

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE ELECTRONIQUE



DOMAINE:SCIENCE ET TECHNOLOGIE
FILIERE : ELECTRONIQUE
OPTION : SYSTEM EMBARQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

Par:

CHARAA Asma

SAOUCHI Assia

Intitulé

ETUDE ET REALISATION D'UN VEHICULE

AUTOBALANCE AVEC LA COMMANDE PID

Soutenu devant le jury composé de:

Nom et prénom Enseignant

.....

TABBAKH MOSTEFA
.....

.....

Université

Université

Université

Président

Rapporteur

Examineur

Année universitaire : 2020 /2021

REMERCIEMENTS

*A l'issue de ce travail, nous remercions avant tout DIEU, tout puissant, de m'avoir donné
volonté, courage et patience pour terminer ce travail.*

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Mr **TEBAKH Mostefa**, notre
encadreur, pour avoir accepté de diriger avec beaucoup d'attention et de soin notre mémoire.
nous lui avons très reconnaissant pour sa bienveillance, ses précieux conseils, sa patience et
sa disponibilité. nous avons espéré qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.*

*En fin nous tenons à remercier tous ceux qui d'une manière ou d'une
autre ont participé dans la réussite de ce travail.*

A mon très cher père...

Aucune dédicace ne saurait exprimer à sa juste valeur tout l'amour, le respect, l'attachement et la reconnaissance que je te porte.

Tu m'as enseigné la droiture, le respect et la conscience du devoir.

Puisse Dieu, le tout puissant, te procurer santé, bonheur et longue vie...

A ma très chère mère...

A la plus merveilleuse des mères.

J'espère réaliser, en ce jour, l'un de tes rêves.

Aucun mot ne saurait exprimer mon respect, ma considération et l'amour que je te porte.

Puisse Dieu le tout puissant te donner santé et longue vie afin que je puisse te combler à mon tour...

A l'homme de ma vie

Cet homme exceptionnelle !

Tu as toujours été pour moi un exemple du père respectueux, honnête, de la personne méticuleuse.

A mes chères frères et mes chères sœurs,

A notre fraternité qui m'est très chère.

Avec mon grand amour et toute ma tendresse, je vous souhaite un avenir plein de joie, de santé et de réussite.

A les filles de ma sœur ,:

Je vous souhaite une vie remplie de bonheur et tout le meilleur pour les deux filles de ma sœur

A l'homme de ma sœur : Je vous souhaite une bonne vie pour l'homme de ma sœur.

A leurs familles,

Je vous souhaite une longue et heureuse vie.

A tous mes grands amis (es) qui se reconnaîtront,

En souvenir des moments passés ensemble, je vous dédie ce travail en témoignage de mon amitié sincère et durable.

,,,,,,,,,,,,,,,, et a tous les amis.

A le personne qui as enseigné la vie, je vous souhaite un avenir plein de joie et une longue et heureuse vie

ASSIA

Dedication

I dedicate this work,

To my mom and dad

I am so blessed and honored to have you both as my parents. I want to show my thankfulness for your love and support over the years. 'Thank you' is such a small word to say to you both after all the precious blessings you both gave me. Be it the opportunity for my education to supporting my dreams; you both always believed in me. I owe my everything to you both.

To my dearest brothers

*You all are so lucky to having **me** as a sister*

Thank you...

To the kindest, sweetest sister

You are my sounding board, my confidante, my keeper of secrets and my best friend. I just want you to know how special you are to me and what you mean to me. I could not ask for a better friend, for a better encourager, you have made a positive difference in my life.

To all my friends, colleagues and people that I know.

With love,

ASMA

Sommaire

Introduction Générale	1
-----------------------------	---

Chapitre 01 : Généralité sur les Robots

1.1. Introduction	2
1.2. Définition d'un Robot	2
1.3. Domaines d'utilisation de robot	2
1.3.1. Les robots domestiques	2
1.3.2. Les robots en médecine et chirurgie	2
1.3.3. Les robots industriels.....	2
1.3.4. Les robots militaire.....	3
1.4. Différent Type De Robot.....	3
1.4.1. Les Robots mobiles.....	3
1.4.2. Les caractéristiques de la robotique mobile.....	3
a. Robot unicycle.....	3
b. Robot tricycle.....	4
c. Robot voiture.....	4
d. Robot omnidirectionnel.....	5
1.4.3. Les Robots Fixés.....	6
1.4.4. Classification Des Robots Fixés.....	6
a.Robot Cartésien.....	7
b.Robot Cylindrique.....	7
c.Robot Sphérique.....	8
d .Robot SCARA.....	8
e. Robot Parallèle10.....	9
f .Robot Anthropomorphe.....	9
1.5. Conclusion.....	10

Chapitre 2 :Etat de l'art d'une pendule inversé

2.1.Introduction.....	11
2.2 .Description d'un pendule inverse.....	11
2.3 .Intérêt de l'étude d'un pendule inverse.....	12

2.3.1. Le pendule inverse classique.....	12
2.3.2 Le double pendule inverse.....	13
2.3.3. Le pendule inverse de Furuta.....	14
2.3.4. Le pendule inverse stabilisé par volant d'inertie.....	15
2.3.5. Le pendule inverse sur de roues.....	16
2.4. Modélisation et équation dynamique.....	18
2.4.1 Energie cinétique du système en mouvement.....	19
2.4.2. Energie potentielle du système.....	20
2.4.3. Equation de Lagrange.....	21
2.5.Conclusion.....	22

Chapitre 03 :COMMANDE PID

3.1 Introduction.....	23
3.2 Principe de fonctionnement.....	23
3.3 Définition des cordonnés.....	24
3.3.1. Dérivation des équations dynamiques du mouvement.....	26
3.3.2. Derivation du lagrangien.....	26
3.3.3. Système en boucle ouverte.....	27
3.3.4. Système en boucle fermé.....	27
3.3.5 Commande d'un système en boucle fermé.....	28
3.3.6 CommandePID.....	29
3.4.Implémentation de PID.....	30
3.4.1 Le régulateur proportionnel.....	30
3.4.2 Le régulateur proportionnel intégral.....	30
3.4.3 Le régulateur proportionnel dérivé	31
3.4.4 Le régulateur proportionnel intégral dérivé.....	32

3.4.5.Régler les coefficients d'un PID.....	32
3.5.Application de la commande PID à un système de pendule inverse.....	34
3.6.Schéma de fonctionnement.....	35
3.7:Conclusion.....	35

Chapitre 04 : Présentation de matériel et assemblage de robot.

4.1 Introduction :.....	36
4.2 La carte Arduino:.....	36
4.2.1 Logicielle :.....	36
4.2.2 Les types des cartes arduino.....	38
4.2.2.1 Arduino Uno :.....	38
4.2.2.2 Arduino nano :	39
4.2.2.3 Arduino Mega2560:.....	40
4.3 Les moteurs:.....	40
4.4 Pont-h L298.....	40
4.4.1 Connexions.....	41
4.5 Les capteurs.....	42
4.5.1Le MPU6050	42
4.6 Communication avec les périphériques Arduino.....	43
4.6.1 Bus I2C:	43
4.6.2 Utilisation d'I2C avec Arduino.....	45
4.7 Modulation de largeur d'impulsion (PWM).....	46
4.8 Hardware.....	46
4.8.1 Réalisation des châssis	46
4.9 Software.....	49

4.10 Conclusion.....	50
Conclusion générale.....	51

List de figure

Chapitre 01:

- Figure 1. 1: Robot de type unicycle.
- Figure 1. 2: Robot de type tricycle.
- Figure 1. 3: Robot de type voiture.
- Figure 1. 4: Robot de type omnidirectionnel.
- Figure 1. 5: Schéma de robot Cartésien.
- Figure 1. 6: Robot Cartésien Toshiba.
- Figure 1. 7: Schéma de robot Cylindrique.
- Figure 1. 8: Robot Seiko.
- Figure 1. 9: Robot FANUC
- Figure 1. 10: Schéma de robot SCARA.
- Figure 1. 11: Robot Sankyo.
- Figure 1. 12: Robot COMAU.
- Figure 1. 13: robot Anthropomorphe.
- Figure 1. 14: Robot Kawasaki.

Chapitre 02:

- Figure 2. 1 : Le robot pendule inverse.
- Figure 2. 2 : Photo d'un pendule inversé classique avec son schéma de principe.
- Figure 2. 3 : Pendule inversé double en cascade avec son schéma de principe.
- Figure 2. 4 : Pendule double inverse parallèle avec son schéma de principe.
- Figure 2. 5 : Pendule inverse de Furuta et son schéma de principe.
- Figure 2. 6: pendule inverse stabilise par volant d'inertie.
- Figure 2. 7 : Pendule inverse sur de roues et son schéma de principe.
- Figure 2. 8 : Photo du Joe-le-Pendule.
- Figure 2. 9 : Photo du Segway
- Figure 2. 10 : schéma d'une pendule inverse sur un chariot.

Chapitre 03:

- Figure 3. 1 : Conception du sous-système mécanique du robot.
- Figure 3. 2: Schéma de system d'une boucle ouverte.
- Figure 3. 3 : Schéma de fonctionnement d'une boucle ferme.
- Figure 3. 4: Schéma synoptique d'une commande d'une boucle fermée.

List de figure

Figure 3. 5:Schema d'échelon d'un régulateur proportionnel .

Figure 3. 6: Schéma d'échelon d'un régulateur proportionnel intégral.

Chapitre 04 :

Figure 4. 1 : le logiciel arduino ide.

Figure 4. 2 : Icones de l'IDEarduino.

Figure 4. 3 :L'éditeur de code.

Figure 4. 4 : La console de débogage.

Figure 4. 5la carte arduino UNO.

Figure 4. 6 la carte arduino nano.

Figure 4. 7la carte arduino Mega2560.

Figure 4. 8 Photo d'un moteur a CC.

Figure 4. 9 photo d'un L298N.

Figure 4. 10 Montage de circuit L298N.

Figure 4. 11 : Puce Mpu6050.

Figure 4. 12Les lignes SDA et SCL.

Figure 4. 13 Les composent utilisé.

Figure 4. 14Schema de montage de robot.

Figure 4. 15 Version finale de robot.

Figure 4. 16Explication de la 1ère fenêtre de l'Arduino IDE.

Listes des Acronymes et Symboles

A	Ampère.
Cf	Couple de frottement
Cm	Couple moteur
CMS	Composant monté en surface.
DDL	Degré de liberté
DMP	Digital Motion Processor.
E	Force électromotrice (Volt).
EPFL	Ecole Polytechnique fédérale de lausanne.
EPROM	Erasable Programmable Read Only Memory.
f	Constant de frottement
I2C	Inter-integrated Circuit.
INT	INTEger, entier. Groupe de 16 bits, 2 octets groupés,
J	Moment d'inertie
k	Une constante caractéristique du moteur.
kc	Constant de couple
LONG	"entier long". Groupe de 32 bits, 4 octets groupés.
LOOP	Boucle.
LOW	Bas.
MEMS	Micro-electroMechanical systems
OUT	Souvent l'abréviation pour OUTput, Sortie.
OUTPUT	Sortie.
PID	Proportionnel intégral dérivé
PIN	Broche.
POWER	Puissance, alimentation.
PROM	Programmable Read Only Memory.
PWM	Pulse Width Modulation.
PWR	Power
R	Résistance interne du bobinage (Ohm).
READ	Lire.
RELAY	Relais.
RESISTOR	Résistance.
RX	Receive, réception.
SCL	Serial Clock Line

Listes des Acronymes et Symboles

SDA	Serial Data Line
SENSOR	Capteur
SERIAL	Série.
SETUP	Initialisation.
TX	Abréviation pour Transmit, transmission.
U	Tension d'alimentation du moteur (Volt).
USB	Universal Serial Bus.
V	Volt.
WIRE	Câble, fil.
ω	Vitesse angulaire en rad/s.

Introduction générale:

Robot auto-équilibrage a été énormément reconnu qui est basé sur un dispositif électronique et le contrôle intégré et étant utilisé comme transporteur humain dans de nombreux domaines.

L'équilibrage des robots signifie la capacité du robot à s'équilibrer sur ses deux roues sans tomber. Il est basé sur la configuration du pendule inversé qui repose sur les dynamiques d'un système d'équilibrage pour équilibrer. Un pendule inversé est un problème de contrôle classique. Le système est non linéaire et instable avec un signal d'entrée et plusieurs signaux de sortie. Afin d'équilibrer au robot à pendule inversé à deux roues, il est nécessaire d'avoir des informations précises sur l'angle d'inclinaison en direct de l'utilisation d'un unité de mesure (MPU6050) et comparer cet angle avec l'angle cible qui entrée dans les paramètres du PID (K_p, K_i, K_d) Un contrôleur PID peut être incorporé pour contrôler l'angle de pendule, car il s'agit d'un système SISO (Single-Input Single-Output).

Chapitre 01 :

**Généralité sur les
Robots**

1.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons faire une description des robots où nous donnerons des définitions sur les différents types des robots et les principes et fonctionnement.

1.2. Définition d'un Robot :

Le robot est un dispositif électromécanique avec des contrôleurs capables de traiter des informations de l'environnement de manière automatique avec des capteurs et d'exécuter des opérations selon un programme.

1.3. Domaines d'utilisation de robot :

Utilisé dans une plusieurs domaines :

1.3.1. Les robots domestiques :

Les robots domestiques sont utilisés par exemple en vaisselle, en repassage, en nettoyage et en cuisine. Ils peuvent également être utilisés dans le domaine de la restauration et dans la construction.

1.3.2. Les robots en médecine et chirurgie :

Un robot médical est un système robotique utilisé dans le cadre d'une application thérapeutique, par exemple lors d'une chirurgie ou au cours d'un programme de réhabilitation neuromotrice. Il fait partie du domaine de la cobotique.

1.3.3. Les robots industriels :

Les Robots industriels sont des robots utilisés dans un environnement de fabrication industrielle. Ils sont utilisés dans la fabrication des automobiles, des composants et des pièces électroniques, des médicaments et de nombreux produits.

1.3.4. Les robots militaire

Un robot militaire, aussi appelé arme autonome, est un robot, autonome ou contrôlé à distance, conçu pour des applications militaires. Les drones sont une sous-classe des robots militaires.

1.4. Différent Type De Robot :

Les robots peuvent être classés en fonction de l'environnement dans lequel ils opèrent :

1.4.1. Les Robots mobiles :

Les robots mobiles sont en mesure de calculer les commandes des actionneurs du système permettant de réaliser le mouvement planifié. Le robot planifie sa propre trajectoire. Il suit le chemin prévu (trajectoire globale) tout en évitant les obstacles non cartographiés sur le chemin.

1.4.2. Les caractéristiques de la robotique mobile :

- La perception de l'environnement grâce aux capteurs.
- Une capacité d'adaptation en cas de changement de situation dans l'environnement.
- Une navigation, une planification et des actions autonomes.
- Un logiciel/une programmation axée sur les tâches.

a. Robot unicycle :

Un robot de type unicycle est actionné par deux roues indépendantes, il possède éventuellement des roues folles pour assurer sa stabilité. Son centre de rotation est situé sur l'axe reliant les deux roues motrices.

C'est un robot non-holonyme, en effet il est impossible de le déplacer dans une direction perpendiculaire aux roues de locomotion.

Sa commande peut être très simple, il est en effet assez facile de le déplacer d'un point a un autre par une suite de rotations simples et de lignes droites.

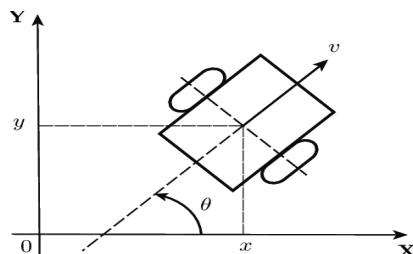


Figure 1.1: Robot de type unicycle.

b. Robot tricycle :

Un robot de type tricycle est constitué de deux roues fixes placées sur un même axe et d'une roue centrée orientable placée sur l'axe longitudinal. Le mouvement du robot est donné par la vitesse des deux roues fixes et par l'orientation de la roue orientable. Son centre de rotation est situé à l'intersection de l'axe contenant les roues fixes et de l'axe de la roue orientable.

