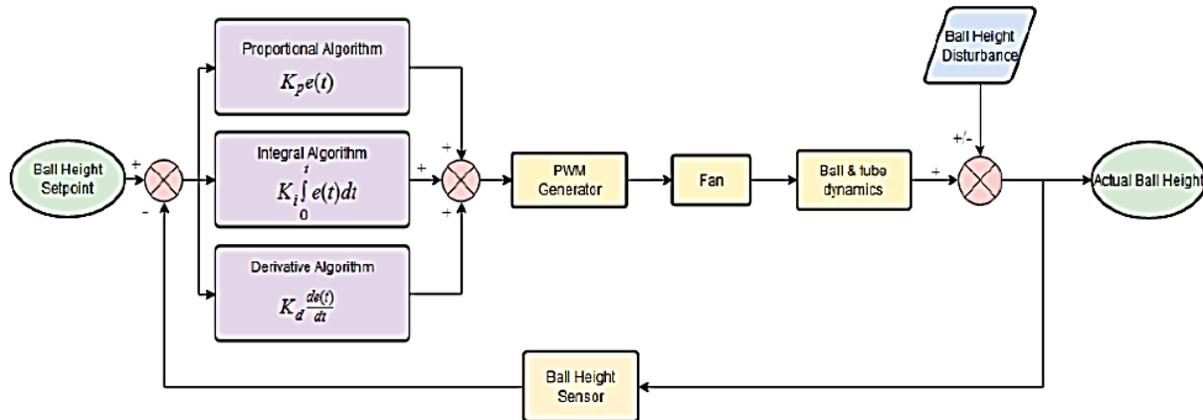


Figure 3 système abordée de notre projet

I.10 PROPOSITION DU CAHIER DES CHARGES ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

I.10.1 APERÇU DE LA CONSTRUCTION DU PROTOTYPE

Avant de commencer la programmation en Utilisant la carte Arduino, il était nécessaire de concevoir et de réaliser la structure (Matériel) capable de faire interagir le contrôleur avec le monde physique. Nous avons réalisé le prototype à partir de composants électriques et de pièces en plastique et en bois.

- 1- Arduino uno
- 2- Arduino nano 1
- 3- Capteur de distance 1
- 4- Arduino nano 2
- 5- Capteur de distance 2
- 6- LCD
- 7- Power supply - alimentation
- 8- Fan – ventilateur
- 9- Balle

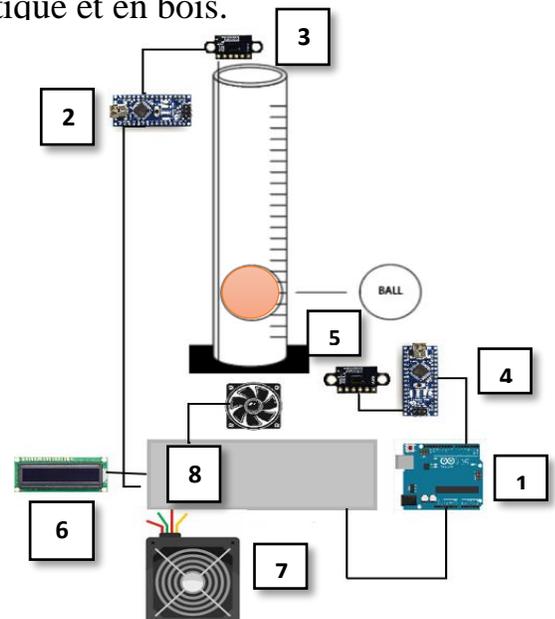


Figure 4 APERÇU DE LA CONSTRUCTION DU PROTOTYPE

CONCLUSION:

En conclusion, ce chapitre nous a permis de retracer l'historique du contrôle PID et de comprendre les notions et concepts fondamentaux de ce régulateur. Nous avons également souligné les avantages d'un système PID dans la régulation des processus. Enfin, nous avons présenté le cadre général de notre projet et exposé le cahier des charges à réaliser. Ces informations nous serviront de base solide pour la mise en œuvre de notre système de contrôle PID. Dans les chapitres suivants, nous approfondirons chaque aspect de notre projet, en mettant en évidence les choix de conception, les résultats des tests et les améliorations apportées. Nous sommes convaincus que ce projet nous permettra d'acquérir une expérience précieuse dans le domaine du contrôle automatique

CHAPITRE II

GENERALITE SUR LE MATERIEL UTILISEE DANS NOTRE ETUDE

CHAPITRE II : GENERALITE SUR LE MATERIEL UTILISEE DANS NOTRE ETUDE

INTRODUCTION :

Le deuxième chapitre de notre étude porte sur le matériel utilisé dans notre projet. Il est essentiel de comprendre les composants et les outils que nous employons pour mener à bien notre recherche. Dans cette section, nous nous concentrerons sur trois éléments clés : le module Arduino, la modulation de la largeur d'impulsions (MLI) et la machine à courant continu (CC).

Nous commencerons par examiner le module Arduino, qui joue un rôle central dans notre étude. Nous présenterons une définition de ce module, suivi des caractéristiques techniques de la carte Arduino Uno. Ensuite, nous explorerons les fonctionnalités offertes par les cartes Arduino, qui les rendent si populaires et polyvalentes dans le domaine de l'électronique et de la programmation.

Ensuite, nous aborderons la modulation de la largeur d'impulsions, également connue sous le nom de MLI. Nous expliquerons le principe de fonctionnement de cette technique et les objectifs principaux de son utilisation. La MLI est largement employée dans de nombreuses applications, notamment dans la commande de moteurs et de convertisseurs de puissance. Nous étudierons en détail comment elle est mise en œuvre et quelles sont ses implications dans notre projet.

Enfin, nous nous pencherons sur la machine à courant continu (CC). Nous discuterons de son importance dans notre étude et de ses caractéristiques clés. Comprendre les principes de fonctionnement d'une machine à courant continu est essentiel pour notre recherche, car cela nous permettra de manipuler et de contrôler efficacement le courant continu pour nos expériences.

Dans l'ensemble, ce chapitre nous permettra d'acquérir une compréhension approfondie du matériel utilisé dans notre étude. Il jettera les bases nécessaires pour la mise en œuvre de nos expérimentations et nous aidera à atteindre nos objectifs de recherche de manière efficace et précise.

II.1 LE MATERIEL UTILISER DANS L'ETUDE

ARDUINO UNO	ALIMENTATION	MOTEUR UNIVERSEL
ARDUINO NANO 1	ECRAN LCD	CARTE DESSAI
ARDUINO NANO 2	LE CAPTEUR DE DISTANCE VL53L0X -2-	LE CAPTEUR DE DISTANCE VL53L0X -1-
BALLE	TUBE PLASTIQUE	UN RELAIS STATIQUE

Table 1 le matérielle utilisé dan l'étude

II.1.1 LE MODULE ARDUINO :

DEFINITION DU MODULE ARDUINO

Le module Arduino est un circuit imprimé en matériel libre (plateforme de contrôle) dont les plans de la carte elle-même sont publiés en licence libre dont certains composants de la carte ne le sont pas : comme le microcontrôleur et les composants complémentaires.

Un microcontrôleur programmé peut analyser et produire des signaux électriques de manière à effectuer des tâches très diverses. Arduino est utilisé dans beaucoup d'applications comme l'électrotechnique industrielle et embarquée (la domotique, le pilotage d'un robot, commande des moteurs et faire des jeux de lumières, communiquer avec l'ordinateur, commander des appareils mobiles).

Chaque module d'Arduino possède un régulateur de tension +5 V et un oscillateur à quartz 16 MHz (ou un résonateur céramique dans certains modèles). Pour programmer cette carte, on utilise l'logiciel IDE Arduino .⁶



Figure 5 La carte Arduino UNO

⁶ Djebbari Aissa Amir Abdelhak Conception et réalisation d'un tapis roulant commandé par un système de détection à base d'une carte Arduino p 6

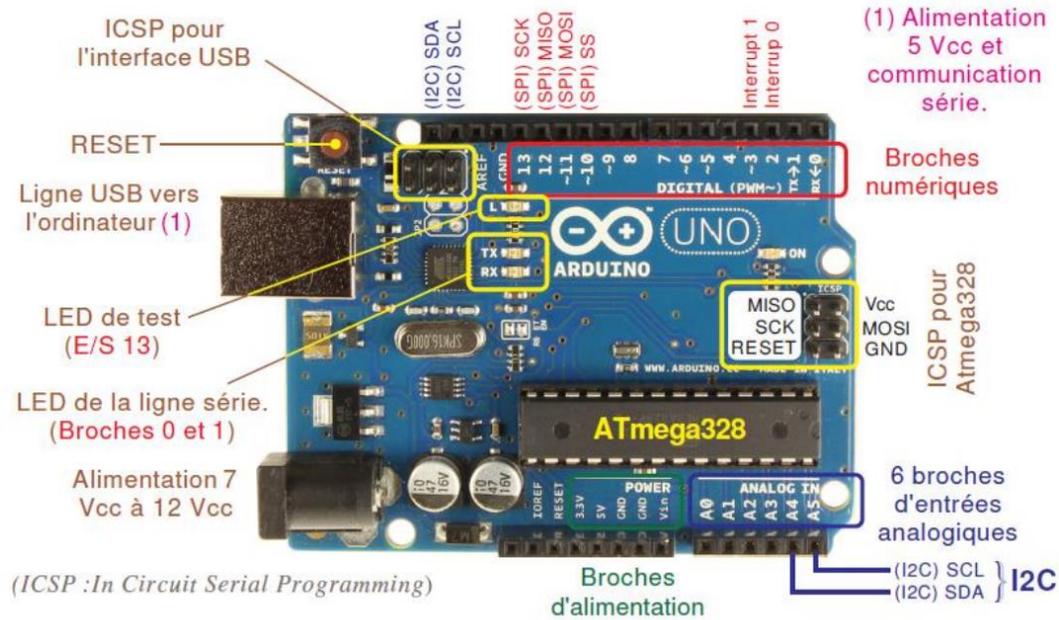


Figure 6 carte Arduino UNO

II.1.2 CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE LA CARTE ARDUINO UNO :

- Microcontrôleur : ATmega328.
- Fréquence horloge : 16 MHz.
- Tension d'alimentation interne : 5 Vcc.
- Tension d'alimentation externe recommandée : 7-12 Vcc. (Limites : 6-20 Vcc)
- Courant max sur la sortie 3,3 V généré par le régulateur interne : 50mA.
- Entrées/sorties binaires : 14 broches.
- Courant MAX par broches en sortie : 40 mA. (85 mA en court circuit)
- Courant MAX cumulé par les broches en sorties : 200 mA. (Soit 14 mA en moyenne)
- Les E/S binaires 0 et 1 sont mobilisées par le dialogue sur la ligne série.
- S0 pour RX et S1 pour TX. Chaque broche est reliée à une LED via $R = 1k\Omega$.
- Les E/S binaires 3, 5, 6, 9, 10, et 11 sont dédiées au mode PWM.
- L'E/S 13 est reliée sur la carte à la LED de test via une résistance de $1k\Omega$.

- Entrées analogiques : 6, le niveau logique maximal doit être de +5Vcc.
- Mémoire Flash 32 KB dont 0.5 KB utilisée par le Boot loader.
- Mémoire SRAM 2 KB, Mémoire EEPROM 1 KB.⁷

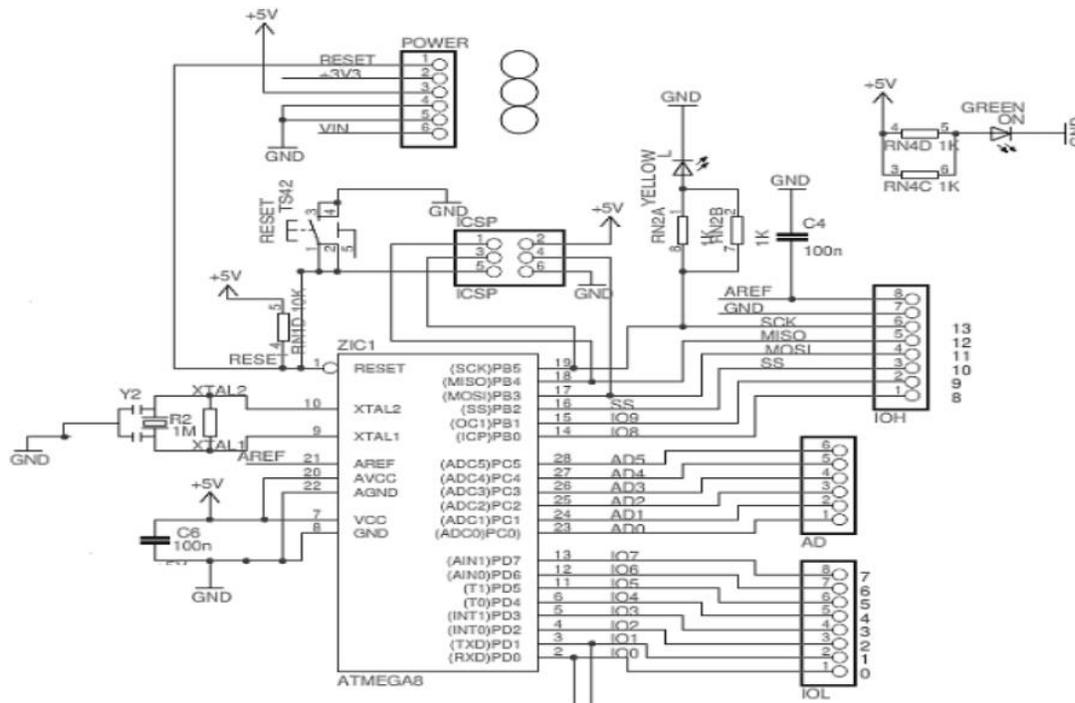


Figure 7 Schéma simplifié de la carte Arduino UNO

II.1.2 FONCTIONNALITES DES CARTES ARDUINO :

1. Entrées et sorties numériques : Les broches numériques d'une carte Arduino peuvent être configurées en tant qu'entrées ou sorties. Les entrées numériques peuvent lire des signaux binaires (0 ou 1), tandis que les sorties numériques peuvent envoyer des signaux binaires pour contrôler d'autres composants électroniques.

2. Entrées analogiques : Les cartes Arduino sont généralement équipées d'un certain nombre de broches analogiques qui peuvent mesurer des valeurs de tension continues sur une plage donnée. Cela permet de lire des capteurs analogiques tels que des capteurs de température, de lumière, de pression, etc.

3. Communication série : Les cartes Arduino prennent en charge la communication série, ce qui signifie qu'elles peuvent se connecter à d'autres appareils via des ports

⁷ Djebbari Aissa Amir Abdelhak Conception et réalisation d'un tapis roulant commandé par un système de détection à base d'une carte Arduino p 7

série tels que USB, UART, I2C, etc. Cela permet d'échanger des données avec d'autres périphériques, comme un ordinateur, un module GPS, un afficheur LCD, etc.

4. PWM (Pulse Width Modulation) : Les broches PWM des cartes Arduino permettent de générer des signaux de sortie analogiques en utilisant la modulation de largeur d'impulsion. Cela est utile pour le contrôle de la vitesse des moteurs, la variation de l'intensité lumineuse des LED, etc.

5. Communication sans fil : Certaines cartes Arduino sont dotées de modules de communication sans fil intégrés, tels que le Wi-Fi ou le Bluetooth, qui permettent de se connecter à des réseaux ou d'interagir avec d'autres appareils sans fil.

6. Stockage de données : Certaines cartes Arduino possèdent une mémoire non volatile (par exemple, une mémoire flash) où vous pouvez stocker des données pour une utilisation ultérieure, comme des configurations, des paramètres, des messages, etc.

7. Contrôle de servomoteurs : Les cartes Arduino peuvent contrôler des servomoteurs, qui sont couramment utilisés dans les projets de robotique et de mécatronique pour le contrôle précis de l'angle de rotation.

8. Interface utilisateur : Vous pouvez connecter des composants tels que des boutons, des potentiomètres, des écrans LCD, des afficheurs à sept segments, etc., pour créer une interface utilisateur pour votre projet Arduino.⁸

II.2 MODULATION DE LA LARGEUR D'IMPULSIONS

Définition

La modulation de la largeur d'impulsions est une technique de pilotage pour les convertisseurs statiques, servant d'interface entre une charge (machine électrique) et son dispositif d'alimentation (onduleur triphasé). Elle est donc une technique utilisée pour la conversion de l'énergie, ayant ses bases dans le domaine des télécommunications (traitement du signal). Elle porte en anglais le nom de Pulse Width Modulation (PWM) ou Pulse-Duration Modulation (PDM).⁹

⁸ <https://www.carnetdumaker.net/articles/utiliser-les-entrees-sorties-numeriques-dune-carte-arduino-genuino/>

⁹ CHOUAF Fethi COMMANDE D'UN ONDULEUR TRIPHASE PAR MLI VECTORIELLE p 21

II.2.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Son principe de fonctionnement est la détermination des durées de modulation (portions de temps) qui doivent être allouées à chaque vecteur de tension durant la période d'échantillonnage. Cette commande rapprochée permet de déterminer les séquences des allumages et d'extinctions des composants du convertisseur et de minimiser d'un côté les pertes dans les interrupteurs de l'onduleur et d'autre côté les harmoniques des tensions appliquées au moteur.