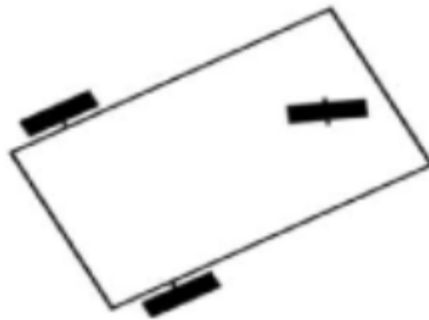


Figure1.2:Robot de type tricycle.

c. Robot voiture :

Un robot de type voiture est semblable au tricycle, il est constitué de deux roues fixes placées sur un même axe et de deux roues centrées orientables placées elles aussi sur un même axe.

Le robot de type voiture est cependant plus stable puisqu'il possède un point d'appui supplémentaire.

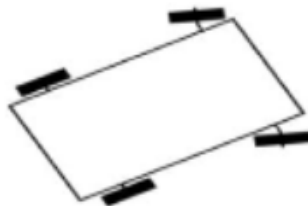


Figure1.3: Robot de type voiture.

d. Robot omnidirectionnel :

Un robot omnidirectionnel est un robot qui peut se déplacer librement dans toutes les directions. Il est en général constitué de trois roues décentrées orientables placées en triangle équilatéral.

L'énorme avantage du robot omnidirectionnel est qu'il est holonome puisqu'il peut se déplacer dans toutes les directions. Mais ceci se fait au dépend d'une complexité mécanique bien plus grande.

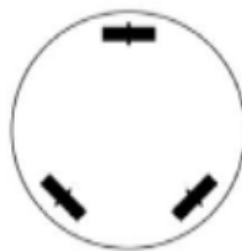


Figure1.4: Robot de type omnidirectionnel.

Nous pouvons observer dans le tableau ci-dessous un récapitulatif des avantages et des inconvénients des différents types de robots à roues.

Type du robot	Avantage	Inconvénient
Unicycle	* Stable * Rotation sur soi-même * Complexité mécanique faible	* Non-holonome
Tricycle	* Complexité mécanique Modérée	* Non-holonome * Peu stable * Pas de rotation sur soi-même
Voiture	* Stable * Complexité mécanique modérée	* Non-holonome * Pas de rotation sur soi-même
Omnidirectionnel	* Holonome * Stable * Rotation sur soi-même	* Complexité mécanique Importante

Tableau 1. Les avantages et des inconvénients des différents types de robots à roues

1.4.3. Les Robots Fixés :

Les robots fixes sont principalement des manipulateurs robotiques industriels qui fonctionnent dans des environnements bien définis adaptés aux robots. Les robots industriels effectuent des tâches répétitives spécifiques telles que des pièces à souder ou à peindre dans des usines de fabrication automobile. Avec l'amélioration des capteurs et des dispositifs d'interaction homme-robot, des manipulateurs robotiques sont de plus en plus utilisés dans un environnement moins contrôlé comme la haute précision chirurgicale.

1.4.4. Classification Des Robots Fixés :

Il peut être classé en :

a. Robot Cartésien :

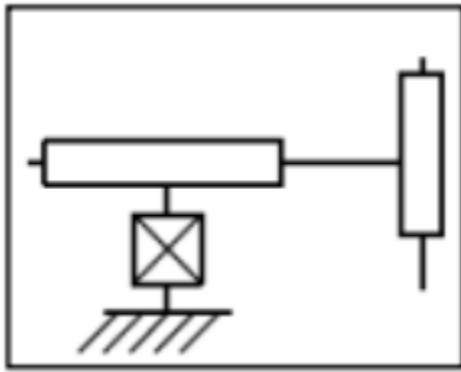


Figure 1.5: Schéma de robot Cartésien.

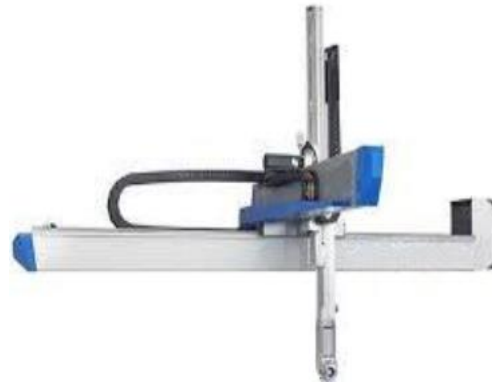


Figure 1.6: Robot Cartésien Toshiba.

Caractéristiques :

3 axes \perp 2 à 2, série, 3 DDL.

Très bonne précision.

Lent.

b. Robot Cylindrique :

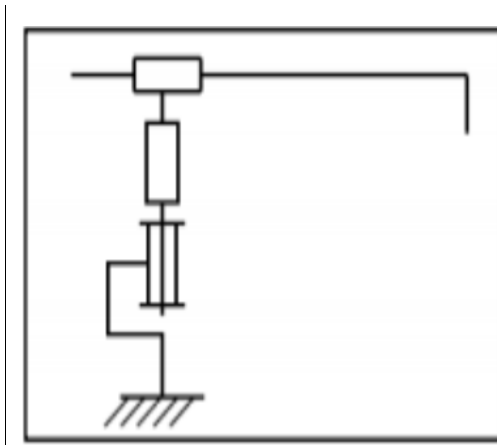


Figure 1.7: Schéma de robot Cylindrique.



Figure 1.8: Robot Seiko.

Caractéristiques :

3 axes, série, 3 DDL.

Espace de travail cylindrique.

Très rapide.

c. Robot Sphérique :



Figure1.9 : Robot FANUC

Caractéristiques :

3 axes, série, 3 DDL.

Espace de travail sphérique.

Grande charge utile

d .Robot SCARA :

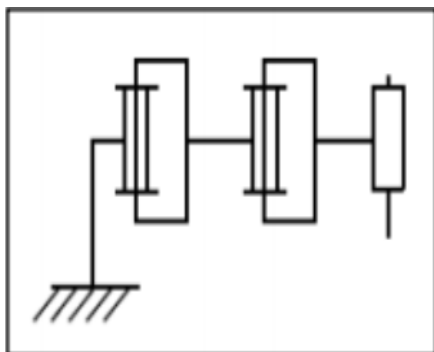


Figure1.10: Schéma de robot SCARA.



Figure1.11: Robot Sankyo.

Caractéristiques :

3 axes, série 3 DDL.

Espace de travail cylindrique.

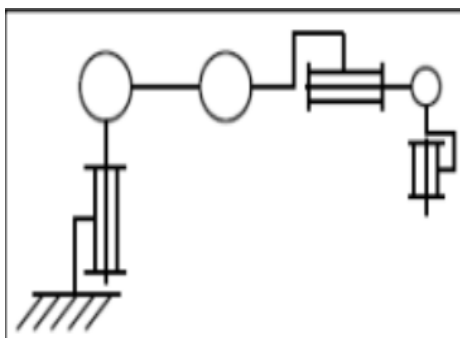
Précis.

e. Robot Parallèle :**Figure1.12:** Robot COMAU.**Caractéristiques :**

Plusieurs chaînes cinématiques en parallèle.

Espace de travail réduit.

Précis (grande rigidité de la structure).

f. Robot Anthropomorphe:**Figure1.13:** robot Anthropomorphe.**Figure1.14:** Robot Kawasaki.**Caractéristiques :**

Reproduisent la structure d'un bras humain.

6 axes, série, 6 DDL.

1.5. Conclusion :

les robots sont des prototypes ils sont devenu important dans notre vie et auront une place dans l'avenir proche, ces machines facilitent de plus en plus la vie de l'être humain, ce qui consolide cette relation humain-robot.

Chapitre 02 :
Etat de l'art d'une
pendule inversé

2.1.Introduction :

Dans ce chapitre la en va parler de pendule inverse, sa divers type, le principe de fonctionnement ainsi qu'à sa modélisation dynamique qui est déduite à partir de formalisme d'Euler Lagrange.

2.2.Description d'un pendule inverse :

Un pendule inversé est un système mécatronique, automatique composé d'une tige posée en position d'équilibre instable verticale sur une base qui peut être fixe ou mobile. La dynamique non linéaire et instable de ce système physique a fait de lui un système très intéressant et largement étudié dans la communauté des automaticiens, électroniciens et mécaniciens, ce qui explique l'existence de plusieurs aspects et formes de pendules inversés.

Le Robot pendule inversé est un système mécatronique consistant en un pendule inversé mobile, **Figure2.1**. Ce système présente plusieurs défis dont le fait que celui-ci est un système instable et requiert donc un correcteur pour le stabiliser en le maintenant en équilibre.

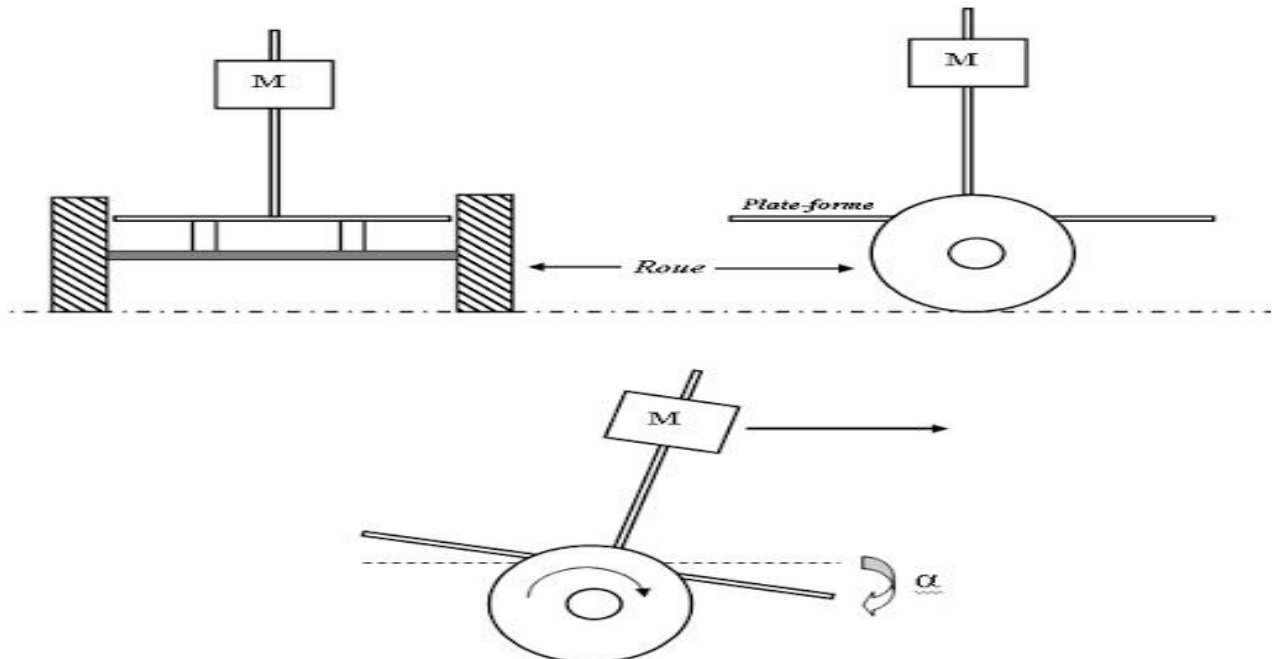


Figure 2. 1 : Le robot pendule inverse.

2.3. Intérêt de l'étude d'un pendule inverse :

Dans la robotique, L'étude du pendule inversé est très important .Il y a plusieurs raisons à cela :

- L'homme est un pendule double inversé dont les deux axes de rotation principaux sont les chevilles et les hanches. Quand nous sommes en position debout, nos articulations travaillent sans arrêt pour nous y maintenir. Les spécialistes qui travaillent à la réalisation de prothèses pour les hanches sont amenés à utiliser le modèle du pendule double inversé pour calculer l'ensemble des contraintes qui sont soumises à la prothèse.
- La robotique utilise le principe du pendule inversé, en particulier dans de nouveaux moyens de transports à 2 roues comme le segway qui permet d'avancer en se penchant en avant.
- On voit apparaître des moyens de locomotion dotés de deux roues montées sur un même axe sur lequel on est en position debout. On accélère en se penchant en avant et en ralenti en se penchant en arrière. Le système est le même que le pendule inversé. La stabilité est aussi assurée par des gyroscopes mais nous n'entrerons pas dans ce genre de détails.

2.3.1 Le pendule inverse classique :

Ce système mécanique consiste en un chariot de masse M qui peut se déplacer horizontalement et librement sur un rail de guidage en supportant une tige de masse m libre en rotation autour d'un pivot.

L'application d'une force $f(t)$ va provoquer le déplacement du chariot et la déviation du pendule d'un angle $\theta(t)$ par rapport à la verticale. Ceci constitue un système mécanique sous-actionné à deux degrés de liberté et un seul actionneur.

Dans le cas de stabilisation d'un tel système, le but de la commande serait de ramener le pendule à partir d'une position initiale à sa position d'équilibre instable et le maintenir autour de cette position.

pendule inversé

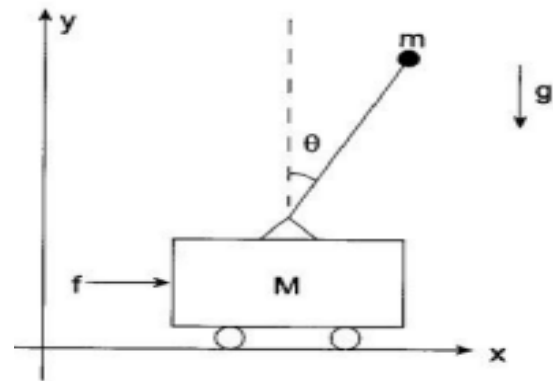
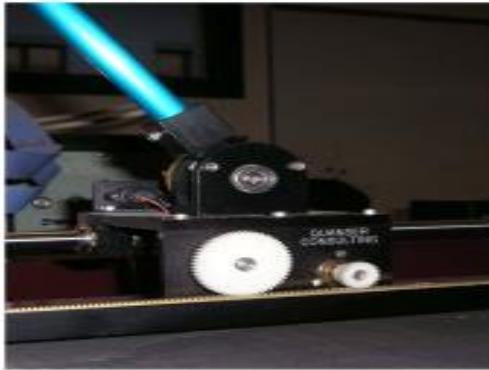


Figure 2. 2 : Photo d'un pendule inversé classique avec son schéma de principe.

2.3.2 Le double pendule inverse :

Pour ce type, on peut distinguer deux architectures différentes :

❖ En cascade :

Il a le même principe que le pendule simple, la seule différence réside dans le fait qu'il dispose de deux tiges en rotation libre. L'une tourne autour du pivot à la base, d'un angle $\theta_1(t)$ et l'autre avec l'angle $\theta_2(t)$ autour de la deuxième articulation entre les deux tiges.

Le but de la commande pour ce système consiste à stabiliser les deux tiges autour de la verticale et les maintenir autour de ce point d'équilibre instable.