A l'inverse des autres techniques de commande où le filtrage de la tension ou du courant de sortie est difficile et onéreux, ne délivrant qu'un créneau de tension ou de courant par alternance, (rappelant que les premiers harmoniques à éliminer, harmonique 3 ou 5, ont une fréquence très voisine de celle du fondamental), la modulation de largeur d'impulsion s'avère être une technique très efficace, permettant de se rapprocher du signal désiré et de faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie. Elle repousse vers les fréquences plus élevées les harmoniques de la tension de sortie, ce qui facilite le filtrage. Cependant, cette technique est imparfaite. Le contenu harmonique généré par une onde M.L.I entraîne des pertes dans le réseau (pertes fer dans le transformateur, pertes Joule dans la ligne et le convertisseur), dans la charge (pertes Joule, fer et par courant de Foucault). Elles génèrent dans les machines tournantes des oscillations de couple, des bruits acoustiques et des résonances électroniques. Elle injecte du bruit sur la commande et introduit des non linéarités qui peuvent déstabiliser le système. Il faut donc minimiser ces harmoniques.¹⁰

Parmi ces différentes techniques de modulation de largeur d'impulsion, on a :

- MLI sinusoïdale << sinus-triangle >> (STPWM)
- MLI vectorielle (SVPWM)
- MLI hybride (HPWM)
- MLI discrète « discontinue » (DPWM)

¹⁰ Melle : Adjimi Nadia Modélisation et commande d'un onduleur MLI Mémoire de fin d'études En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Systèmes Electriques & Automatique (SEA) 2009 P 13

Pour un entraînement à courant alternatif performant, on préfère une stratégie de commande évoluée.

Sorties PWM sur Arduino Uno, Nano, (microcontrôleur ATmega328P)

Si vous travaillez avec un Arduino Uno, Nano, ou Pro Mini, c'est-à-dire un modèle équipé d'un microcontrôleur ATmega328P, voici les broches qui permettent d'émettre un signal PWM :

- La pin D3
- La pin D9
- La pin D10
- La pin D5
- La pin D6
- La pin D11

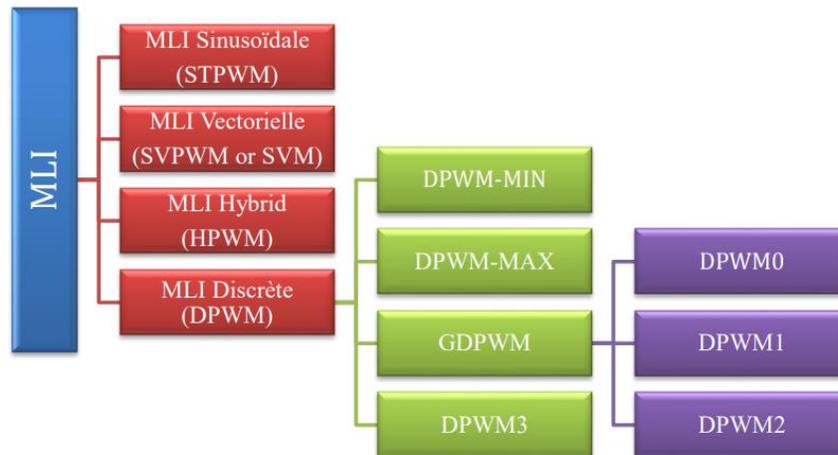


Figure 8 Sorties PWM sur Arduino Uno, Nano schéma simplifié

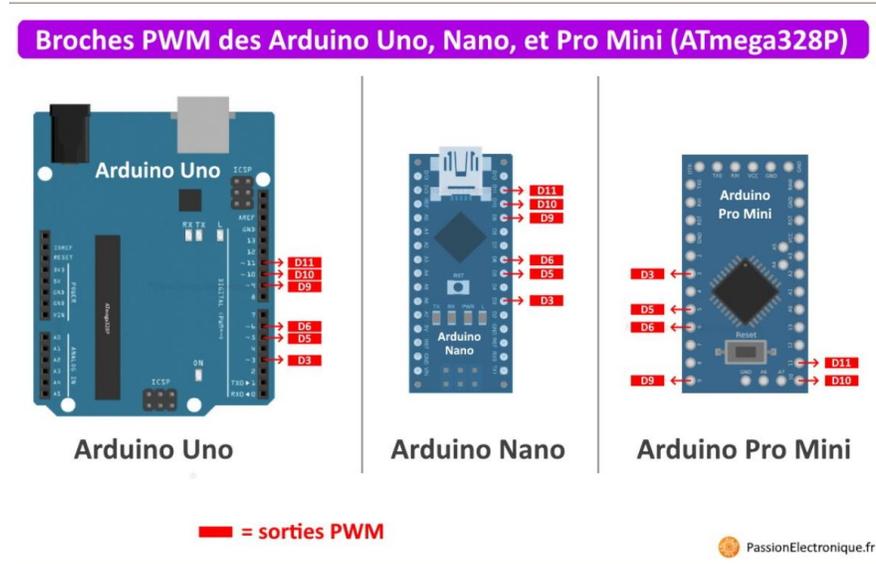


Figure 9 schéma Sorties PWM sur Arduino Uno, Nano

II.2.2 OBJECTIFS DE L'MLI

Les principaux objectifs de l'MLI sont les suivants:

Obtenir dans la charge électrique des courants proche de la sinusoïde par le contrôle des rapports cycliques et grâce à sortie. une fréquence élevée des commutations des interrupteurs par rapport à la fréquence des tensions de Permet un contrôle précis de l'amplitude fondamentale de la tension de sortie, généralement sur la plage la plus large possible et pour des fréquences de sortie très variables.¹¹

II.3 MACHINE A COURANT CONTINU :

II.3.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA MACHINE

Le principe de fonctionnement de la machine à courant continu en tant que moteur repose sur l'interaction entre un champ magnétique et un courant électrique dans les conducteurs.

Lorsque la machine à courant continu est utilisée comme moteur, un courant électrique est fourni à l'induit, qui est la partie mobile de la machine. Ce courant circule à travers les conducteurs situés dans l'induit, créant ainsi un champ

¹¹ Kahhoul Aymen & Louaifi Abdennour , Simulation et Implémentation en Temps Réel d'un Onduleur de Tension Multi-niveaux par la Carte DSpace 1104 2022 – P 22

magnétique. Ce champ magnétique interagit ensuite avec le champ magnétique produit par le stator, qui est la partie fixe de la machine.

L'interaction entre les champs magnétiques produit un couple qui fait tourner l'induit et l'arbre de sortie de la machine. Le sens de rotation dépend de la direction du courant dans l'induit et de la polarité des champs magnétiques.

Pour maintenir le mouvement continu du moteur à courant continu, un système de commutation est utilisé pour inverser périodiquement la direction du courant dans l'induit. Cela permet de maintenir la rotation de l'induit et de l'arbre de sortie dans la même direction.

En résumé, le principe de fonctionnement de la machine à courant continu en tant que moteur repose sur l'interaction entre le champ magnétique créé par le courant électrique dans l'induit et le champ magnétique produit par le stator. Cette interaction génère un couple qui entraîne la rotation de l'induit et de l'arbre de sortie, permettant ainsi le fonctionnement du moteur à courant continu.

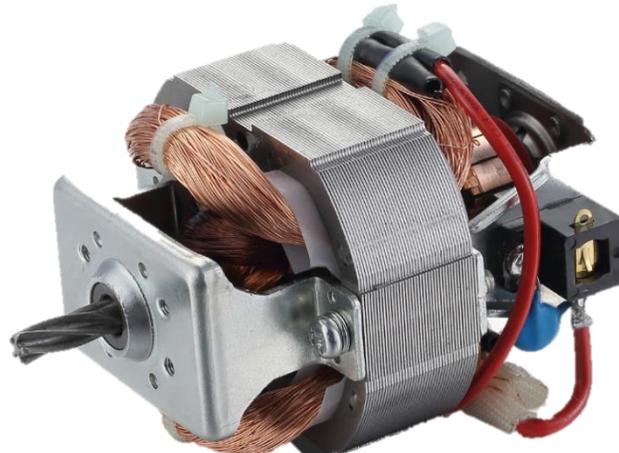


Figure 10 MOTEUR UNIVERSEL

II.4 MOTEUR UNIVERSEL

Un moteur universel, également connu sous le nom de moteur AC/DC ou moteur à collecteur, est un type de moteur électrique qui peut fonctionner à la fois avec un courant alternatif (AC) et un courant continu (DC). Il est appelé "universel" car il est conçu pour fonctionner avec les deux types de courant.

Le moteur universel utilise un rotor bobiné et un stator à aimants permanents ou à bobinage. Le rotor est alimenté par des enroulements qui sont connectés à un

collecteur, un dispositif rotatif qui permet de changer la direction du courant électrique dans les bobines du rotor. Cette commutation permet d'inverser le champ magnétique et de maintenir la rotation du moteur dans le bon sens.

Les moteurs universels sont largement utilisés dans de nombreux appareils électroménagers et outils électriques, tels que les aspirateurs, les mixeurs, les perceuses, les machines à laver, les ventilateurs, les tondeuses à gazon, etc. Ils sont appréciés pour leur simplicité de conception, leur faible coût et leur couple de démarrage élevé.

Cependant, les moteurs universels ont quelques caractéristiques spécifiques :

1. Vitesse variable : Les moteurs universels peuvent fonctionner à différentes vitesses en ajustant la tension d'alimentation. Cela les rend adaptés aux applications nécessitant un contrôle de vitesse précis.
2. Bruyant : Les moteurs universels peuvent être bruyants en raison des contacts mécaniques du collecteur et des vibrations du rotor.
3. Entretien requis : Les brosses de carbone utilisées dans les moteurs universels ont tendance à s'user avec le temps et doivent être remplacées périodiquement pour assurer un fonctionnement optimal.
4. Efficacité énergétique : Comparés à d'autres types de moteurs plus récents, tels que les moteurs à induction, les moteurs universels ont une efficacité énergétique relativement plus faible.