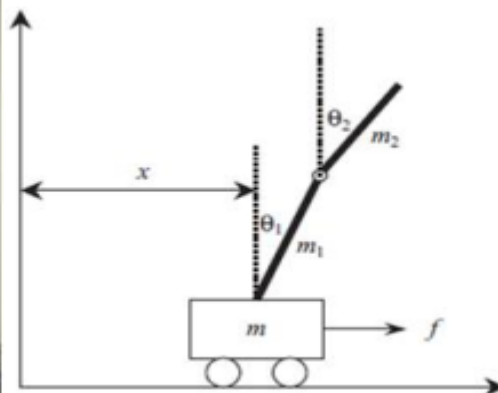
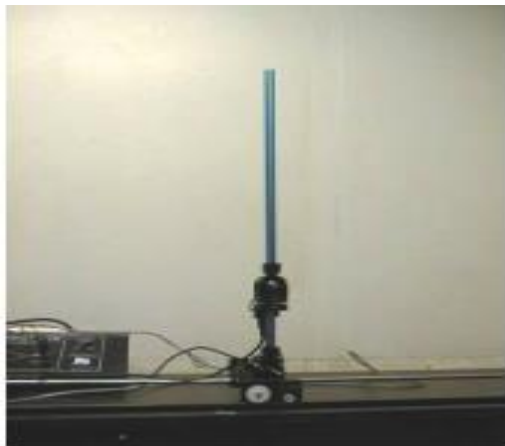


Figure 2. 3 : Pendule inversé double en cascade avec son schéma de principe.

❖ **En parallèle :**

Dans ce cas, le chariot supporte deux tiges indépendantes : une tige L de longueur l_L et une autre B de longueur l_B , les deux en rotation libre. Le déplacement $x(t)$ de la base va engendrer une déviation d'un angle θ_L par rapport à la verticale sur la première tige et d'un angle θ_B par rapport à la verticale sur la deuxième tige.

Le but de la commande consiste à stabiliser les deux tiges autour de la verticale au point d'équilibre instable et les maintenir même dans le cas de présence de perturbations externes.

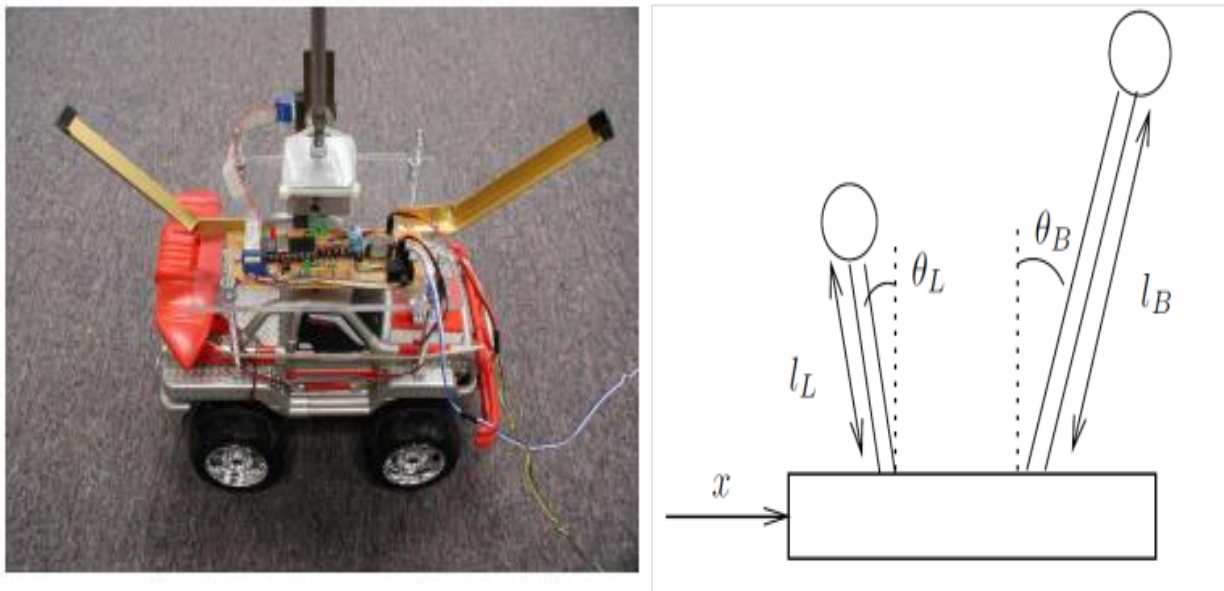


Figure 2.4 : Pendule double inverse parallèle avec son schéma de principe.

2.3.3 Le pendule inverse de Furuta :

Ce pendule a été conçu par K. Furuta. Il est composé d'un bras actionné en rotation dans le plan horizontale, à son extrémité vient s'ajouter un pendule inversé monté en équilibre instable. La rotation infinie du bras assure la stabilisation et le maintien du pendule autour de la verticale au point d'équilibre instable.

pendule inversé

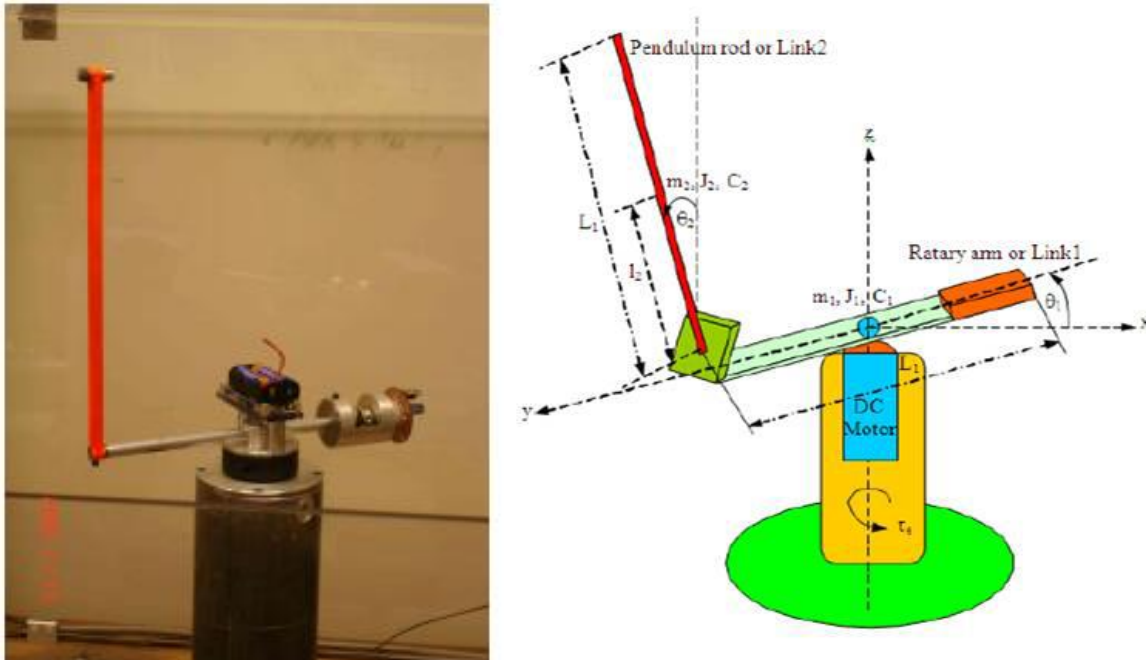


Figure 2. 5 : Pendule inverse de Furuta et son schéma de principe.

2.3. 4 Le pendule inverse stabilisé par volant d'inertie :

C'est un système composé de deux corps mécaniques : un pendule inversé en rotation libre autour d'un pivot lié au bâti et un volant actionné (roue d'inertie) dont le centre de masse coïncide avec l'extrémité du pendule.

Le principe de fonctionnement de ce système est basé sur le mouvement de rotation du volant d'inertie qui provoque, par les effets dynamiques qu'il induit, la rotation de pendule.

Le but de la commande consiste à stabiliser le pendule autour de la verticale au point d'équilibre instable et le maintenir dans cet état.

pendule inversé

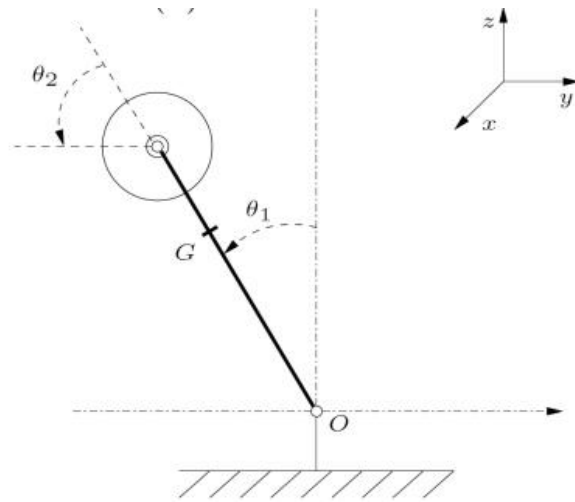
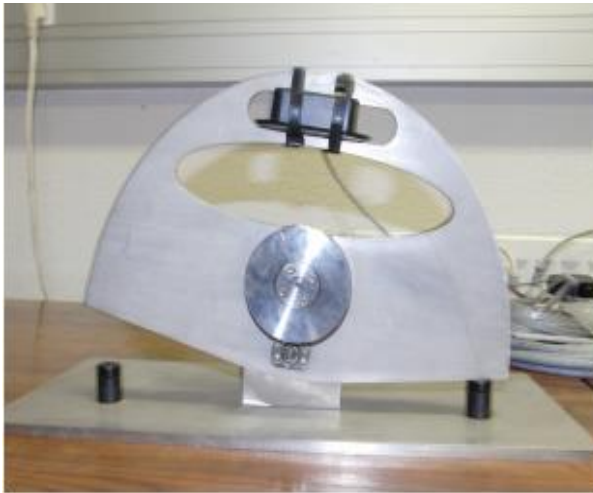


Figure 2. 6: pendule inverse stabilise par volant d'inertie.

2.3.5 Le pendule inverse sur de roues :

Le pendule inversé sur deux roues est considéré comme un prototype académique largement étudié dans le domaine de l'automatique. Comme son nom l'indique, il est constitué d'une base mobile surmontée d'un pendule inversé en rotation libre autour d'un pivot entre l'essieu et la tige du pendule. L'angle d'inclinaison du pendule par rapport à la verticale est noté.

Le principe de fonctionnement du système est très simple en théorie : quand le pendule penche vers l'avant, la partie mobile doit le rattraper en effectuant un mouvement vers l'avant et vis versa. La difficulté réside dans le réglage de l'intensité de réaction des roues afin d'agir face à l'angle que fait le pendule avec la vertical.

pendule inversé

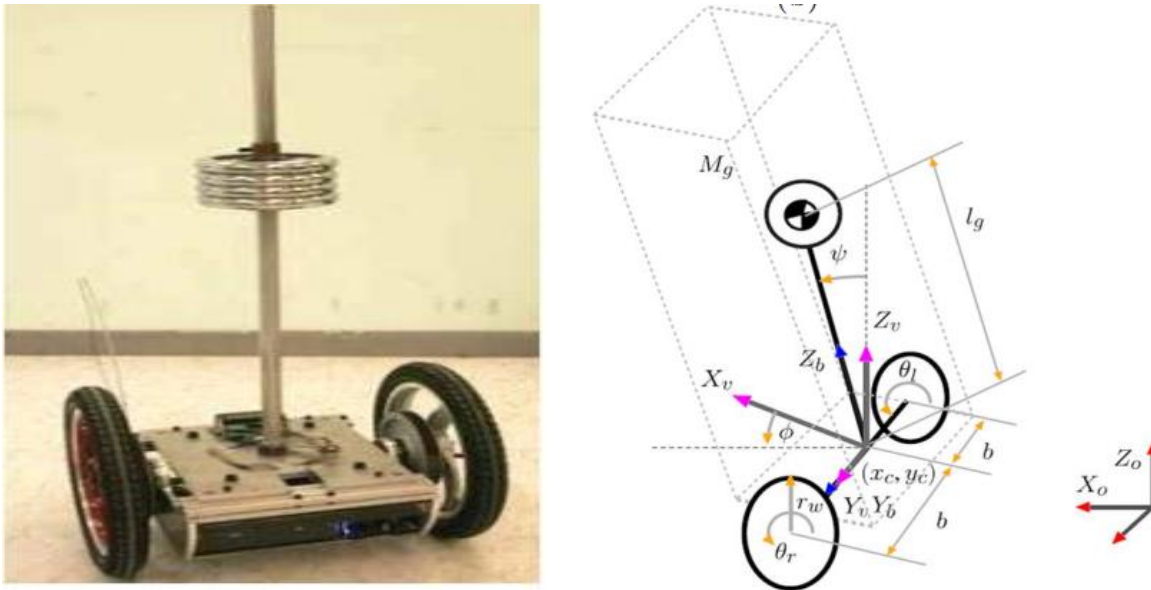


Figure 2. 7 : Pendule inverse sur de roues et son schéma de principe.

Comme une application réussite du principe de ce pendule, on peut citer le *Segway*. C'est un moyen de transport électrique et individuel inventé par *Dean Kamen*. Le dernier s'est inspiré d'un pendule inversé miniature connu sous le nom de *Joe-le-Pendule* qui a été développé en 1996 au laboratoire d'Electronique Industrielle de l'EPFL.

Le pilotage du *Segway* est basé sur l'inclinaison du corps de l'utilisateur dans la direction de déplacement voulue. En effet, il faut se pencher en avant ou en arrière pour avancer ou reculer et à droite ou à gauche pour tourner.



Figure 2. 8 : Photo du Joe-le-Pendule.



Figure 2. 9 : Photo du Segway

2.4.Modélisation et équation dynamique :

Un pendule inverse est un pendule simple, cependant la masse est située en l'air. Le pendule présente une position d'équilibre instable que l'on cherche à stabiliser en utilisant un chariot mobile.

Le pendule inversé sur chariot est composé de deux éléments(Figure2.10) :

- Un chariot mobile en translation le long d'un rail de guidage.
- Un pendule libre et fixé sur le chariot.

pendule inversé

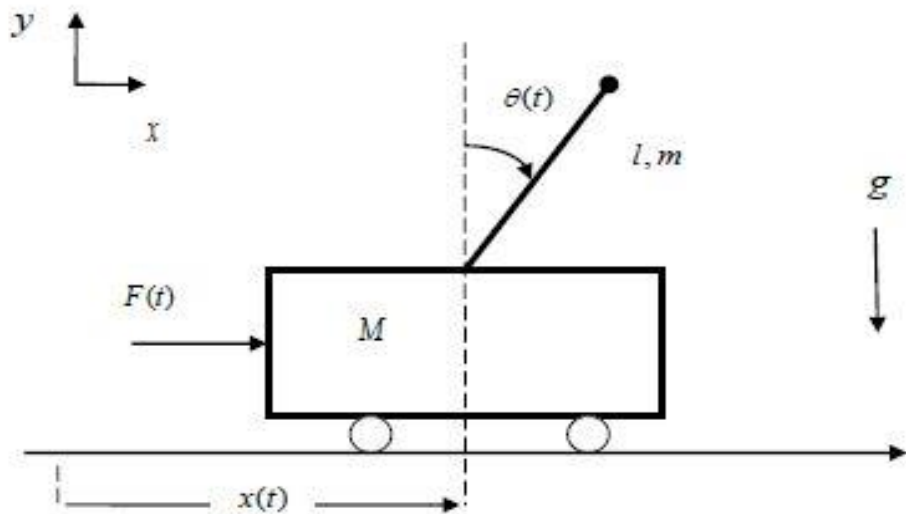


Figure 2. 10 : schéma d'une pendule inversée sur un chariot.

Avec :

m : Masse du pendule. $x(t)$: Position du chariot.

M : Masse du chariot. $\theta(t)$: La position angulaire de la tige du pendule.

l : La longueur de pendule g : Intensité de la pesanteur.

$F(t)$: Force exercée sur le chariot.

Les équations du mouvement du pendule sont déterminées par le formalisme d'Euler-Lagrange qui est basé sur le principe de la conservation de l'énergie mécanique plutôt que sur le concept de force, comme dans le principe de Newton.