Malgré ces limitations, les moteurs universels restent largement utilisés dans de nombreux domaines en raison de leur simplicité, de leur polyvalence et de leur coût abordable.

II.5 ALIMENTATION

II.5.1 CARACTERISTIQUES:

- *Courant de sortie max: 5A*
- *Classe de connecteur de sortie: 5.5 / 2.1mm*
- *Puissance: 60W*
- *Dimensions intérieures: 112x54.6x31.4mm*
- *Température de fonctionnement: 0 ... 40°C*

- *Protection contre: Anti-court-circuit, contre les surcharges, contre les surtensions*
- *Longueur du conduit de sortie: 1.4m*
- *Version de connexion: Droite*
- *Polarisation: Broche intérieure positive*
- *Tension d'alimentation: 90 ... 264V AC*
- *Tension de sortie: 12V CC*

II.6 UN RELAIS STATIQUE

Un relais statique est un dispositif électronique qui remplit la fonction d'un relais électromécanique, mais sans parties mobiles. Il utilise des composants à semi-conducteurs tels que des thyristors, des triacs ou des transistors pour effectuer la commutation des signaux électriques.

Le rôle principal d'un relais statique est de fournir une isolation électrique et de permettre la commutation de charges électriques de puissance élevée à partir d'un circuit de commande basse tension. Il peut être utilisé pour contrôler divers types de charges, tels que les moteurs, les lampes, les résistances de chauffage, les transformateurs, etc.



Figure 11 ALIMENTATION 12 V



Figure 12 UN RELAIS STATIQUE

II.7 ECRAN LCD

Un écran LCD 4x16 est un type d'afficheur à cristaux liquides qui peut afficher jusqu'à 4 lignes de texte et jusqu'à 16 caractères par ligne. Il est composé de 4 lignes horizontales, chacune pouvant afficher jusqu'à 16 caractères alphanumériques, des symboles ou des icônes.

Ces écrans sont couramment utilisés pour afficher des informations textuelles dans divers projets électroniques, tels que des dispositifs de contrôle, des systèmes de surveillance, des instruments de mesure, des interfaces utilisateur, etc.

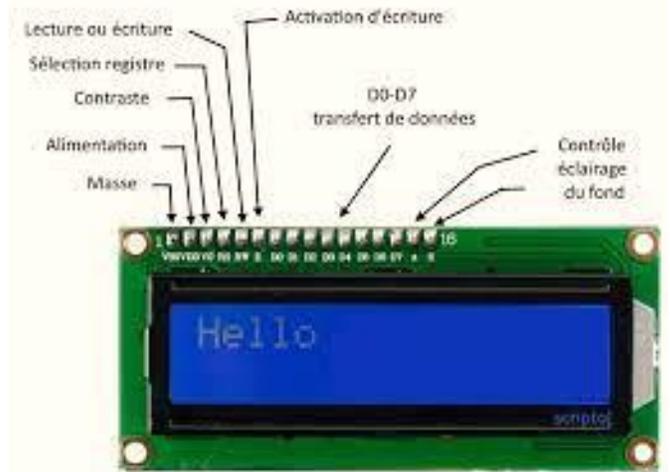


Figure 13 ECRAN LCD

II.8 LE CAPTEUR DE DISTANCE VL53L0X :

est un module de mesure de type Time-of-Flight (ToF) basé sur le VL53L0X de ST, offrant une précision de mesure allant jusqu'à 2 mètres. Il est contrôlé via une interface I2C et présente une consommation d'énergie relativement faible. Le VL53L0X est un capteur ToF qui intègre la technologie brevetée de deuxième génération FlightSense de ST. Contrairement aux capteurs de mesure conventionnels, le VL53L0X est capable de fournir une mesure précise de la distance quelle que soit la couleur et la réflectance de la cible, ce qui lui confère une meilleure capacité d'anti-interférence.



Figure 14 LE CAPTEUR DE DISTANCE VL53L0X

II.8.1 CARACTÉRISTIQUES

- Interface de communication I2C, contrôle du module marche/arrêt via les broches IO
- Traducteur de tension intégré, compatible avec une tension de fonctionnement de 3,3V/5V
- Fourni avec des ressources de développement et un manuel (exemples pour Raspberry Pi/Arduino/STM32)

II.8.2 SPÉCIFICATIONS

- Tension de fonctionnement : 3,3V/5V
- Dimensions : 20mm × 24mm
- Taille des trous de montage : 2,0 mm
- Distance de mesure : 30 ~ 2000 mm
- Précision de mesure : ±5% (mode haute vitesse), ±3% (mode haute précision)
- Temps de mesure (minimum) : 20 ms (mode haute vitesse), 200 ms (mode haute précision)
- Champ de vision : 25°
- Longueur d'onde du laser : 940 nm
- Température de fonctionnement : -20 ~ 70 °C

II.8.3 CONNEXIONS

- VCC : Alimentation 3,3V/5V
- GND : Masse
- SDA : Broche de données I2C
- SCL : Broche d'horloge I2C
- SHUT : Contrôle de mise hors tension, connecté à une broche IO
- INT : Sortie d'interruption, connectée à une broche IO

PARTIE PRATIQUE
PRESENTATION DE PROJET

CHAPITRE III : PARTIE PRATIQUE PRESENTATION DE PROJET

Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons la partie pratique de notre projet, où nous présenterons en détail la réalisation concrète de notre système embarqué.

Nous nous concentrerons sur la réalisation du projet, en mettant l'accent sur deux aspects clés : la programmation et le matériel utilisé. Dans la partie programmation, nous examinerons les variables d'état et les constantes PID, qui sont essentielles pour la mise en œuvre du contrôleur PID sur notre système. Nous décrirons comment ces éléments ont été utilisés pour ajuster la commande et obtenir des performances optimales.

En ce qui concerne le matériel utilisé, nous présenterons le prototype que nous avons construit pour notre système embarqué. Nous détaillerons les composants électroniques utilisés, tels que les capteurs, les actionneurs et les circuits de commande, ainsi que leur intégration avec la carte Arduino UNO. Nous expliquerons également les choix de conception que nous avons faits pour garantir un fonctionnement fluide et fiable du système.

Cette partie pratique nous permettra de visualiser et d'apprécier pleinement le fonctionnement de notre système embarqué, mettant en évidence les contributions significatives de la programmation et du matériel dans la concrétisation de notre projet.

II.1 LES CRITERES DE CHOIX DE LA CARTE ARDUINO UNO ET NANO

Dans le cadre de notre projet spécifique, les critères de choix de la carte Arduino UNO qui ont été pris en compte :¹²

1. Compatibilité avec les capteurs et les modules : Nous avons évalué la compatibilité de la carte Arduino UNO avec les capteurs et les modules nécessaires à notre projet. La carte UNO dispose d'un certain nombre de ports d'entrée/sortie analogiques et numériques, ce qui nous permet de connecter facilement les composants requis.

2. Puissance de calcul : Nous avons pris en considération les spécifications de puissance de calcul de la carte Arduino UNO pour nous assurer qu'elle est suffisante pour exécuter les tâches requises dans notre projet. La UNO dispose d'un microcontrôleur AVR ATmega328P, qui offre une puissance de calcul adéquate pour la plupart des applications courantes.

3. Facilité de programmation : La simplicité de programmation de la carte Arduino UNO était un critère important pour notre projet. La UNO utilise l'environnement de

¹² <https://www.robot-maker.com/ouvrages/tuto-arduino/choisir-carte-arduino-adaptee/>

développement intégré (IDE) Arduino, qui est convivial et largement utilisé. Cela facilite la programmation et la mise en œuvre de notre projet.

4. Support communautaire : Nous avons également pris en compte le support communautaire disponible pour la carte Arduino UNO. La UNO est l'un des modèles les plus populaires d'Arduino, ce qui signifie qu'il existe une communauté active et une grande quantité de ressources, de tutoriels et de forums en ligne. Cela nous permet de trouver de l'aide et des solutions aux problèmes éventuels plus facilement.

5. Coût : Le coût abordable de la carte Arduino UNO a également été pris en considération pour notre projet. En tenant compte de notre budget et des fonctionnalités requises, la UNO offrait un bon rapport qualité-prix pour notre application spécifique.

En prenant en compte ces critères spécifiques à notre projet, la carte Arduino UNO s'est avérée être un choix approprié. Sa compatibilité avec les composants nécessaires, sa puissance de calcul adéquate, sa facilité de programmation, son support communautaire et son coût abordable répondent à nos besoins et nous permettent de réaliser notre projet de manière efficace.

III.2 MODELISATION ET IDENTIFICATION DU SYSTEME

La modélisation et l'identification du système ont été des étapes importantes dans notre projet. Nous avons cherché à comprendre le comportement du système et à développer un modèle mathématique approprié pour le contrôle automatique.

Pour commencer, nous avons analysé le système physique dans lequel nous travaillons, à savoir le déplacement d'une balle en plastique à l'intérieur d'un tube transparent. Nous avons pris en compte les forces agissant sur la balle, telles que la gravité, la friction et la résistance de l'air, afin de déterminer les équations de mouvement correspondantes.

Ensuite, nous avons utilisé des techniques d'identification du système pour déterminer les paramètres clés du modèle mathématique. Cela impliquait la collecte de données expérimentales en faisant varier certains paramètres, tels que la vitesse d'alimentation et la position de départ de la balle. En analysant ces données, nous avons pu estimer les paramètres du modèle, tels que la masse de la balle, le coefficient de frottement et d'autres caractéristiques pertinentes.

Une fois le modèle identifié, nous avons procédé à sa modélisation mathématique. Nous avons utilisé des équations différentielles et des principes de physique pour décrire le comportement du système. Cela nous a permis de prédire le déplacement de la balle en fonction des entrées du système, telles que la tension appliquée aux actionneurs.

Ensuite, nous avons mis en place un contrôleur PID générique pour le contrôle automatique du système. Le contrôleur PID (proportionnel-intégral-dérivé) est un algorithme de contrôle classique largement utilisé. Nous avons adapté les paramètres du contrôleur en utilisant des méthodes de réglage appropriées, telles que la méthode de Ziegler-Nichols, afin d'obtenir une réponse précise, stable et rapide du système.

Enfin, nous avons intégré le modèle mathématique et le contrôleur PID dans notre code Arduino. Cela nous a permis de réaliser le contrôle automatisé du déplacement de la balle à l'intérieur du tube transparent. Nous avons dû mettre en œuvre des stratégies de codage pour garantir la précision, la stabilité et la vitesse requises pour obtenir un bon compromis de contrôle.

Dans les prochaines sections, nous présenterons plus en détail le matériel utilisé dans notre projet, puis nous aborderons les concepts théoriques fondamentaux liés à la loi de commande PID. Ensuite, nous mettrons en évidence certaines fonctionnalités spécifiques de notre code Arduino, montrant comment nous avons implémenté le modèle mathématique et le contrôleur PID pour atteindre nos objectifs de contrôle automatisé.

III.3 LA REALISATION DE PROJET

A/ PROGRAMMATION :

Le code commence par inclure les bibliothèques nécessaires pour l'écran LCD et définir des constantes et des variables:

```
//used libraries for LCD
#include <Wire.h>
#include "LiquidCrystal_I2C.h"
// setup of lcd
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4); //LCD adress
// defines pins numbers
const int trigPinHand = 9; //hand position ultrasonic sensor Trig
const int echoPinHand = 10; //hand position ultrasonic sensor Echo
const int trigPinBall = 4; //ball position ultrasonic sensor Trig
const int echoPinBall = 7; //ball position ultrasonic sensor Echo
const int fanPin = 3; // PWM output for motor control
const int tubeLightPin = 11; //PWM output for tube light control
const int led = 2; //output for the LED which represents the button state
const int button = 5; //input of the button state
// defines variables
unsigned long durationH;
double distanceH;
unsigned long durationB;
double distanceB;
```

```

double gas = 0;
double ref = 0; //position of hand
double ballPos = 0; //position of the ball in the tube
//Geometrical parameters of the system
const double upperGap = 1; //upper gap in cm
const double lowerGap = 10; //lower gap in cm
const double columnL = 38.5; //effective length of the tube in cm

```

Ensuite, le code définit les constantes PID et initialise certaines variables :

```

#define PREV_REF 70;
double previousRef = PREV_REF; // The initial desired reference is PREV_REF [%]
of the effective length of the tube
const double ballDiam = 4; // Diameter of the ball in cm
const int maxWaitTime = (int) (columnL * 3.5 / 0.034); // Maximal waiting time
for the ultrasonic sensors to receive the reflected wave

// Variables for the control loop
double controlP = 0;
double controlI = 0;
double controlD = 0;
double control = 0;
double err = 0;
double prevErr = 0;
double previousBallPos = 0; // The initial ball position, then updates
double prevControlI = 0; // Initial condition for integrator
double prevBallPos = columnL + upperGap - ballDiam / 2; // Used in control D
double storeHandPos[5]; // Array to make average of hand position

```

La fonction setup() est appelée une fois lorsque l'Arduino est allumé ou réinitialisé. Elle initialise les broches, configure leurs modes et démarre la communication série :

```

void setup() {
  pinMode(trigPinBall, OUTPUT); // Sets the trigPin as an Output for Ball
position sensor
  pinMode(echoPinBall, INPUT); // Sets the echoPin as an Input for Ball
position sensor
  pinMode(trigPinHand, OUTPUT); // Sets the trigPin as an Output for Hand
position sensor
  pinMode(echoPinHand, INPUT); // Sets the echoPin as an Input for Hand
position sensor

```

```
pinMode(fanPin, OUTPUT);      // Sets the fanPin to an output mode
pinMode(led, OUTPUT);        // Sets the LED pin to an output mode (used for
button state representation)
pinMode(button, INPUT);      // Sets the button pin to an input mode
```

Le code utilise la variable `countButton` pour déterminer l'état du système en fonction de l'entrée du bouton. Voici une explication de chaque état :

`countButton == 0` : Le système est ÉTEINT. La LED du bouton est éteinte, le moteur est arrêté (`motorPower(fanPin, 0)`), et la lumière LED est réglée sur une intensité de 0 (`ledPower(tubeLightPin, 0)`). L'affichage LCD affiche un message indiquant que le système est éteint et demande à l'utilisateur d'appuyer sur le bouton pour démarrer le système.

`countButton == 1` : Le système est ALLUMÉ mais ne fonctionne pas. La LED du bouton est allumée (`digitalWrite(led, HIGH)`). L'affichage LCD affiche un message indiquant que le système est allumé mais ne fonctionne pas.

`countButton == 3` : Le système est ÉTEINT en raison d'une instabilité. La LED du bouton est éteinte, le moteur est arrêté, et la lumière LED est réglée sur une intensité de 0. L'affichage LCD affiche un message indiquant que l'instabilité a été détectée et demande à l'utilisateur de réinitialiser le système.

Le bloc de code est encapsulé dans une fonction `loop()`, qui se répète indéfiniment. Elle vérifie l'état du bouton en utilisant `digitalRead(button)` et met à jour la variable `countButton` en conséquence. Selon la valeur de `countButton`, elle effectue les actions correspondantes et met à jour l'affichage LCD.

```
else if (countButton == 1)
{
    //System is ON, but not running
    digitalWrite (led, HIGH); //Turn on the button LED

    //Initial state LCD display
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("SYSTEM IS ON,");
    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print("BUT NOT RUNNING.");
}
else if (countButton == 3)
{
    //System is OFF due to instability
    digitalWrite(led, LOW); //Turn off the button LED
    motorPower(fanPin, 0); //Turn off the motor
    ledPower(tubeLightPin, 0);

    //Instability LCD display
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("INSTABILITY DETECTED.");
}
```

```

    lcd.setCursor(0, 2);
    lcd.print("PLEASE RESET THE");
    lcd.setCursor(0, 3);
    lcd.print("SYSTEM.");

    //Flag reset
    flagInstability = 0;
}
}

```

Constantes PID :

samplingTime : L'intervalle de temps auquel le régulateur PID fonctionne et effectue des mesures. intTimea, intTimeb, intTimec : Temps intégral pour les régions 'a', 'b' et 'c' respectivement. Ces valeurs déterminent la contribution du terme intégral dans chaque région. difTimea, difTimeb, difTimec : Temps dérivé pour les régions 'a', 'b' et 'c' respectivement. Ces valeurs déterminent la contribution du terme dérivé dans chaque région. Kpa, Kpb, Kpc : Coefficients proportionnels pour les régions 'a', 'b' et 'c' respectivement. Kia, Kib, Kic : Coefficients intégraux calculés en fonction des coefficients proportionnels et des temps intégraux. Kda, Kdb, Kdc : Coefficients dérivés calculés en fonction des coefficients proportionnels et des temps dérivés.

Variables d'état du bouton :

countButton : Une variable entière représentant la condition initiale du bouton. Son but n'est pas clair à partir de l'extrait de code fourni. buttonState : Une variable utilisée pour stocker l'état (LOW ou HIGH) d'un bouton. Elle est probablement utilisée pour contrôler la fonctionnalité du bouton dans le code.