Le Lagrangien est défini comme étant la différence entre l'énergie cinétique E_c et l'énergie potentielle E_p du système. Il s'exprime par:

$$L = E_c - E_p \quad (1)$$

2.4.1. Energie cinétique du système en mouvement :

Le système en mouvement comporte le chariot qui se déplace linéairement sur les rails et le pendule qui se balance sur son axe de rotation.

L'énergie cinétique du chariot en mouvement est donnée par l'équation :

pendule inversé

$$E_{cM} = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 \quad (2)$$

L'énergie cinétique du pendule est exprimée par l'équation :

$$E_{cm} = \frac{1}{2} m V_c^2 + \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 \quad (3)$$

V_c : La vitesse de centre de gravité du pendule.

$\dot{\theta}$: La vitesse angulaire du pendule.

Position du centre de gravité du pendule, notée r_c à partir de ces coordonnées est donnée par :

$$r_c = (x + l \sin \theta \hat{i}) + l \cos \theta \hat{j} \quad (4)$$

\hat{i}, \hat{j} : étant les vecteurs unitaires du repère x, y .

La vitesse du centre de gravité du pendule est donc :

$$V_c = \frac{dr_c}{dt} = (\dot{x} + l \cos \theta \dot{\theta}) \hat{i} - l \sin \theta \dot{\theta} \hat{j} \quad (5)$$

En substituant les équations (4) et (5) dans l'équation (3), l'expression de l'énergie cinétique du pendule devient :

$$E_{cm} = \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + 2 \dot{x} l \cos \theta \dot{\theta} + l^2 \cos^2 \theta \dot{\theta}^2 + l^2 \sin^2 \theta \dot{\theta}^2) + \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 \quad (6)$$

Qui s'écrit après simplification, du terme $l^2 \dot{\theta}^2 (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta) = l^2 \dot{\theta}^2$ par :

$$E_{cm} = \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + 2 \dot{x} l \cos \theta \dot{\theta} + l^2 \dot{\theta}^2) + \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 \quad (7)$$

Finalement, l'énergie cinétique totale de l'ensemble chariot et pendule est exprimée par :

$$E_C = E_{cM} + E_{cm} \\ = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + 2 \dot{x} l \cos \theta \dot{\theta} + l^2 \dot{\theta}^2) + \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 \quad (8)$$

2.4.2. Energie potentielle du système:

Le chariot étant en mouvement sur un rail horizontal, seul le pendule en mouvement possède une énergie potentielle. L'énergie potentielle du centre de gravité du pendule est donnée par :

$$E_p = mgl \cos\theta \quad (9)$$

2.4.3. Equation de Lagrange:

Maintenant que les expressions de l'énergie cinétique E_c de l'ensemble chariot-pendule (Equation 8) et l'énergie potentiel du système E_p (Equation 9) sont établies, on utilise l'équation générale d'Euler-Lagrange pour déterminer les équations de mouvement de l'ensemble chariot-pendule.

$$\begin{aligned} L &= E_c - E_p \\ &= \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + 2\dot{x}l\cos\theta\dot{\theta} + l^2\dot{\theta}^2) + \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 - mgl \cos\theta \quad (10) \end{aligned}$$

L'équation générale d'Euler-Lagrange est donnée par

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\xi}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial \xi_j} + \frac{\partial D_f}{\partial \dot{\xi}_j} = F_j \quad (11)$$

ξ : désigne les degrés de liberté.

Dans le cas du pendule, ces deux degrés de liberté sont la position du chariot $x(t)$ et l'angle de rotation du pendule $\theta(t)$.

D_f : désigne l'énergie dissipée par frottement.

F : la force généralisée.

L : représente le Lagrangien, il est donné par l'équation (1).

$$\checkmark \text{ Pour } \xi(t) = x(t)$$

On définit donc l'équation de Lagrange pour le pendule inversé comme suit :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = F - b\dot{x} \quad (13)$$

F : représente la force exercée sur le chariot.

La dérivée partielle du lagrangien suivant \dot{x} et t s'écrit :

$$\frac{d}{dt} (M\dot{x} + m\dot{x} + ml\cos\theta\dot{\theta}) - 0 = F - b\dot{x} \quad (14)$$

donc, la première équation de Lagrange est :

pendule inversé

$$(M+m)\ddot{x} + ml \cos \theta \ddot{\theta} - ml \sin \theta \dot{\theta}^2 = F - b\dot{x} \quad (15)$$

✓ pour $\xi(t) = \theta(t)$

on a :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = -d \dot{\theta} \quad (16)$$

La dérivée partielle du lagrangien suivant $\dot{\theta}$ et θ s'écrit :

$$\frac{d}{dt} (ml \dot{x} \cos \theta + ml^2 \dot{\theta} + j \dot{\theta}) - (-ml \dot{x} \sin \theta \dot{\theta} + mgl \sin \theta) = -d \dot{\theta} \quad (17)$$

Donc la deuxième équation de Lagrange est :

$$(ml^2 + j) \ddot{\theta} + ml \ddot{x} \cos \theta - ml \dot{x} \sin \theta \dot{\theta} + ml \dot{x} \sin \theta \dot{\theta} - mgl \sin \theta = -d \dot{\theta} \quad (18)$$

Donc l'équation de ce système est :

$$\begin{cases} (M + m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml \cos \theta \ddot{\theta} - ml \sin \theta \dot{\theta}^2 = F & (19) \\ ml \ddot{x} \cos \theta + (ml^2 + J)\ddot{\theta} + d\dot{\theta} - mgl \sin \theta = 0 & (20) \end{cases}$$

2.5. Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présenté la description d'un système du pendule inversé, nous avons abordé la partie modélisation par le formalisme de Lagrange-Euler pour ce système (l'ensemble du chariot-pendule).

Chapitre 04 :
Présentation de
matériel et assemblage
de robot.

3.1.Introduction :

Dans ce chapitre, on va parler sur la régulation et les méthodes de réglage des paramètres de PID et son implémentation sans faire des calculs et donc du principe d'équilibrage automatique du robot.

3.2 Principe de fonctionnement :

L'algorithme de contrôle utilisé pour maintenir la position d'équilibre sur le robot à deux roues auto balance est le contrôleur PID. PID est signifié proportionnelle, intégrale et dérivée, Dans cet algorithme, le signal d'erreur reçu est l'entrée.

Le contrôleur de dérivé intégral proportionnel (PID) est un mécanisme de rétroaction de boucle de commande qui est employé couramment dans l'industrie. Le contrôleur tente d'ajuster et de corriger l'erreur entre le processus mesuré et les mesures correctives souhaitées pour ajuster le processus en conséquence. Ce contrôleur doit être exécuté assez fréquemment et en même temps dans la plage contrôlable du système.

Le robot à deux roues est conçu et fabriqué selon le concept d'un pendule inversé. Il s'équilibre en position verticale. Le contrôleur PID a été utilisé pour localiser sa position transformée stable.

La théorie du pendule inversé est plus généralement connue sous le nom de théorie des pôles et des chariots, et bien que le robot d'équilibrage à deux roues ne se compare pas directement au pôle et au chariot, les mêmes principes sont en vigueur. Dans le modèle du système, le chariot correspond aux roues tandis que le poteau correspond au châssis du robot.

Le principe du pendule inversé a pour but de garder les roues sous le centre de la masse du châssis du robot. Si le robot commence à s'incliner vers l'avant, alors pour maintenir la stabilité, la roue devra avancer pour revenir sous la masse du châssis. Si cela n'est pas maintenu, le robot va simplement tomber

Figure 3.1. Les dynamiques de système suivantes sont associées au problème mathématique.

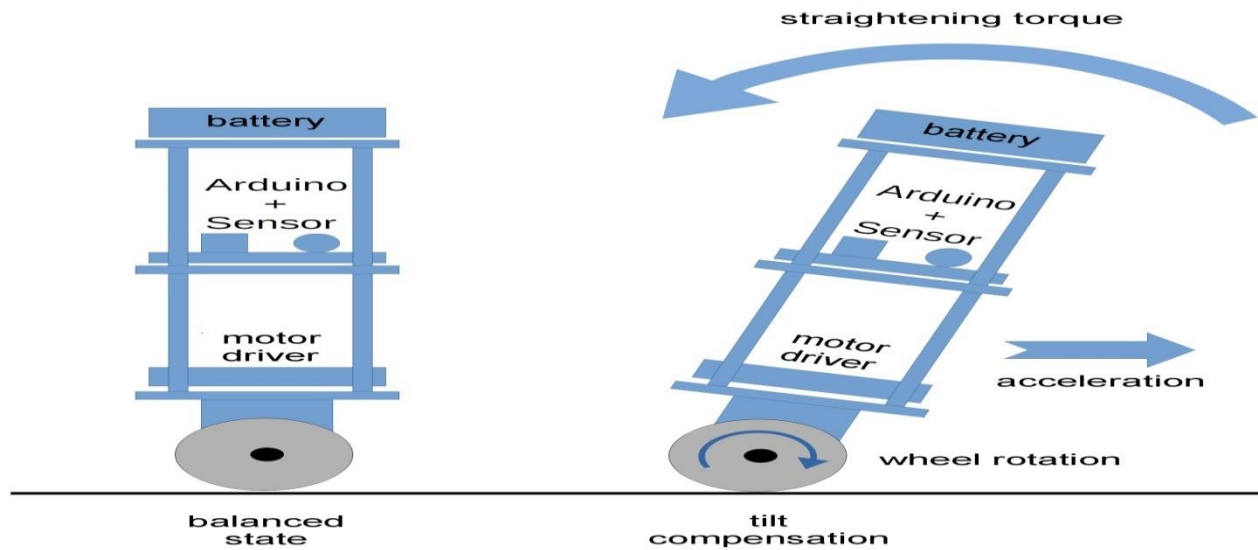


Figure 3. 1 Principe de fonctionnement d'un robot auto balance.

3.3 Définition des cordonnés :

Le robot à deux roues est similaire au problème «le pendule inversé sur un chariot en mouvement». La principale différence entre ce système et le pendule inversé est l'inertie et la position du centre de masse de la partie du corps, car nous cherchons un modèle plus détaillé du système plutôt que de l'approcher comme une masse ponctuelle. Pour ce système, nous devons calculer l'inertie et la position du corps basée sur la distribution de masse de la partie du corps, qui est déterminée par la conception matérielle.

Dans ce system, en supposons que le robot est déplacé horizontalement sans glissement. Donc pour dérivée l'équation de mouvement de ce système, nous avons défini les paramètres comme indiqué dans la **Figure 3.2**.

X	position horizontale du centre de la roue par rapport à une origine définie.
X _c	position horizontale du point m de la partie du corps par rapport à une origine définie.
I _w	Inertie de la roue.
I	l'inertie de la partie du corps.
Φ	angle de rotation de la roue dans le sens des aiguilles d'une montre par rapport à l'axe horizontal à t = 0.
Θ	angle de rotation dans le sens des aiguilles d'une montre de la partie du corps à partir de la position verticale.
L	longueur entre le corps et le centre de la roue.
R	Rayon de la roue.
m _w	Masse de la roue.
M	Masse de la corp.
Z _C	Position verticale du corps de la partie du corps du sol.
τ ₀	Couple appliqué.

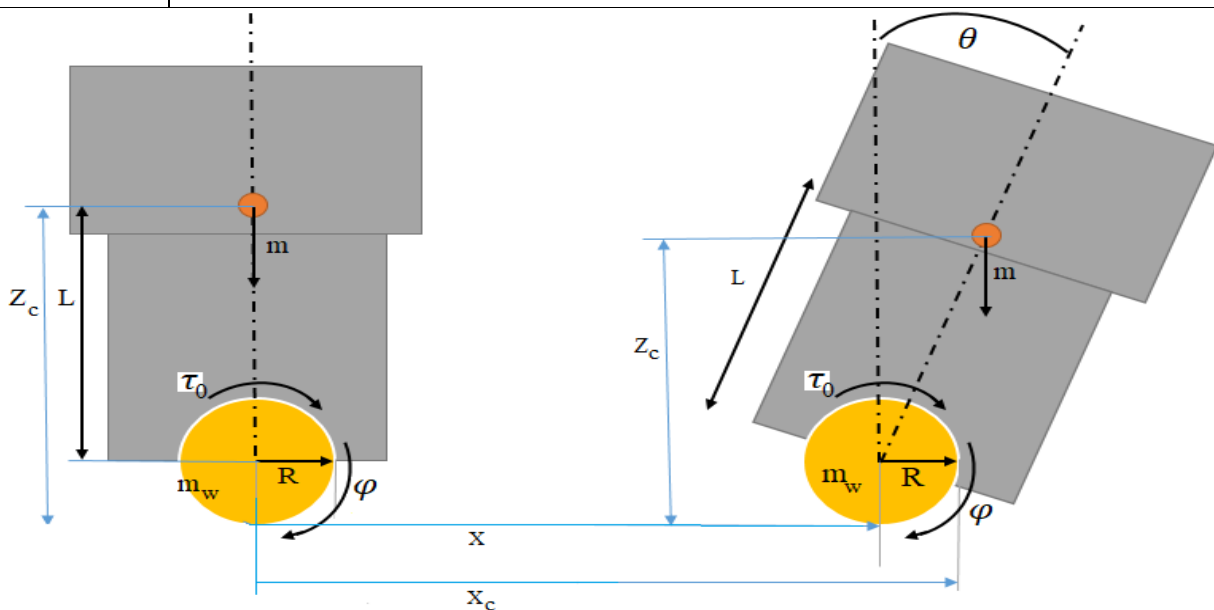


Figure 3. 2 : Conception du sous-système mécanique du robot.

3.3.1 Dérivation des équations dynamiques du mouvement :

Nous avons utilisé le formalisme d'Euler-Lagrange car il est basé sur la conservation d'énergie plutôt que le concept de force.

Nous pouvons écrire \mathbf{X} , \mathbf{X}_c , \mathbf{Z}_c , $\dot{\mathbf{X}}$, $\dot{\mathbf{X}}_c$ et $\dot{\mathbf{Z}}_c$ comme suit :

$$\mathbf{X} = \mathbf{R} \varphi \quad (1) \quad \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{R} \dot{\varphi} \quad (2)$$

$$\mathbf{X}_c = \mathbf{R} \varphi + L \sin \theta \quad (3) \quad \dot{\mathbf{X}}_c = \mathbf{R} \dot{\varphi} + L \dot{\theta} \cos \theta \quad (4)$$

$$\mathbf{Z}_c = \mathbf{R} + L \cos \theta \quad (5) \quad \dot{\mathbf{Z}}_c = -L \dot{\theta} \sin \theta \quad (6)$$

L'énergie cinétique E_c et l'énergie potentielle E_p en mouvement est donnée par les équations :

$$E_p = mg(\mathbf{R} + L \cos \theta) - mg(\mathbf{R} + L) = mgL(\cos \theta - 1) \quad (7)$$

$$E_c = \frac{1}{2} m_w \dot{\mathbf{X}}^2 + \frac{1}{2} I_w \dot{\varphi}^2 + \frac{1}{2} m \dot{\mathbf{X}}_c^2 + \frac{1}{2} m \dot{\mathbf{Z}}_c^2 + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 \quad (8)$$

$$= \frac{1}{2} (I_w + m_w \mathbf{R}^2 + m \mathbf{R}^2) \dot{\varphi}^2 + m \mathbf{R} L \cos \theta \dot{\varphi} \dot{\theta} + \frac{1}{2} (I + m L^2) \dot{\theta}^2 \quad (9)$$

3.3.2 Derivation du lagrangien :

Lagrangien est généralement défini par la différence entre l'énergie cinétique E_c et l'énergie potentielle E_p

$$L = E_c - E_p \quad (10)$$

$$= \frac{1}{2} (I_w + m_w \mathbf{R}^2 + m \mathbf{R}^2) \dot{\varphi}^2 + m \mathbf{R} L \cos \theta \dot{\varphi} \dot{\theta} + \frac{1}{2} (I + m L^2) \dot{\theta}^2 - mgL (\cos \theta - 1) \quad (11)$$

Par conséquent, les équations dynamiques pour la coordonnée φ et la coordonnée θ peuvent être dérivées comme suit:

Avec coordonné φ :

$$\frac{\partial L}{\partial \varphi} = (I_w + m_w \mathbf{R}^2 + m \mathbf{R}^2) \dot{\varphi} + m \mathbf{R} L \dot{\theta} \cos \theta \quad (12)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \varphi} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\varphi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varphi} = (I_w + m_w \mathbf{R}^2 + m \mathbf{R}^2) \ddot{\varphi} + m \mathbf{R} L \ddot{\theta} \cos \theta - m \mathbf{R} L \dot{\theta}^2 \sin \theta = \mu \quad (14)$$

Avec coordonné θ :

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = mRL \cos \theta \dot{\varphi} + (1+mL^2) \dot{\theta}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = -mRL \dot{\varphi} \sin \theta \ddot{\theta} + mgL \sin \theta$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = (I+mL^2) \ddot{\theta} + mRL \cos \theta \dot{\varphi} - mgL \sin \theta = \chi$$

Avec μ et χ sont des forces généralisées (couples) pour chaque coordonnée.