Variables de calcul de durée :

t, t_p : Variables entières longues utilisées pour mesurer les intervalles de temps et les durées. Duration : Une variable entière longue utilisée pour stocker la durée calculée. t1, t2, t3 : Des variables entières longues supplémentaires qui sont probablement utilisées pour suivre des intervalles de temps spécifiques dans le code.

```

//PID constants
const double samplingTime = 0.0625; //sampling time in seconds
const double intTimea = 0.4 * 2.0;
const double difTimea = 0.02 * 0.77;
const double Kpa = 0.7 * 3;
const double Kia = Kpa / intTimea;
const double Kda = Kpa * difTimea;
const double intTimeb = 0.50 * 3.2;
const double difTimeb = 0.012 * 2.2;

```

```
const double Kpb = 0.35 * 2.0;
const double Kib = Kpb / intTimeb;
const double Kdb = Kpb * difTimeb;
const double intTimec = 0.5 * 3.2;
const double difTimec = 0.014 * 1.1;
const double Kpc = 0.45 * 1.65;
const double Kic = Kpc / intTimec;
const double Kdc = Kpc * difTimec;
// defines variables to control the button state
int countButton = 0; //initial condition
int buttonState = LOW;
```

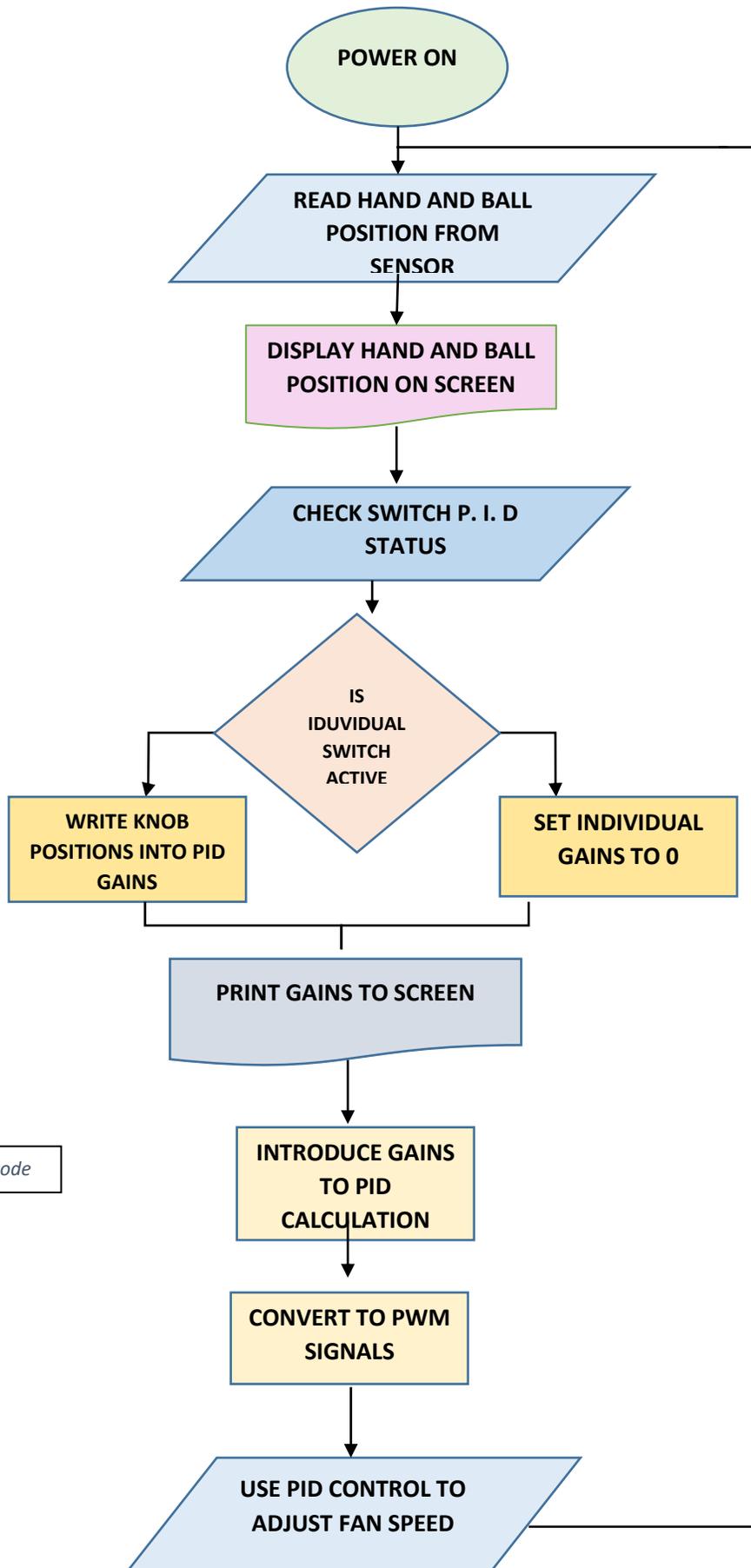


Figure 15 Organigramme de code

III.4 REALISATION DE PROJET:

1- Choix de l'arduino uno comme cpu principale

Nous avons choisi l'Arduino Uno comme CPU principal pour notre projet en raison de sa simplicité d'utilisation et de sa large compatibilité avec les différents composants électroniques. Son prix abordable et sa grande communauté de soutien ont également influencé notre décision. De plus, sa capacité à programmer facilement des fonctionnalités personnalisées nous permet d'adapter le projet à nos besoins spécifiques.

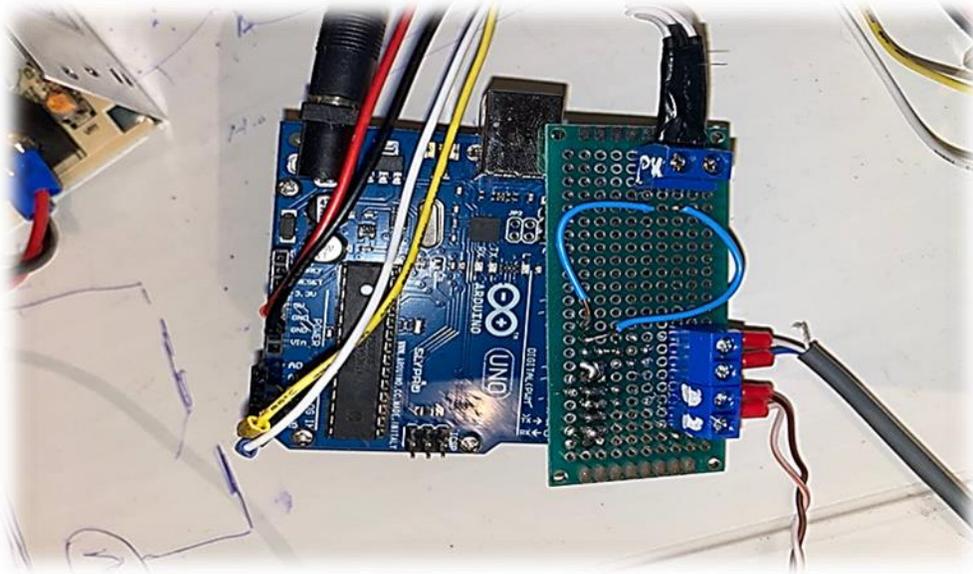


Figure 16 Arduino UNO – cpu- principale

2- Choix et configurations des capteurs

Pour choisir et configurer les capteurs de position **VL53L0X v2** dans notre projet, nous avons pris en compte plusieurs facteurs. Tout d'abord, nous avons évalué les spécifications techniques du capteur, telles que la portée, la précision et la consommation d'énergie, pour nous assurer qu'elles répondaient à nos besoins. Ensuite, nous avons examiné la compatibilité avec notre microcontrôleur, en nous assurant qu'il disposait des broches nécessaires pour communiquer avec les capteurs via le protocole I2C. Enfin, nous avons réalisé les configurations appropriées, telles que le choix du mode de mesure, la fréquence d'échantillonnage et les seuils de détection, en fonction des exigences spécifiques de notre projet.



Figure 17 Capteur laser VL53L0x V2 pour la position de balle

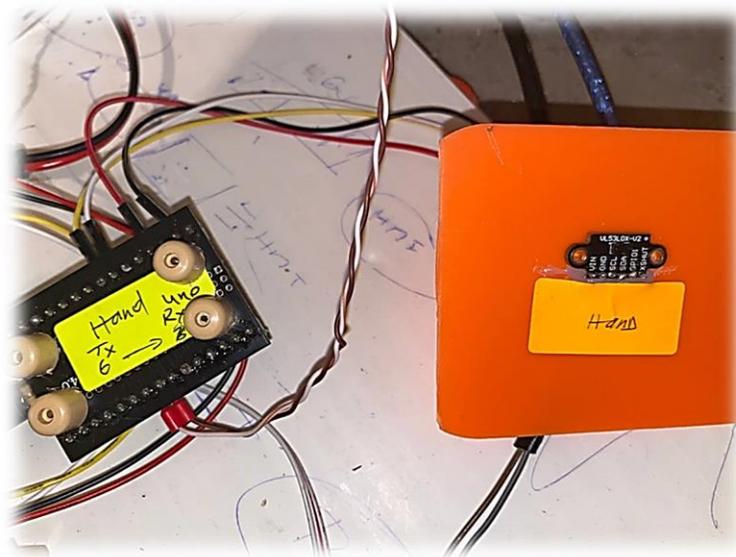


Figure 18 Capteur laser VL53L0x V2 pour la position de la main

3- Connexion des capteurs avec la carte

Pour connecter les capteurs à la carte Arduino :

1. Dans notre cas, les capteurs VL53L0X v2 utilisent le protocole I2C, qui nécessite les broches SDA (Data) et SCL (Clock) de l'Arduino.
2. Localisez les broches SDA et SCL sur la carte Arduino.
3. on a Connecter le fil de données (SDA) du capteur à la broche SDA de l'Arduino et le fil d'horloge (SCL) du capteur à la broche SCL de l'Arduino.

Une fois les connexions physiques effectuées, on a utilisé une bibliothèque Arduino appropriée pour communiquer avec les capteurs VL53L0X v2 via le protocole I2C et récupérer les données de position.