3.3.3 Système en boucle ouverte :

Un système est dit en boucle ouverte lorsque la commande ne prend pas en compte la réponse de ce système.

Le schéma bloc de système en boucle ouverte est donné par la figure suivante.

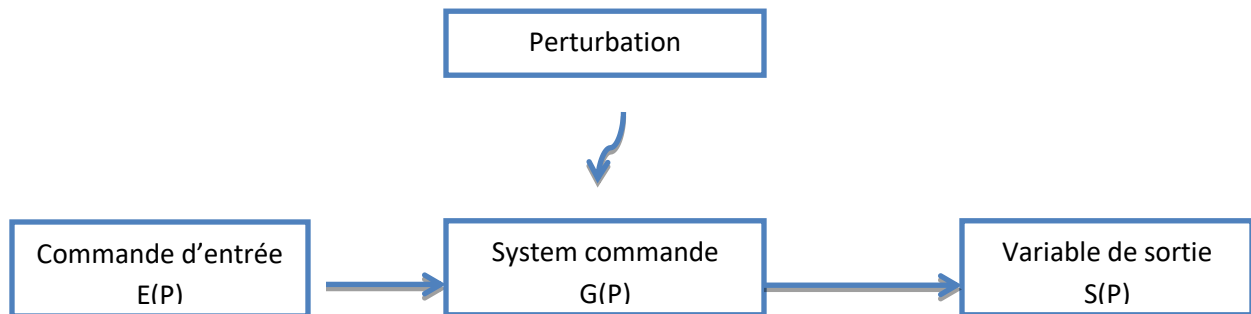


Figure 3. 3: Schéma de system d'une boucle ouverte.

Avec :

$\mathbf{E(p)}$: grandeur d'entrée.

$\mathbf{S(p)}$: grandeur de sortie.

$\mathbf{G(p)}$: fonction de transfert.

3.3.4 Système en boucle fermé :

La boucle fermée (contre réaction) est une forme de contrôle d'un système qui intègre la réaction de ce système.

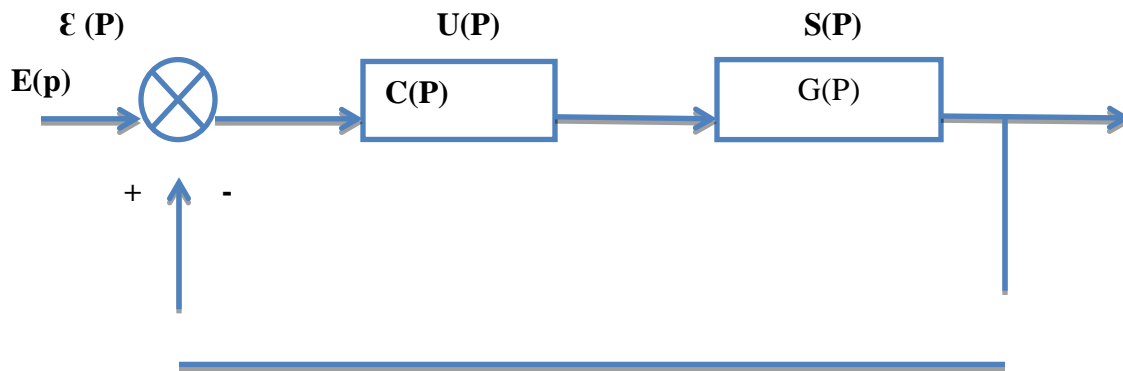


Figure 3. 4 : Schéma de fonctionnement d'une boucle fermée.

Avec :

$C(P)$: est la fonction de transfert du régulateur ;

$G(P)$: est le processus à commander (moteur à courant continu) ;

$E(P)$: est la grandeur d'entrée ;

$S(P)$: est la grandeur de sortie.

$\epsilon(P)$: est l'erreur, $\epsilon(p) = E(p) - S(p)$.

3.3.5 Commande d'un système en boucle fermée :

L'objectif de tout système de contrôle électrique ou électronique est de mesurer, de surveiller et de contrôler un processus et une façon de contrôler avec précision le processus est de surveiller sa sortie et d'en « restituer » une partie pour comparer la sortie réelle avec la sortie souhaitée afin de réduire l'erreur et en cas de perturbation, ramener la sortie du système à la réponse d'origine ou souhaitée.

En souvent représentée une commande en boucle fermée par un schéma synoptique comme suivent :

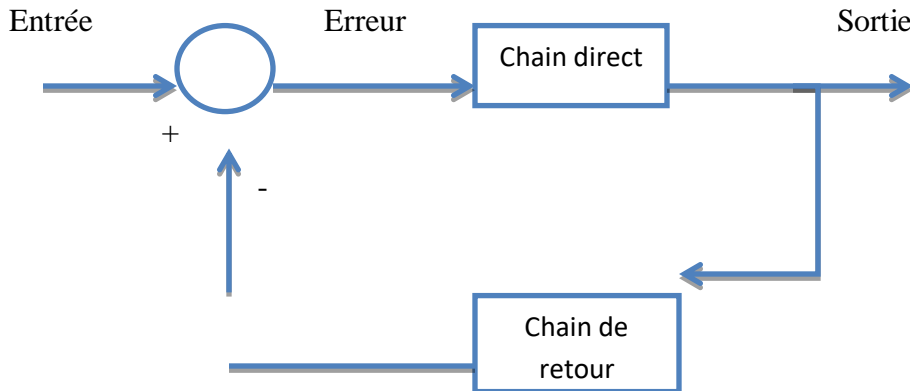


Figure 3. 5: Schéma synoptique d'une commande d'une boucle fermée.

- La chaîne directe est la partie opérative du système, généralement pourvue d'un gain en puissance important
- La chaîne de retour est un ensemble de capteurs et de circuits de conditionnement qui fournissent une image de la valeur réellement obtenue en sortie du système.
- Un soustracteur applique à la partie opérative une commande (le signal d'erreur) qui est la différence entre la valeur de sortie que l'on souhaite obtenir et celle que l'on obtient réellement.

3.3.6 Commande PID :

Les régulateurs de type PID où (Proportionnel : P, Intégral : I et Dérivé : D) répondent à plus de 90% aux besoins industriels et permet de résoudre un grand nombre de problèmes de contrôle et sont probablement les plus largement utilisés dans le contrôle robotique.

Le régulateur PID est une simple implémentation de retour d'information. La régulation PID combine les actions proportionnelle, intégrale et dérivée pour générer un seul signal de commande, où chaque action offre une caractéristique permettant de réguler la sortie. L'action proportionnelle amène le système à réagir à l'erreur actuelle, permettant une action immédiate en cas de variations ou de perturbations ; l'action intégrale élimine les erreurs en régime permanent ; finalement, l'action dérivée anticipe le comportement du processus.

3.4 Implémentation de PID :

Dans cette partie on va expliquer comment le régulateur PID fonctionne sans faire les calculs.

3.4.1 Le régulateur proportionnel (P : première règle) :

La commande de ce régulateur est proportionnelle à l'erreur.

$$\text{Commande} = K_p * \text{erreur}$$

K_p : est le coefficient de proportionnalité de l'erreur à régler de façon manuelle.

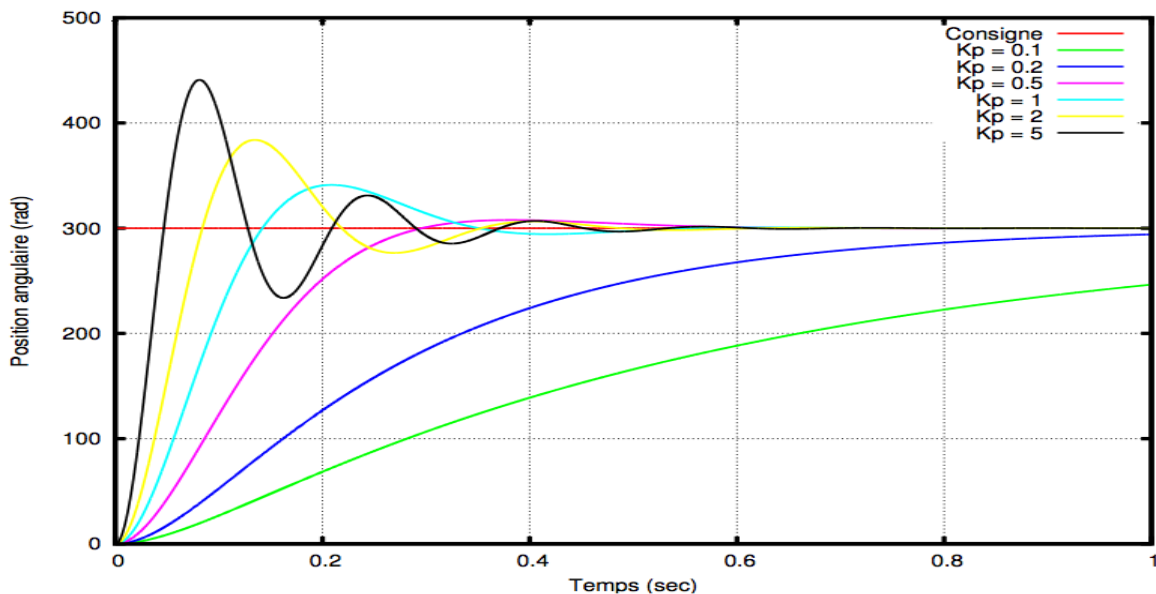


Figure 3. 6: Schema d'échelon d'un régulateur proportionnel .

3.4.2 Le régulateur proportionnel intégral (PI : première et seconde) :

La commande de ce régulateur est proportionnelle à l'erreur, mais aussi proportionnelle à l'intégrale de l'erreur. On rajoute donc à la commande générée par le régulateur proportionnel, la somme des erreurs commises au cours du temps.

$$\text{Commande} = K_p * \text{erreur} + K_i * \text{somme_erreurs}$$

K_i : est le coefficient de proportionnalité de la somme des erreurs. Il faut aussi le régler de façon manuelle.

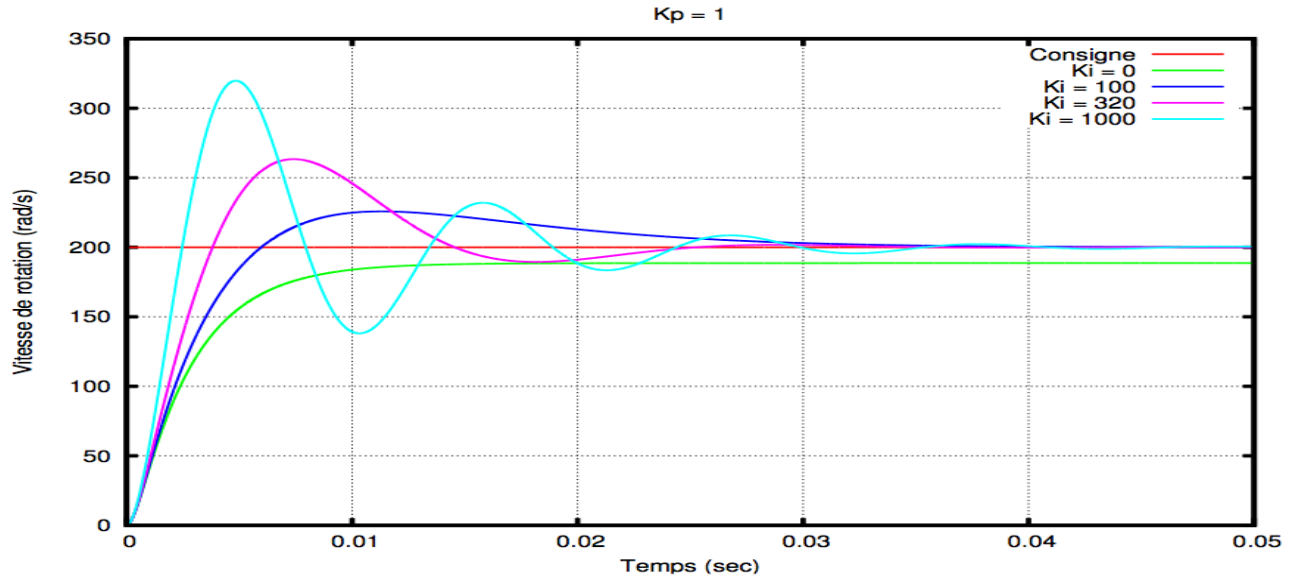


Figure 3. 7: Schéma d'échelon d'un régulateur proportionnel intégral.

3.4.3 Le régulateur proportionnel dérivé (PD : première et troisième règle) :

La commande de ce régulateur est proportionnelle à l'erreur, mais aussi proportionnelle à la dérivée de l'erreur. La dérivée de l'erreur correspond à la variation de l'erreur d'un échantillon à l'autre et se calcule simplement en faisant la différence entre l'erreur courante et l'erreur précédente (c'est une approximation linéaire et locale de la dérivée).

$$\text{Commande} = K_p * \text{erreur} + K_d * (\text{erreur} - \text{erreur_précédente})$$

K_d : est le coefficient de proportionnalité de la variation de l'erreur. Il faut régler ce coefficient expérimentalement.

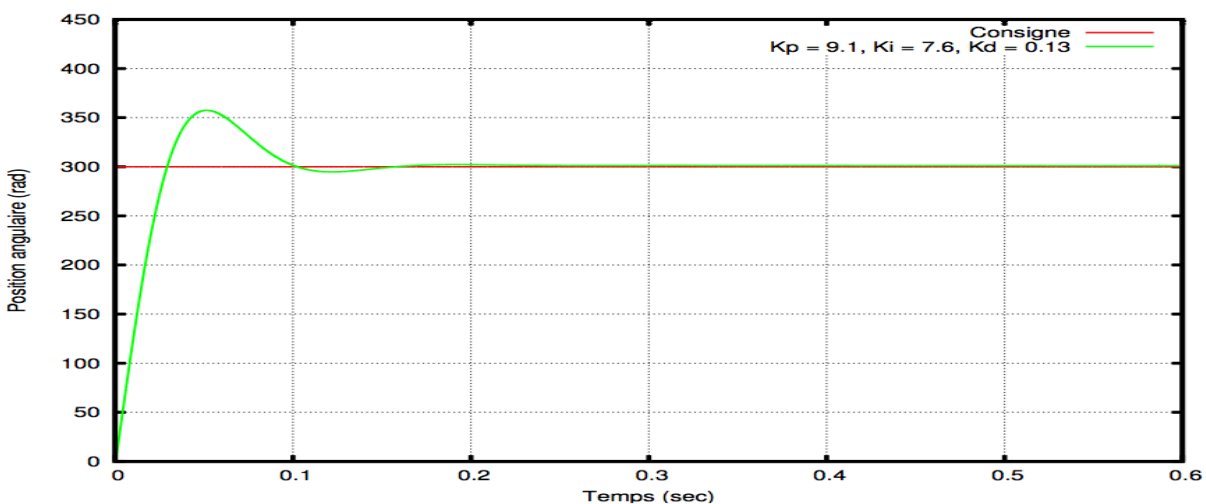


Figure 3. 8: Schéma d'échelon d'un régulateur proportionnel dérivé.

3.4.4 Le régulateur proportionnel intégral dérivé (PID : première, second et troisième règle) :

La commande est à la fois proportionnelle à l'erreur, proportionnelle à la somme des erreurs et proportionnelle à la variation de l'erreur.

$$\text{Commande} = K_p * \text{erreur} + K_i * \text{somme_erreurs} + K_d * (\text{erreur} - \text{erreur_précédente})$$

Nous allons donc faire une mesure sur notre système pour pouvoir calculer l'erreur et ainsi appliquer le PID. Cette mesure est à faire régulièrement à une certaine fréquence d'échantillonnage.

Tous les x millisecondes, faire :

$$\text{erreur} = \text{consigne} - \text{mesure};$$

$$\text{somme_erreurs} += \text{erreur};$$

$$\text{variation_erreur} = \text{erreur} - \text{erreur_précédente};$$

$$\text{commande} = K_p * \text{erreur} + K_i * \text{somme_erreurs} + K_d * \text{variation_erreur};$$

$$\text{erreur_précédente} = \text{erreur}$$

3.4.5 Régler les coefficients d'un PID :

Le réglage des coefficients K_p , K_i et K_d d'un PID peut se faire expérimentalement par essais/erreurs. Avant tout, sachons qu'il ne sert à rien de vouloir régler les trois coefficients en même temps. Il y a plusieurs combinaisons possibles et trouver un triplet performant relèverait de l'exploit. Si mieux quand allant par étape.

- Tout d'abord, il faut mettre en place un simple régulateur proportionnel (les coefficients K_i et K_d sont donc nuls). Par essais/erreurs, il faut régler le coefficient K_p afin d'améliorer le temps de réponse du système. C'est-à-dire qu'il faut trouver un K_p qui permette au système de se rapprocher très vite de la consigne tout en faisant attention de garder la stabilité du système : il ne faut pas que le système réponde très vite tout en oscillant beaucoup.
- Une fois ce coefficient réglé, on peut passer au coefficient K_i . Celui-là va permettre d'annuler l'erreur finale du système afin que celui-ci respecte exactement la consigne. Il faut donc régler K_i pour avoir une réponse exacte en peu de temps tout en essayant de minimiser les oscillations apportées par l'intégrateur .
- Enfin, on peut passer au dernier coefficient K_d qui permet de rendre le système plus stable. Son réglage permet donc de diminuer les oscillations.

En général, pour régler ces coefficients, on donne au système une consigne fixe (exemple : pour un moteur : tourne à 3 tours par seconde) et on observe la réponse du système (exemple : l'évolution du nombre de tours par seconde du moteur au cours du temps). Le graphe résultant possède donc cette forme :

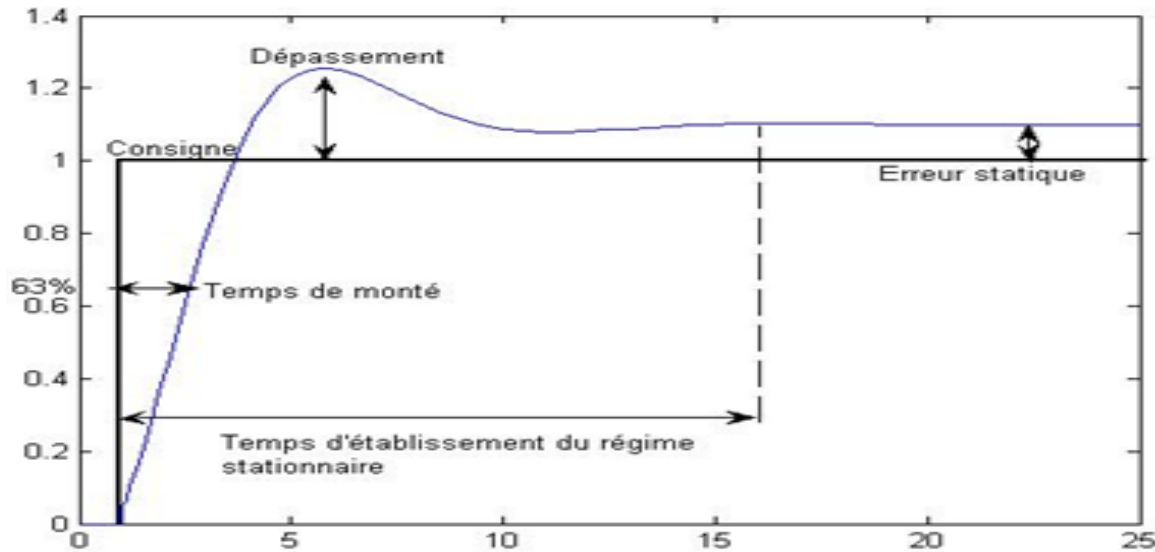


Figure 3.9: Réponse échelon PID.

Le PID parfait n'existe pas, tout est une question de compromis. Certaines applications autoriseront un dépassement afin d'améliorer le temps de stabilisation, alors que d'autres ne l'autoriseront pas (exemple, contrôler un stylo pour écrire sur une feuille. S'il y a dépassement dans le PID, le stylo traversera la feuille). Tout dépend donc du cahier des charges. Chacun des coefficients a un rôle à jouer sur la réponse à une consigne :

L'erreur statique, c'est l'erreur finale une fois que le système est stabilisé. Cette erreur doit être nulle. Pour diminuer l'erreur statique, il faut augmenter K_p et K_i .

Le dépassement, c'est le rapport entre le premier pic et la consigne. Ce dépassement diminue si K_p ou K_i diminuent ou si K_d augmente.

Le temps de montée est l'intervalle de temps correspondant à la croissance du signal de 10 % à 90 % de sa variation totale.

Le temps de montée diminue si K_p ou K_i augmentent ou si K_d diminue.

Le temps de stabilisation, c'est le temps qu'il faut pour que le signal commette une erreur inférieure à 5% de la consigne. Ce temps de stabilisation diminue quand K_p et K_i augmentent.

3.5 Application de la commande PID à un système de pendule inverse :

La fonction de transfert en boucle fermée permet de déterminer le comportement dynamique du système asservi en poursuite de consigne.

Il consiste d'un capteur a la sortie, dans notre case est le gyroscope **mpu6050** qui va permettre de connaitre les angles d'orientation d'un robot en suit les données sont transmises à l'Arduinouno par liaison série I2C qui nous avons utilisé comme un comparateur pour examiner l'erreur entre la mesure de sortie et le signal de consigne et aussi comme un correcteur qui commande les moteurs.

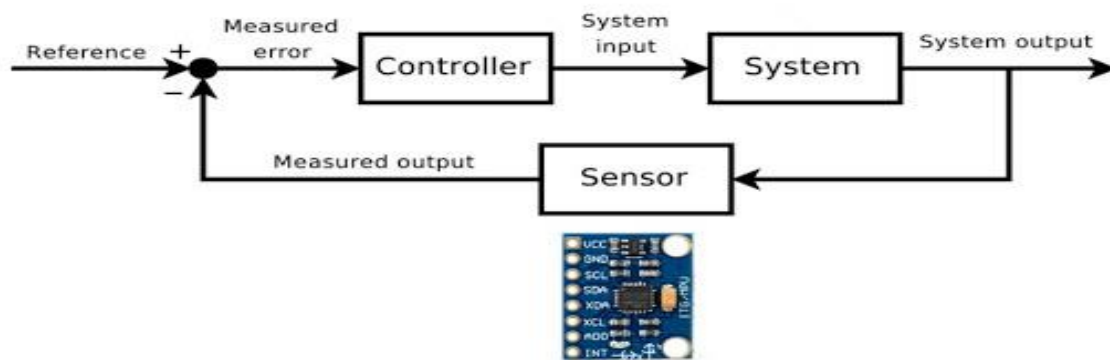


Figure 3.10 : Schéma de régulation d'une boucle fermée.

3.6 Schéma de fonctionnement :

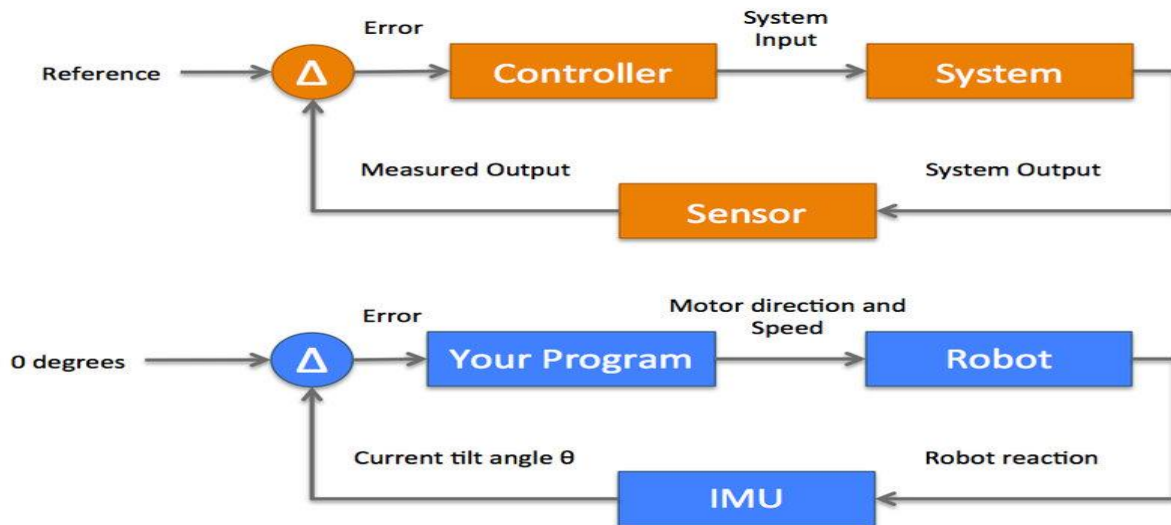


Figure 3.11: schéma de fonction d'un PID en boucle fermé.

3.7:Conclusion:

A travers ce chapitre nous avons abordé une brève description sur le principe de fonctionnement de robot auto balance et les équations dynamiques .Aussi nous avons présenté les commande (PID) a utilisés en boucle fermée afin d'entamer une étude qui nous permettras d'associer une meilleur régulation à notre propre système.

Chapitre 04 :
Présentation de
matériel et assemblage
de robot.

4.1 Introduction :

Dans ce chapitre on va présenter la partie hardware (les étapes pour réaliser le robot) et la partie software (à base de L'Arduino).aussi que en va présenter les matérielle utilisé dans ce projet-là.

4.2 La carte Arduino:

Les cartes Arduino sont conçues pour réaliser des prototypes et des maquettes de cartes électronique pour l'informatique embarquée.

Ces cartes permettent un accès simple et peu couteux à l'informatique embarquée. De plus, elles sont entièrement libres de droit, autant sur l'aspect du code source (Open Source) que sur l'aspect matériel (Open Hardware).

Ainsi, il est possible à tout utilisateur de refaire sa propre carte Arduino dans le but de l'améliorer ou d'enlever des fonctionnalités inutiles à son projet.

4.2.1 Logicielle :

Le logiciel de programmation des modules Arduino est Arduino ide c'est une application Java, libre et multiplateforme, servant d'éditeur de code et de compilateur.

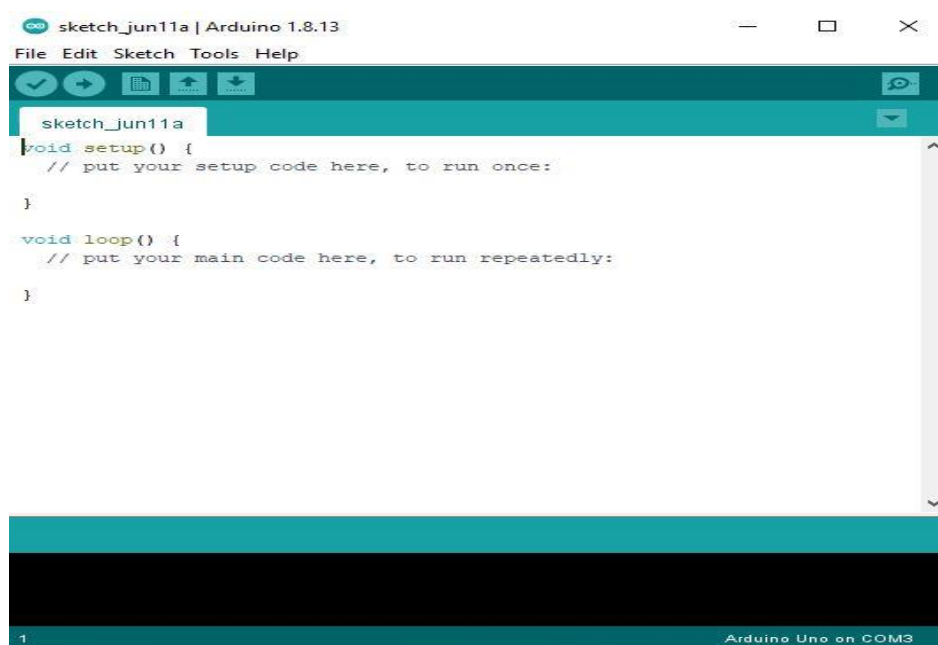


Figure 4. 1 : le logiciel arduino ide.

La zone des 5 icônes juste en dessous : ce seront les boutons que vous utiliserez le plus souvent lorsque vous programmez. Nous avons, de la gauche vers la droite :

- le bouton « Vérifier », pour vérifier votre programme.
- ensuite, le bouton “Téléverser” : en cliquant sur ce bouton, vous transférez votre programme compilé dans la mémoire de votre carte Arduino.
- au milieu, le bouton “Nouveau” : c’est à l’aide de ce bouton que vous créez de nouveaux programmes.
- après, le bouton “Ouvrir” (flèche vers le haut) qui vous permet d’accéder aux programmes d’exemples de l’IDE ou aux programmes présents sur votre machine.
- enfin, le bouton “Enregistrer” (flèche vers le bas) par lequel vous pouvez sauvegarder le travail que vous avez réalisé afin d’y revenir quand vous le souhaitez.

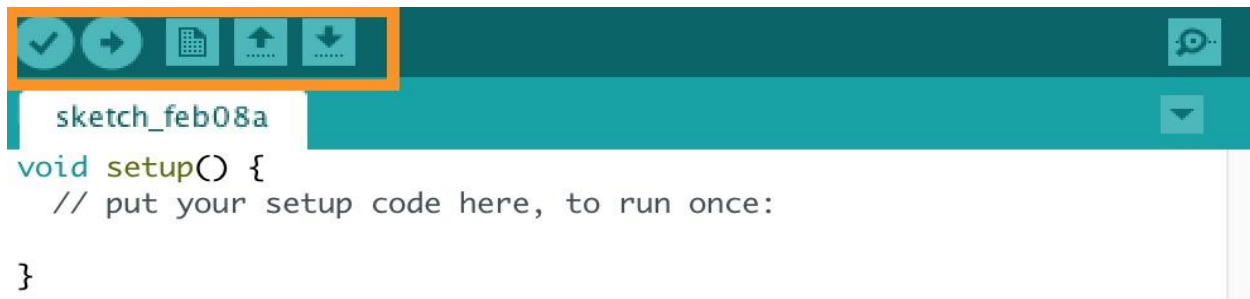


Figure 4. 2 : Icones de l’IDE Arduino.