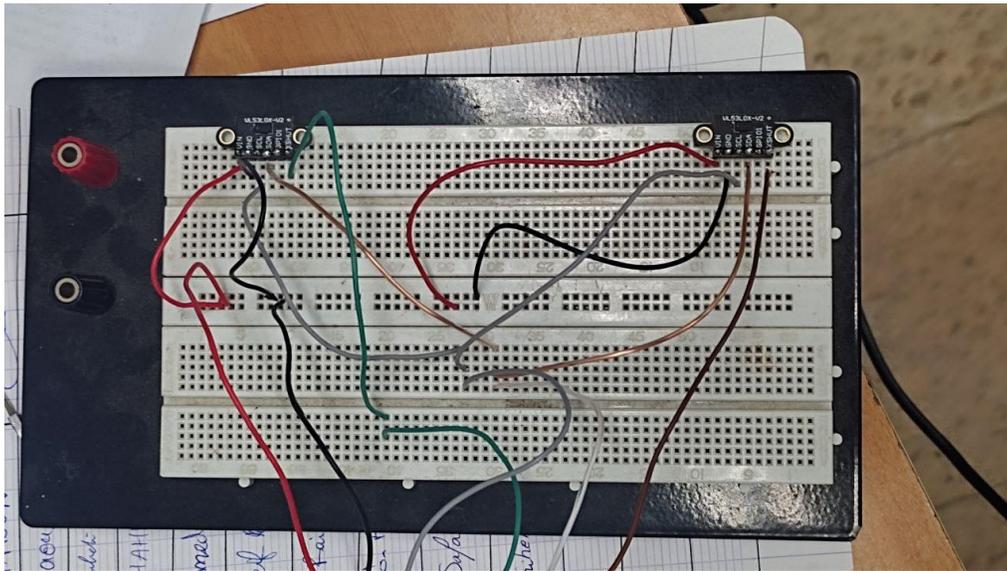


Figure 19 Connexion des capteurs avec la carte

Lors de l'étape d'étalonnage des capteurs, nous avons rencontré un problème avec un temps de réponse très lent. Pour résoudre ce problème, nous avons décidé d'ajouter une carte Arduino Nano dédiée à chaque capteur de position. Cela nous permet de traiter les données de manière plus efficace et de réduire le temps de réponse global du système. Ainsi, chaque capteur fonctionne de manière indépendante, ce qui améliore les performances globales du projet.

4- L'ajoute des arduino nano

Nous avons pris la décision d'ajouter deux cartes Arduino Nano supplémentaires à notre projet. Cela nous permettra de mieux gérer les capteurs VL53L0X v2 et d'améliorer les performances globales du système. Nous avons connecté chaque capteur à sa propre carte Arduino Nano et avons veillé à fournir une alimentation appropriée à chaque carte. En téléversant un code spécifique sur chaque carte, nous avons configuré les capteurs et établi la communication entre les différentes cartes Arduino Nano. Cette approche nous permet d'avoir une meilleure flexibilité et une réponse plus rapide dans le traitement des données des capteurs.

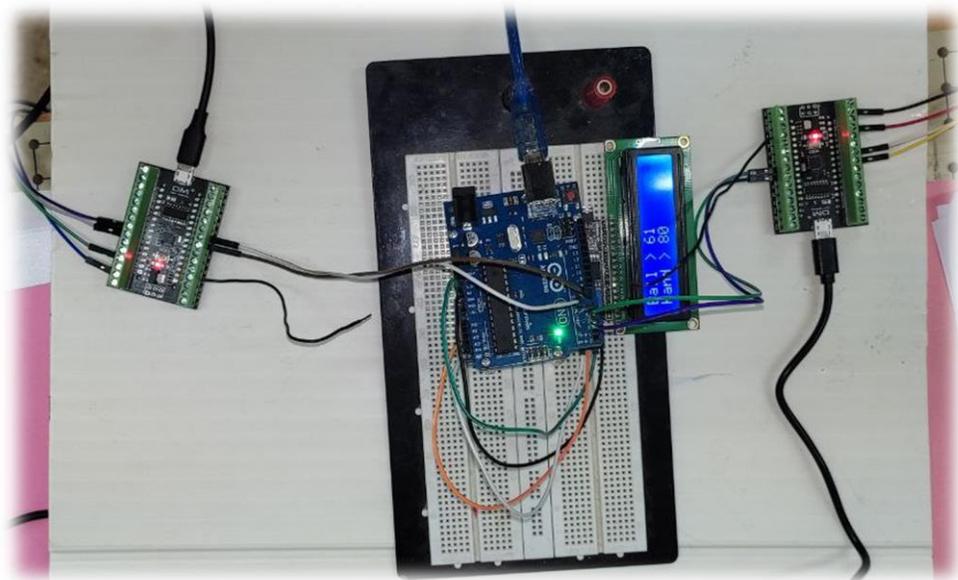


Figure 20 L'ajoute des arduino nano avec les capteurs

5- Installation de module LCD

nous avons ajouté un module LCD à notre projet pour améliorer l'affichage des informations.

On a Identifier les broches nécessaires pour connecter le module LCD à la carte Arduino et Connecter les fils de connexion entre le module LCD et la carte.

On a Inclure la bibliothèque LiquidCrystal dans le code Arduino pour faciliter la communication avec le module LCD et Initialiser le module LCD dans le code en spécifiant le nombre de colonnes et de lignes du module.

On a utilisé les fonctions de la bibliothèque LiquidCrystal pour afficher des messages, des valeurs ou des symboles sur le module LCD



Figure 21 Afficheur LCD



6- Ajouter et alimenter le moteur

Nous avons ajouté avec succès un moteur universel à notre projet.

Nous avons rassemblé le matériel nécessaire, y compris le moteur universel, un module de commande de moteur, une source d'alimentation appropriée, des fils de connexion et une plaque d'essai un relais statique.

Nous avons identifié les broches nécessaires pour contrôler le moteur universel. Cela comprenait les broches d'alimentation, les broches de commande de direction et les broches de commande de vitesse (PWM).

En utilisant les fils de connexion, nous avons réalisé les connexions entre le module de commande de moteur et la carte Arduino

Nous avons connecté la source d'alimentation au module de commande de moteur, en nous assurant de respecter les spécifications de tension et de courant nécessaires pour le moteur universel.

Pour contrôler le moteur, nous avons utilisé les broches appropriées dans notre code Arduino. Nous avons activé les broches de commande de direction dans le bon ordre pour contrôler la rotation du moteur et utilisé une broche PWM pour ajuster sa vitesse.

Après avoir téléversé le code sur la carte Arduino, nous avons vérifié que le moteur universel fonctionnait correctement. Nous avons testé sa direction et sa vitesse en fonction des instructions que nous avons codées.

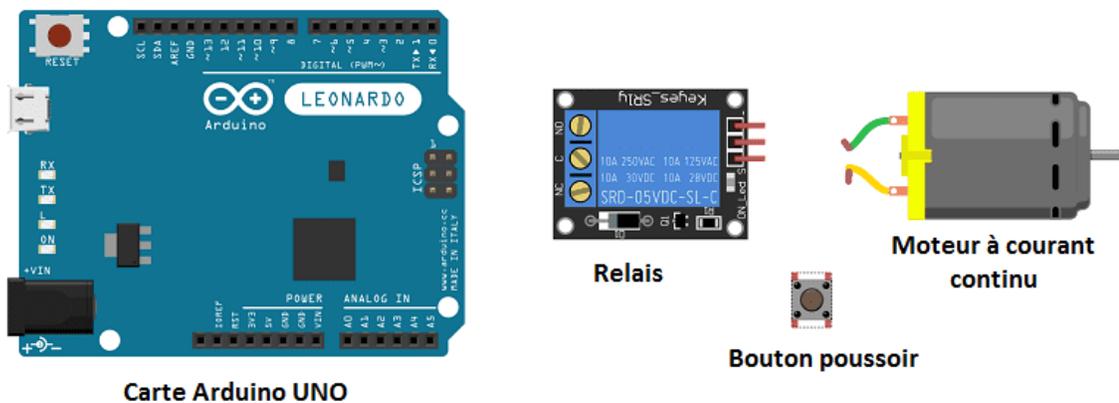


Figure 22 Ajouter et alimenter le moteur avec arduino et carte dessin

7- Réalisation du tube en plexiglas

Nous avons sélectionné un tube en plexiglas de la taille et de l'épaisseur appropriées en fonction de nos besoins. Nous nous sommes assurés que le diamètre du tube était compatible avec la balle.

En utilisant des outils adaptés tels qu'une scie à métaux ou une scie circulaire avec une lame adaptée au plexiglas, nous avons coupé le tube à la longueur souhaitée.

Nous avons ensuite ébavuré les bords coupés pour obtenir une finition lisse et sécurisée.

En utilisant de la colle spéciale pour plexiglas, nous avons assemblé les différentes parties du tube, en veillant à bien aligner les joints.

Nous avons laissé sécher la colle selon les instructions du fabricant pour assurer une fixation solide.

Enfin, nous avons vérifié l'intégrité et la solidité du tube en plexiglas avant de l'incorporer à notre projet.