En-dessous de ces boutons, vous trouverez une zone blanche : c’est l’**éditeur de code** où vous écrirez le code source de votre programme Arduino.

```
void setup() {  
  // put your setup code here, to run once:  
  
}  
  
void loop() {  
  // put your main code here, to run repeatedly:  
  
}
```

Figure 4. 3 : L’éditeur de code.

Tout en bas de la fenêtre du logiciel, se trouve la console de débogage : c'est là que vous trouverez les différentes erreurs d'exécution de votre programme.

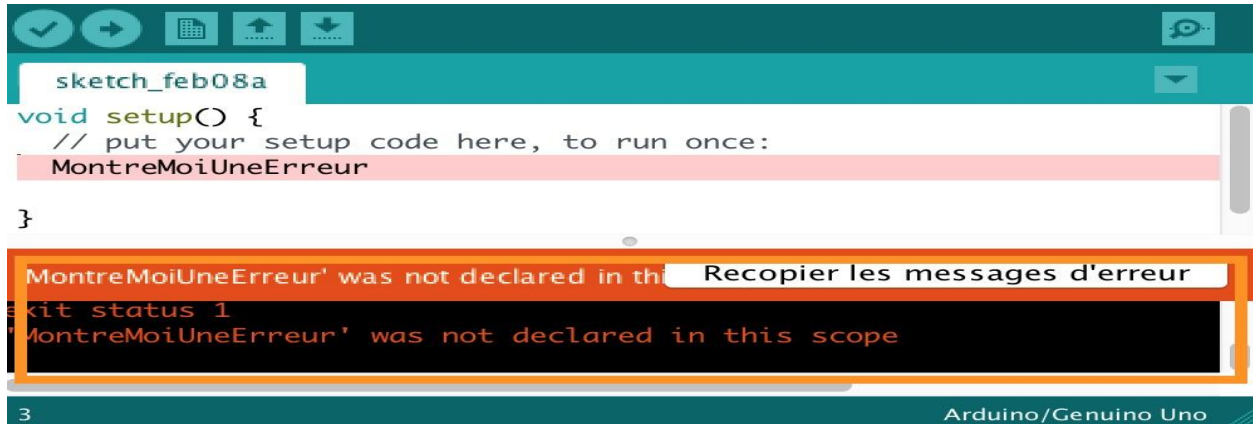
The image shows a screenshot of the Arduino IDE interface. At the top, there are icons for checking, running, and uploading code. Below that, the sketch name 'sketch_feb08a' is displayed. The main area shows C++ code for a 'void setup()' function. A red highlight is under the function name 'MontreMoiUneErreur'. Below the code, the console window shows a red error message: "'MontreMoiUneErreur' was not declared in this scope". A button labeled 'Recopier les messages d'erreur' is visible next to the error message. The bottom status bar indicates 'Arduino/Genuino Uno'.

Figure 4. 4 : La console de débogage.

Le langage de programmation d'Arduino est en effet une implémentation de Wiring (une plateforme open source similaire de *physical computing* qui proposait elle-même une bibliothèque appelée **Wiring** qui simplifie les opérations d'entrée/sortie).

Un programme Arduino est aussi appelé unsketch est basé sur le C/C++.

4.2.2 Les types des cartes arduino:

Il existe plusieurs types de cartes arduino qui se distingue l'une de l'autre principalement par le type du microcontrôleur utilisé, le nombre d'entrées/sorties, la capacité de la mémoire et la vitesse de fonctionnement.

4.2.2.1 Arduino Uno :

L'Arduino UNO est la première version stable de carte Arduino. Elle possède toutes les fonctionnalités d'un microcontrôleur classique en plus de sa simplicité d'utilisation.

Elle utilise une puce ATmega328P cadencée à 16Mhz. Elle possède 32ko de mémoire flash destinée à recevoir le programme, 2ko de SRAM et 1 ko d'EEPROM. Elle offre 14 pins d'entrée/sortie numériques (données acceptée 0 ou 1) dont 6 pouvant générer des PWM .Elle

permet aussi de mesurer des grandeurs analogiques grâce à ces 6 entrées analogiques. Chaque broche est capable de délivrer un courant de 40mA pour une tension de 5V.



Figure 4. 5 la carte arduino UNO.

1. Microcontrôleur
2. Entrées/Sorties numériques. (~: sortie PWM).
3. Entrées analogiques.
4. Port USB.
5. Connecteur Power Jack.

4.2.2.2 Arduino nano :

Une version encore plus petite de l'Arduino alimenté par USB et utilisant un ATmega168 (avant la version 3) ou ATmega328 (à partir de la version 3.0) de type CMS.

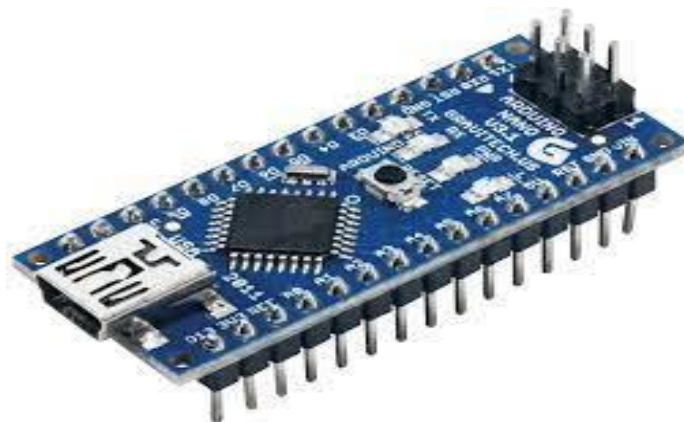


Figure 4. 6 la carte arduino nano.

4.2.2.3 Arduino Mega2560:

est équipé d'un ATmega2560 de type CMS, augmentant la mémoire totale disponible à 256 ko. Il est équipé aussi de la nouvelle puce USB ATmega8U210.



Figure 4. 7la carte arduino Mega2560.

4.3 Les moteurs:

Le moteur utilisé dans ce projet est de type moteur à courant continu de 3 - 6 v. chaque roue est motorisée indépendamment de l'autre.



Figure 4. 8 Photo d'un moteur a CC.

4.4 Pont-h L298 :

C'est une puce électronique est un circuit intégré, c'est-à-dire une sorte de petite boîte qui contient des composants miniaturisés et connectés entre eux afin de répondre à une fonction particulière.

Pour des projets impliquant de petits moteurs de faible puissance, le L298N est souvent privilégié parce qu'il coûte moins cher, qu'il s'insère facilement dans une breadboard et qu'il n'est pas nécessaire de lui ajouter des diodes puisque ces dernières sont déjà intégrées à l'intérieur du circuit intégré.

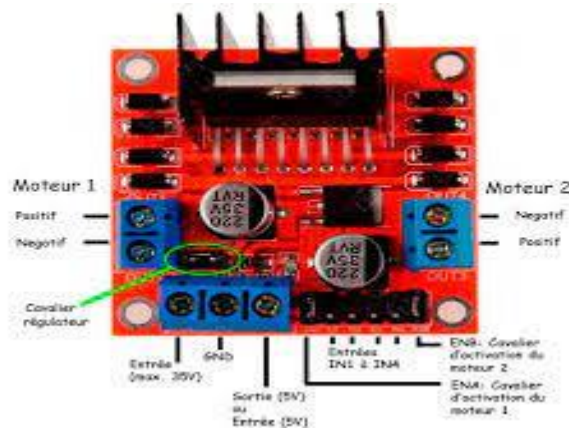


Figure 4. 9 photo d'un L298N.

4.4.1 Connexions :

Les 4 sorties "OUT1", "OUT2", "OUT3" et "OUT4" servent à brancher les moteurs (un moteur branché à OUT1 et OUT2, et un deuxième moteur, s'il y a lieu, branché à OUT3 et OUT4).

Les moteurs et la carte sont alimentés grâce aux connecteurs GND et +12 V.

Notre Arduino sera branché aux entrées ENA, IN1, IN2, IN3, IN4 et ENB.

Si IN1 est à 5 V pendant que IN2 est à 0 V, le moteur branché aux sorties OUT1 et OUT2 tourne dans un sens. Si IN1 est à 0 V pendant que IN2 est à 5 V, le moteur tourne dans l'autre sens.

ENA est l'entrée "enable": le moteur tourne à la condition que ce pin se trouve à un niveau logique haut. Si nous laissons en place le jumper qui se trouve sur ce pin, elle demeurera toujours active et le moteur tournera à sa vitesse maximale. Pour contrôler la

vitesse de rotation du moteur, nous devons retirer le jumper et brancher le pin ENA à une sortie PWM de l'Arduino.

Nous l'aurons deviné, c'est le même principe pour les pins ENB, IN3 et IN4, sauf que ces entrées permettent de contrôler le moteur relié aux sorties OUT3 et OUT4.

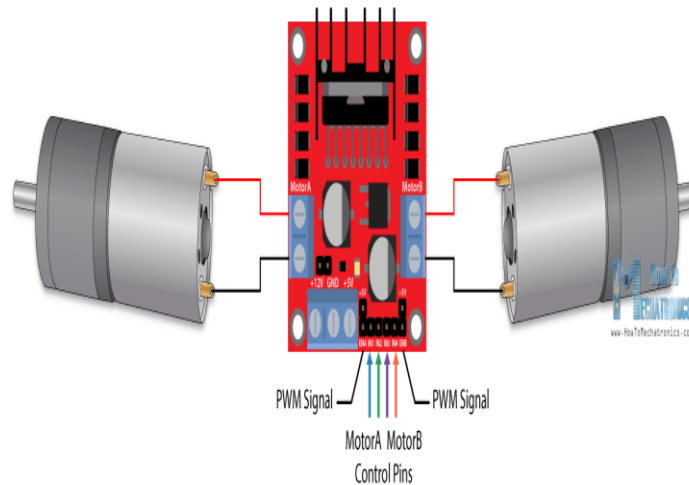


Figure 4. 10 Montage de circuit L298N.

4.5 Les capteurs:

Afin de pouvoir stabiliser et commander le système en boucle fermée, on doit pouvoir mesurer certaines informations sur l'état actuel du système. Plus spécifiquement, on doit connaître l'angle d'inclinaison du robot, sa position linéaire, son angle de direction ainsi que les dérivées par rapport aux temps de ceux-ci. Afin de déterminer l'angle d'inclinaison du robot, un gyroscope ainsi qu'un accéléromètre sont utilisés.

4.5.1 Le MPU6050 :

Le MPU6050 est un microsystème électromécanique (MEMS) qui comprend un accéléromètre à 3 axes et un 3 axes Gyroscope à l'intérieur. Cela nous encourage à mesurer l'augmentation de vitesse, vitesse, dérivation et bien d'autres paramètres liés au mouvement d'un cadre ou d'un article.

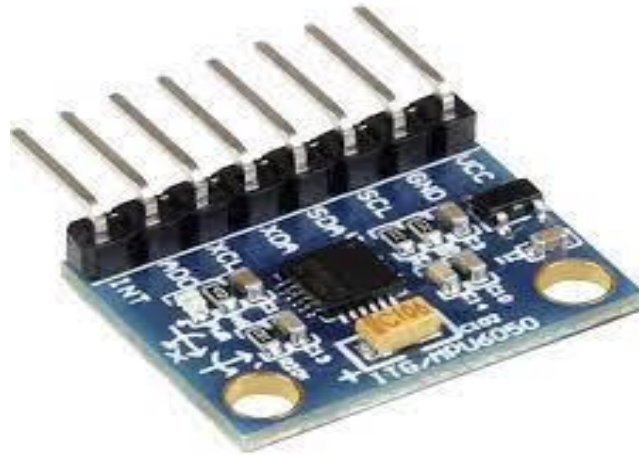


Figure 4. 11 : Puce Mpu6050.

4.6 Communication avec les périphériques Arduino:

Dans les réseaux informatiques et les télécommunications, un protocole de communication est une spécification de plusieurs règles pour un type de communication particulier.

Initialement, on nommait protocole ce qui est utilisé pour communiquer sur une même couche d'abstraction entre deux machines différentes. Par extension de langage, on utilise parfois ce mot aussi aujourd'hui pour désigner les règles de communication entre deux couches sur une même machine.

4.6.1 Bus I2C:

I2C, pour Inter Integrated Circuit, est un protocole de communication créé à la base par Philips en 1982 pour standardiser l'échange de données entre différents circuits intégrés d'un même système. Elle est aujourd'hui assurée par le fabricant NXP, spin-off de l'entreprise. Ce protocole est basé sur un bus de communication sériel, ce qui signifie qu'un seul câble est utilisé pour le transfert de données.

En pratique, le bus I2C est constitué de deux câbles, un donc pour les données, nommé SDA (Serial Data) et l'autre faisant office d'horloge pour déterminer la fréquence de la communication, nommé SCL (Serial Clock).

Tout d'abord, il n'y a qu'**un maître** (le microcontrôleur de notre board Arduino), **et une multitude d'esclaves** (notre périphériques), chacun identifiés par une adresse unique. Seul le maître peut initier une communication.

Le maître envoie tout d'abord l'adresse du périphérique dont il désire recevoir les données. L'esclave envoie un premier signal de confirmation pour signifier qu'il a bien reçu la demande.

Puis le maître envoie l'adresse d'un registre interne du périphérique. Par exemple, pour un accéléromètre, on a trois registres stockant respectivement les données de l'accélération selon X, Y et Z. Un deuxième signal de confirmation est envoyé par le périphérique.

Enfin c'est le périphérique qui émet cette fois le message, en transférant la valeur du registre qui a été sollicité. Il termine avec une dernière confirmation, après quoi le maître envoie un signal spécifique pour mettre fin à la communication.

Le processus est similaire pour l'écriture sur un périphérique par le microcontrôleur, pour piloter un actionneur ou sauvegarder des données par exemple. Dans ce cas une commande spécifique est envoyée lors de l'adressage du registre et c'est le maître qui transmet les données.

À noter que les deux lignes SDA et SCL sont liées à une résistance de pull-up. L'état 0 est donc l'état dominant. D'un point de vue hardware, vous n'aurez pas à implémenter ces résistances qui sont en place par défaut.

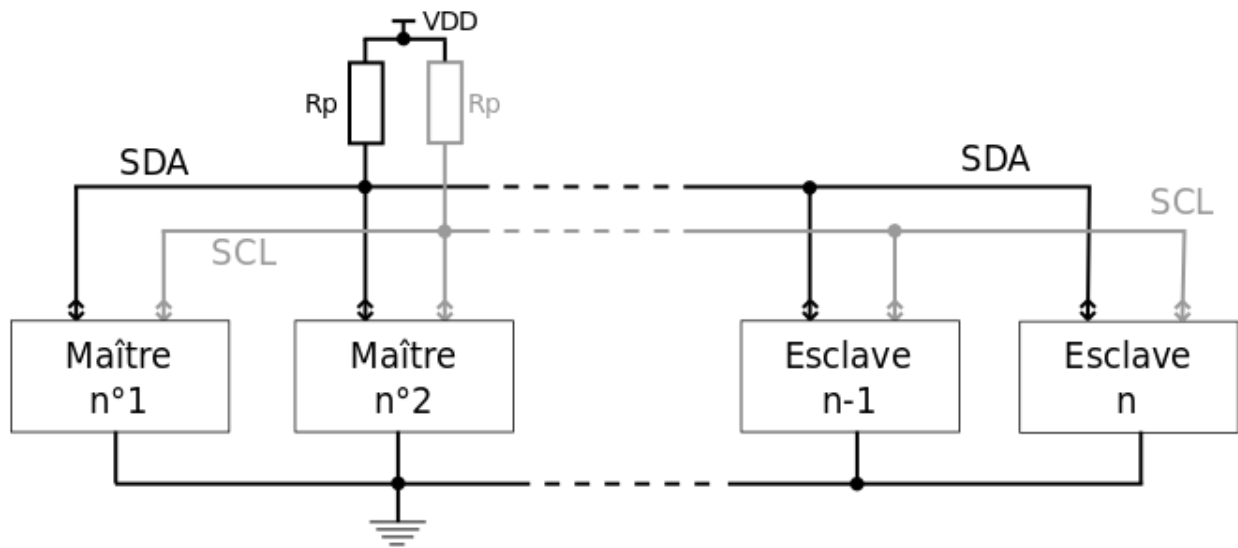


Figure 4. 12 Les lignes SDA et SCL.

4.6.2 Utilisation d'I2C avec Arduino

La première chose à faire est d'identifier l'adresse des périphériques liés à votre carte, et l'adresse de leur divers registres internes. Vous trouverez ces informations dans la fiche technique de votre board. Ensuite, dans le cas d'une connexion de périphériques externes, indépendants ou montés sur d'autres cartes Arduino, il faut identifier les ports attribués aux lignes SDA et SCL de chaque carte ou composants et les relier entre eux.

Il s'agira ensuite principalement de coder les échanges dans votre soft. Vous trouverez ci dessous les principales commandes:

Wire.begin();

Initialisation de la communication I2C, à effectuer au début de votre programme.

Wire.beginTransmission(Adresse de votre périphérique);

Cette commande est à appeler à chaque fois pour initialiser une transmission avec le périphérique dont l'adresse est donnée en argument.

Wire.write(*Adresse du registre sollicité*);

Cette commande permet d'accéder à un registre du périphérique, et est à appeler avec d'écrire ou de lire des données.

Wire.write(*Byte à écrire*);

Écriture des données désirées dans le registre sollicité au préalable.

Wire.requestFrom(*Adresse de votre périphérique, n*);

Lecture de n bits du périphérique adressé, dans le registre sollicité au préalable.

Wire.endTransmission();

Fin de la transmission. Cette commande doit être appelée à chaque fois, et avant l'envoi de toute nouvelle requête par I2C.

4.7 Modulation de largeur d'impulsion (PWM) :

Un signal de modulation de largeur d'impulsion (*Pulse Width Modulation* - PWM) est un signal à onde carrée pour lequel on contrôle la durée durant laquelle le signal reste à l'état haut. Cette portion de temps est nommée le cycle actif (*Duty Cycle*). La fréquence de ce signal doit être significativement plus élevée que la fréquence d'échantillonnage utilisée pour la commande numérique du système afin que le niveau de tension puisse être perçu comme une moyenne durant une période d'échantillonnage. De plus, lorsque ce type de signal est utilisé pour contrôler un moteur, il est souhaitable d'utiliser une fréquence au-delà de la plage de fréquences audible par l'oreille humaine afin d'éviter de produire des sifflements.

4.8 Hardware :**4.8.1 Réalisation des châssis :**

- **Etape 1 :**
 - ❖ Une feuille de plexiglass sur laquelle nous allons installer nos matériaux

- ❖ Des vis et Des écrous pour relier les plates-formes
- ❖ Des fils de raccordement
- ❖ 2x moteurs DC avec un réducteur motorisation
- ❖ 1x L298N H-bridge
- ❖ 1x Arduino Nano
- ❖ 1x gyroscope-module (MPU-6050)
- ❖ 3x batteries 3.7v
- ❖ 1x interrupteur
- ❖ 2 roués

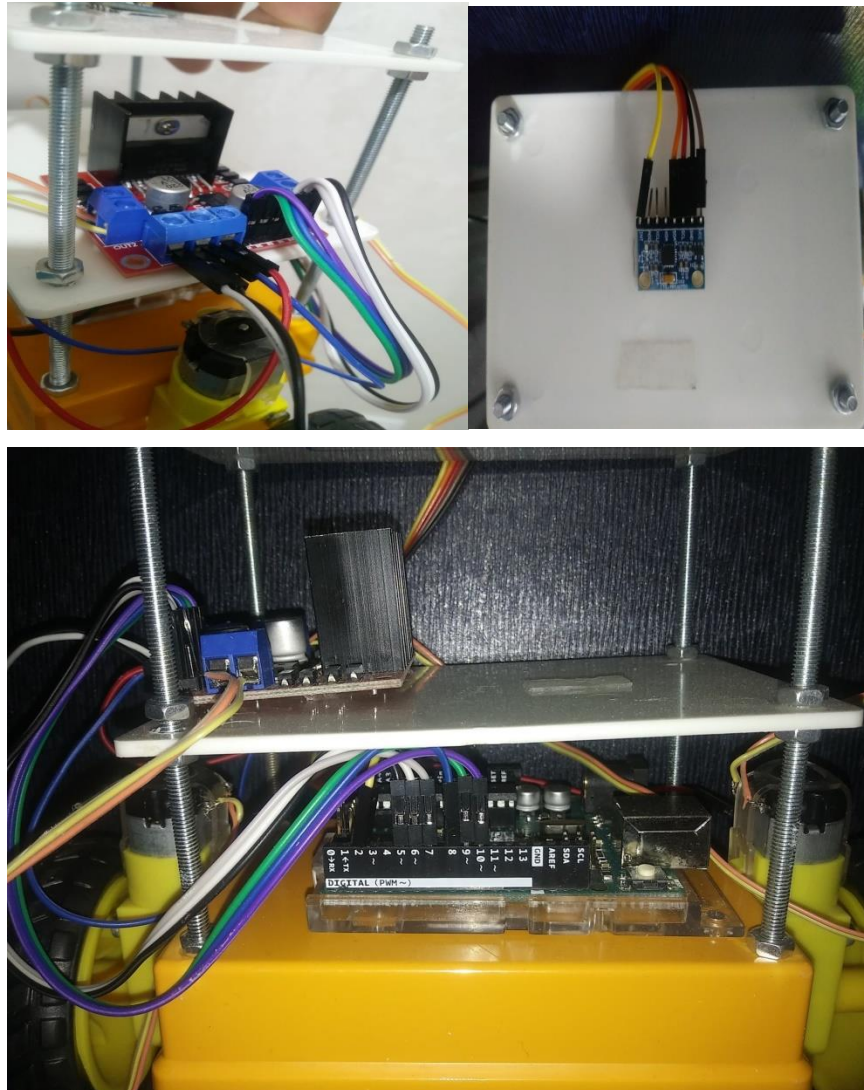


Figure 4. 13 Les component utilisé.

- **Etape 2 :**

La figure suivante illustre le câblage des composants électrique en utilisant le Logiciel Fritzing.

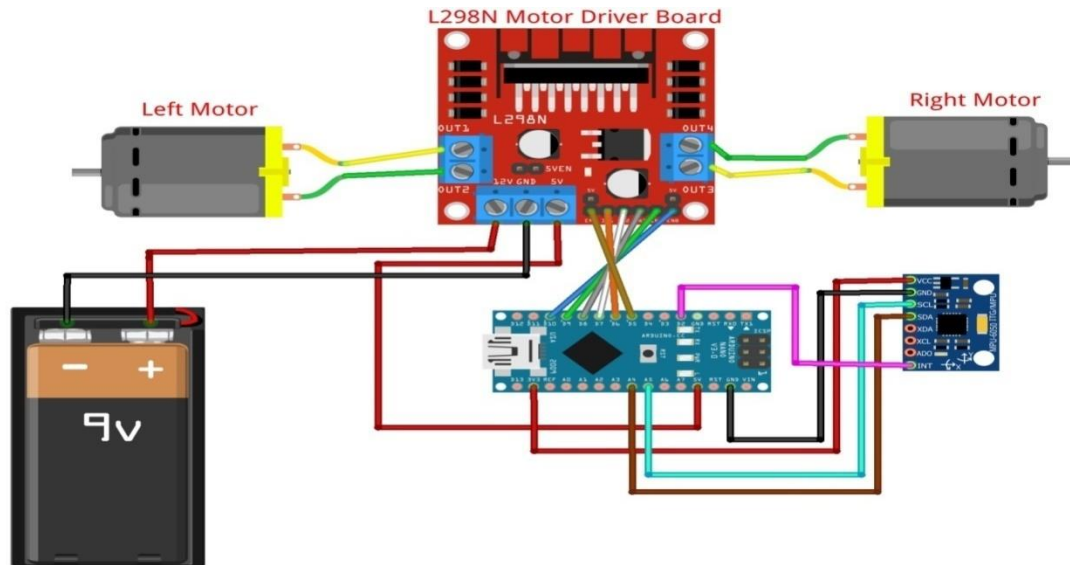


Figure 4. 14 Schema de montage de robot.

- **Etape 3 :**

La structure finale du projet :



Figure 4. 15 Version finale de robot.

4.9 Software:

- Etape 1 : vérification de le programme arduino .



Figure 4. 16Explication de la 1ère fenêtre de l'Arduino IDE.

Un programme utilisateur Arduino est une suite d'instructions élémentaires sous forme textuelle, ligne par ligne. La carte lit puis effectue les instructions les unes après les autres, dans l'ordre défini par les lignes de code.

- **Etape 2:**
 - Fermer l'interrupteur.
 - Connecter l'arduino au PC via un câble USB.
 - Ouvrir le code source de robot auto balance.
 - Vérifier et compiler le code source.
 - Attendre quelques secondes et débranché le câble USB.
 - Ouvrir l'interrupteur.

4.10 Conclusion:

Nous avons pu dans ce chapitre suivre les étapes ayant mené à la réalisation du Robot. Bien qu'il reste beaucoup de travail à faire afin d'améliorer ce premier prototype, le fonctionnement électronique du robot est satisfaisant.

Conclusion général :

Ce projet a réussi à atteindre ses objectifs d'équilibrer un robot à deux roues autonome basé sur le modèle du pendule inversé.

Le modèle mathématique dynamique du robot d'équilibrage est formulé par la méthode de l'équation différentielle en utilisant la procédure de modélisation de l'espace d'état.

Un contrôleur PID est conçu pour découvrir la différence entre le point d'équilibre réel et le point de sortie provenant de l'ensemble du système. La mesure de l'accéléromètre, du contrôleur PID et du microcontrôleur généré par PWM pour les actionneurs est utilisée pour équilibrer un système et conduit l'ensemble du système au point équilibré en faisant tourner les moteurs dans différents sens.

En fine, Plus de recherches sont nécessaires pour étudier les effets de la linéarisation de la dynamique du système afin d'améliorer la stabilité et la robustesse du robot.

1. **Mohamed, FEKIR.** Etude et réalisation et commande d'un robot auto balancé à deux roues. 2017/2018.
2. **Telidji, Hocine Takhi.** Conception et réalisation d'un robot mobile à base d'Arduino . 2014.
3. **Abdelmouneim, khemissat.** Plateforme de prototype rapide pour la robotique mobile :Application à un robot Auto balance . 2015/2016.
4. **Dallal, Shraoui.** Identification paramétrique d'un pendule inverse simple par un algorithme génétique . 2013/2014.
5. **Abdelkrim, mohamed Kouder - Aissa.** Etude et réalisation expérimentale d'une commande destinée à contrôler un pendule inversé . 2016/2017.
6. **Ferhat, Lahouazi.** Mise en œuvre d'une stratégie de commande neuro floue :Application à un pendule inversé . 2011.
7. **Brechet thomas, Tribno julien.** Le pendule inverse et son application en robotique . . 4/04/2018.
8. **Brahim, KHaoula.** Analyse et modélisation :du pendule inversé sur deux roues au fauteuil roulant automatisé FreeMove .
9. **Said, Djennoune.** Linéarisation approximative par bouclage et commande par mode glissant d'un pendule inversé. 2010.
10. **SHUBHANK SONDHIA, RANJITH PILLAI. R,SHARAT S. HEGDE, SAGAR CHAKOLE & VATSAL VORA.** *DEVELOPMENT OF SELF BALANCING ROBOT WITH PID CONTROL.*s.l. : International Journal of Robotics Research and Development , 2017 .
11. **Ahmed Chemori, Sébastien Krut, Nahla Touati.** Le pendule inversé stabilisé par volant d'inertie, un système non linéaire sous-actionné.
12. **Abdelbaki, BENBOUZIANE Mohammed.** Synthèse de régulateur PID pour les systèmes non linéaires incertains du deuxième ordre. 2019.
13. **Daniel Ross, Etienne Deguine, Mickaël Camus.** Asservissement par PID. 2010.
14. **Abdenmour, MALLEK et Ghiles, MERABET.** Régulation de la température huile de turbine de la centrale thermique de CAP-DJINET. 2017.
15. **Boukerche, Ghania.** Etude et Synthèse d'un Contrôleur PI et Application. 2017.
16. **M.DRICHE Madjid, M.IGUENI Belaid.** Etude d'une régulation P,PD de température sur un procédé didactique de type PCT-M4. 2017/2018 .

17. **MEKKI Nabil, BENSAHRA Mounir.** Stabilisation et Commande Adaptative Robuste d'un Pendule Inversé . 2019/2020.
18. **Aghiles ABED, Hassina KACI MOUSSA.** Conception et réalisation d'un système de régulation à base d'un microcontrôleur. 2018 .
19. **Chahira, BOUSSALEM.** Implémentation de régulateurs fractionnaires pour la stabilisation d'un pendule inversé . 2012.
20. **Menouar MEZIANI, Mourad AKKOUL.** Modélisation et simulation d'un pendule inversé . 2016.
21. [En ligne] http://jacques.weber.pagesperso-orange.fr/systemes_boucles/controle_boucle_fermee.html#1_Principes_des_syst%E8mes_de_contr%F4le_en.
22. *electronics tutorial* . [En ligne] <https://www.electronics-tutorials.ws/systems/closed-loop-system.html> .
23. [En ligne] <http://www.ferdinandpiette.com/blog/2011/08/implementer-un-pid-sans-faire-de-calculs/>.

Abstract:

In this project, we worked on two wheeled self-balancing robot, which is based on an inverted pendulum system, This project describes the modeling of the two wheeled self-balancing robot, designs the robot controller using PID and implements the controller on the robot. An inertial measurement unit (IMU) is used, in order to estimate and obtain the tilt angle of the robot.

The PID controller is applied to correct the error between the desired set point and the actual tilt angle and adjust the dc motor speed accordingly to balance the robot. Both wheels connected with two DC motors that are controlled by the L298N module.

ملخص :

في هذا المشروع، عملنا على روبوت ذاتي التوازن ثنائي العجلات، الذي يقوم على نظام البندول المقلوب، يصف هذا المشروع نمذجة الروبوت ذو العجلتين ذاتية التوازن، تصميم وحدة تحكم الروبوت باستخدام PID وينفذ وحدة تحكم على الروبوت. يتم استخدام وحدة قياس القصور الذاتي (IMU)، من أجل تقدير والحصول على زاوية الميل للروبوت. يتم تطبيق وحدة تحكم PID لتصحيح الخطأ بين نقطة المجموعة المطلوبة وزاوية الميل الفعلية وضبط سرعة محرك DC وفقاً لذلك لتحقيق التوازن بين الروبوت. كلا العجلات متصلة مع اثنين من محركات DC التي تسيطر عليها وحدة L298N.

Résumé:

Dans ce projet, nous avons travaillé sur un robot auto balance à deux roues. Basé sur le système de pendule inversé, ce projet décrit la modélisation d'un robot à deux roues auto-équilibrant, Concevoir un contrôleur à l'aide d'un contrôleur PID et implémenter un contrôleur sur un robot. L'unité de mesure inertielle (IMU) est utilisée pour estimer et obtenir l'angle d'inclinaison du robot.

Le contrôleur PID est appliqué pour corriger l'erreur entre le point de consigne requis et l'angle d'inclinaison réel et ajuster la vitesse du moteur à courant continu en conséquence pour équilibrer le robot. Les deux roues sont connectées à deux moteurs à courant continu contrôlés par l'unité L298N.