8- Réalisation de la balle box en bois:

Nous avons choisi un matériau en bois approprié pour construire la balle box, tel que du contreplaqué ou du bois dur.

Nous avons ensuite assemblé les pièces en utilisant des vis, de la colle à bois ou d'autres méthodes de fixation appropriées.



Figure 23 Tube en plastique

III.4 PROTOTYPAGE

Nous avons réussi à créer un prototype fonctionnel pour notre projet. Ce prototype est une représentation initiale de notre système final et nous permet de tester et de valider nos idées et concepts.

Nous avons intégré deux Arduino Nano pour gérer la détection de la position de la balle, le contrôle du ventilateur via un signal PWM et le calcul du gain de contrôle PID en fonction des entrées de l'utilisateur. Le capteur laser est également connecté pour fournir des informations précises sur la position de la main et la balle.

Le prototype est une étape importante de notre projet, car il nous permet de mettre nos idées en pratique et de visualiser le fonctionnement du système. Nous continuerons à itérer et à améliorer le prototype en fonction des résultats de nos tests et des commentaires reçus.

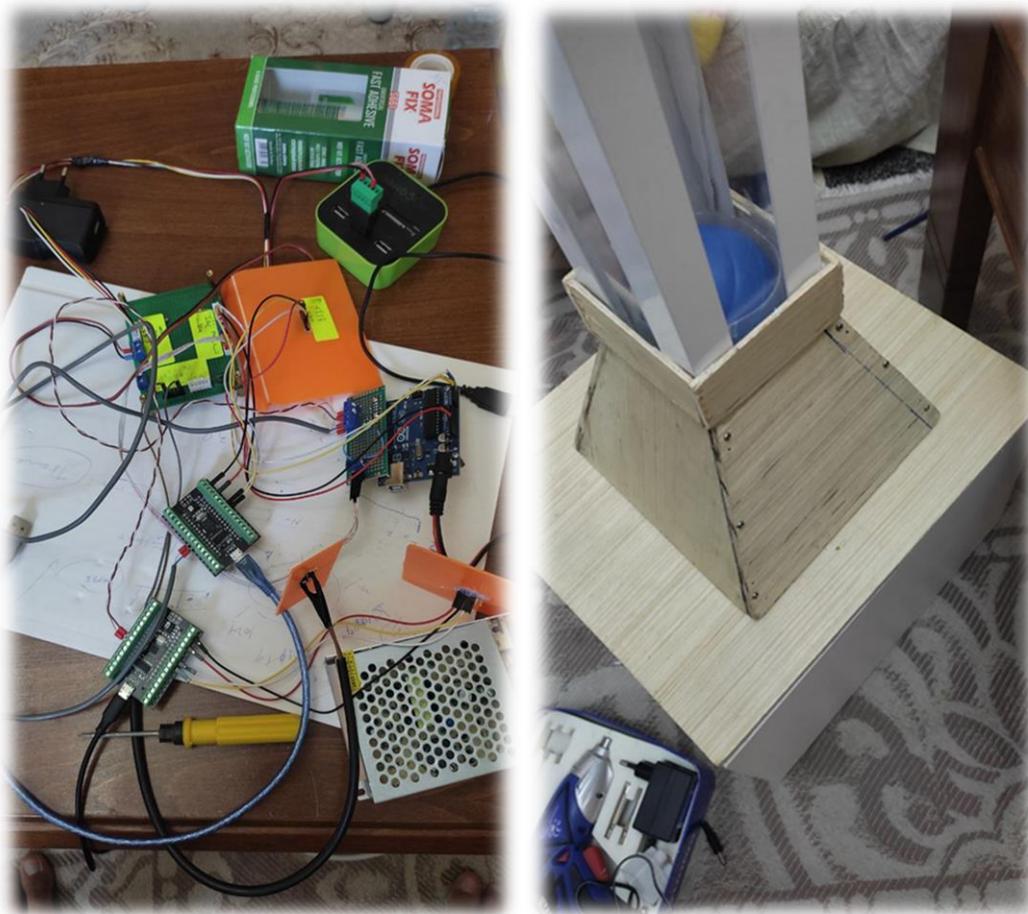


Figure 24 PROTOTYPE DE NOTRE PROJET

CONCLUSION PARTIELLE :

En conclusion, ce chapitre a présenté la partie pratique de notre projet, en mettant l'accent sur la modélisation et l'identification du système, ainsi que la réalisation concrète de notre projet. La programmation a été une étape clé, où nous avons choisi l'Arduino Uno comme CPU principal et configuré les capteurs nécessaires pour notre application. La connexion des capteurs à la carte Arduino a été réalisée avec soin, tout en rencontrant des problèmes qui ont été résolus en ajoutant des Arduino Nano supplémentaires.

Nous avons également procédé à l'installation du module LCD pour afficher les données importantes en temps réel. L'ajout et l'alimentation du moteur ont été réalisés pour permettre le fonctionnement du système. La réalisation du tube en plexiglas et de la balle box en bois ont permis de créer un environnement physique pour notre projet.

Enfin, nous avons réussi à mettre en place un prototype fonctionnel qui intègre tous les composants clés de notre système. Ce prototype nous a permis de tester et de valider les performances du système, ainsi que d'identifier des améliorations potentielles.

Ce chapitre pratique nous a permis de concrétiser notre projet, de transformer nos idées en réalité et de vérifier la faisabilité de notre concept. Les différentes étapes de programmation, de réalisation des connexions et de fabrication des composants physiques nous ont permis de progresser vers la réalisation de notre objectif principal. Nous sommes désormais prêts à passer à la phase suivante, qui consiste à affiner notre prototype, à effectuer des tests approfondis et à apporter les ajustements nécessaires pour parvenir à une version finale performante et aboutie.

CONCLUSION GENERAL

En conclusion générale de cette étude de projet, nous avons abordé différentes facettes liées à la régulation PID et à la construction d'un prototype associé. Dans le chapitre de l'état de l'art, nous avons exploré les principes fondamentaux des régulateurs PID et leur utilisation dans divers domaines. Nous avons également examiné en détail le matériel utilisé dans notre étude, tels que les cartes Arduino, la modulation de largeur d'impulsion (MLI), les moteurs universels, l'alimentation, les relais statiques et les écrans LCD. Le capteur de distance VL53L0X a également été présenté.

La construction du prototype a été réalisée en suivant plusieurs étapes pratiques, telles que la programmation, la configuration des capteurs, la connexion des composants et la réalisation de structures physiques. Nous avons rencontré des défis tout au long du processus, mais nous avons pu les surmonter grâce à des solutions appropriées.

Cette étude de projet nous a permis de comprendre les principes de base de la régulation PID, d'explorer le matériel nécessaire et de mettre en œuvre un prototype fonctionnel. Nous avons acquis des connaissances approfondies sur les concepts clés et avons pu appliquer ces connaissances à notre propre projet.

Cependant, il convient de noter que cette étude de projet n'est qu'une étape initiale. Des améliorations supplémentaires peuvent être apportées, notamment en ce qui concerne la précision de la régulation PID, l'optimisation des performances du système et l'ajout de fonctionnalités supplémentaires.

En conclusion, cette étude de projet a été enrichissante, nous permettant d'approfondir notre compréhension des régulateurs PID et de construire un prototype fonctionnel. Elle nous a également préparés pour les étapes suivantes, où nous pourrions continuer à développer et à améliorer notre projet.

BIBLIOGRAPHIE

- BEN KHERIF Oussama Etude Comparative en Simulation entre un Régulateur PID Classique et un Régulateur PID Intelligent p32-40
- CHALANE Idir. Optimisation des paramètres d'un PID par essais particuliers(PSO) p 1-3
- CHOUAF Fethi COMMANDE D'UN ONDULEUR TRIPHASE PAR MLI VECTORIELLE p 21
- Djebbari Aissa Amir Abdelhak Conception et réalisation d'un tapis roulant commandé par un système de détection à base d'une carte Arduino p 6
- Djebbari Aissa Amir Abdelhak Conception et réalisation d'un tapis roulant commandé par un système de détection à base d'une carte Arduino p 7
- Hamaloui ahmed abd erraouf - Implémentation et test en temps réel d'un bloc régulateur RST sur Le procédé industriel de régulation CE177 2-5
- <https://www.carnetdumaker.net/articles/utiliser-les-entrees-sorties-numeriques-dune-carte-arduino-genuino/>
- <https://www.robot-maker.com/ouvrages/tuto-arduino/choisir-carte-arduino-adaptee/>
- Kahhoul Aymen & Louaifi Abdennour , Simulation et Implémentation en Temps Réel d'un Onduleur de Tension Multi-niveaux par la Carte DSpace 1104 2022 – P 22
- KERCHOUCHE Lamia Régulation analogique P, PI et PID de la vitesse d'un moteur à courant continu d'un banc didactique 33-033.
- Melle : Adjimi Nadia Modélisation et commande d'un onduleur MLI Mémoire de fin d'études En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Systèmes Electriques & Automatique (SEA) 2009 P 13
- Sciences Industrielles Notion de correction des systèmes asservis Papanicola Robert Lycée Jacques Amyot p 1-6