

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Djilali Bounaama KHEMIS MILIANA



*Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Technologie*

Mémoire Présenté
Pour l'obtention de diplôme

Master

En « Génie Electrique »

Option : « Automatique des systèmes de Production »

Thème :

**Etude et réalisation expérimentale
d'une commande destinée
à contrôler un pendule inversé**

Réalisé par :

- KOUIDER AISSA Abdelkrim
- BELLILA Mohamed

Encadré par :

- Pr. LOUNIS Mourad

Année universitaire : 2016 - 2017

Remerciement

Avant toute chose, nous remercions *DIEU*, le tout puissant, pour nous avoir donnée la force et la patience à terminer ce travail.

Nous exprimons nos profondes gratitude envers Monsieur *Mourad LOUNIS* pour avoir accepté de diriger avec beaucoup d'attention et de soin ce travail. Nous lui sommes très reconnaissantes pour sa disponibilité, sa bienveillance et son permanent, et d'avoir prêté un intérêt constant au sujet de thèse, pour ses critiques constructives et son aide aux différentes entraves rencontrées, pour sa gentillesse et ses qualités humaines.

Nos sincères remerciements vont également à Messieurs les jurys d'avoir acceptés de juger notre travail.

Nous somme profondément reconnaissant envers Monsieur *Ali MALLEM* pour sa disponibilité, sa réponse à nos demandes et sa présence permanente à la question.

Nous ne saurons exprimer nos reconnaissances à notre ami *Mohamed BOUNOUA*, qui nous a constamment aidés sur le plan pratique, nous lui remercions de sa gentillesse, de ses conseils abondants et amicaux, et ses remarques judicieuses qui m'ont beaucoup aidé sur le plan théorique.

Nous voudrions exprimer nous profonde gratitude tous ceux qui, par leurs conseils, leur coopération nos ont aidé il réaliser l'expérience et terminer ce mémoire.

Nous tenons à remercier aussi très chaleureusement tout nos professeurs pour leurs efforts et toutes les informations qu'ils nous ont données pendant nos années d'études.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné à la vie, qui s'est sacrifié pour mon bonheur et ma réussite, a ma *mère* ...

A mon *père*, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, qui a veillé à me donner l'aide, a m'encourager et a me protéger, que dieu les garde et les protège.

A mes agréables *sœurs* et mon *frère* et toute ma famille

A ma meilleure *Lina* et sa nièce *Rym*

A mes copains *Mohamed, Aziz, Kader, Anis*, et *Sophia*

A ma chère amie *Nesrine*

A tous mes amis

A tous ceux qui m'aiment

A tous ceux que j'aime

- Je dédie ce travail -

° *Abdelkrim* °

Dédicace

Au nom d'*ALLAH*, le clément et le miséricordieux

D'abord, je tiens à remercier le tout puissant de me donner le courage et la patience pour arriver à ce stade.

Je dédie ce modeste travail particulièrement à ceux qui m'ont appris le sens de la vie m'ont encouragé, m'ont soutenu durant mes années d'études mon très cher *père* ma chère *mère*.

A mes frères et à toute ma famille

A mon binôme et toute la promotion (2016 - 2017)

A mon ami Mohamed BOUNOUA

A mes copains et copines et toutes personnes que j'ai connues qui m'ont aidé de loin ou de près dans la réalisation de ce travail.

- Je dédie ce travail -

° Mohamed °

Liste Des Figures

Chapitre I : généralité sur la robotique mobile

| | |
|--|----|
| Figure 1.1: La roue | 8 |
| Figure 1.2: L'horlogerie ou Les clepsydres (horloges à eau) | 8 |
| Figure 1.3: Le coq automate des Trois Rois | 9 |
| Figure 1.4: Robot Al-jazari | 9 |
| Figure 1.5: Hypothétique de l'appareil digestif du canard de Vaucanson..... | 10 |
| Figure 1.6: Rover Spatial Lunokhod 1 | 11 |
| Figure 1.7: Armure capable de s'asseoir, relever sa visière et bouger ses bras | 11 |
| Figure 1.8: Le robot (à gauche) Germinoid F | 12 |
| Figure 1.9: Architecture générale d'un système robotisé | 13 |
| Figure 1.10: Véhicule robotisé contrôlé par téléphone portable | 14 |
| Figure 1.11: Constitution d'un robot manipulateur (fixe) | 14 |
| Figure 1.12: Robot manipulateur de séquence variable | 15 |
| Figure 1.13: Le robot Paul vous tire le portrait..... | 15 |
| Figure 1.14: Le robot talentueux joue le piano | 16 |
| Figure 1.15: Robot intelligent | 16 |
| Figure 1.16: Les trois cas du pendule inversé | 19 |
| Figure 1.17: Diagramme de fonctionnement d'un robot pendule inversé | 20 |
| Figure 1.18: Robot auto-équilibré de l'Université de Electro-Communication | 21 |
| Figure 1.19: Equibot d'équilibrage..... | 21 |
| Figure 1.20: Le Segbot..... | 22 |
| Figure 1.21: Le UMASS uBot-5 | 23 |
| Figure 1.22: Le nBot | 23 |
| Figure 1.23: Le robot JOE..... | 23 |
| Figure 1.24: Le robot CMU Ballbot..... | 24 |
| Figure 1.25: Le robot Rezero Ballbot | 24 |
| Figure 1.26: Le Segway HT | 25 |
| Figure 1.27: Le projet de 'Rich Chi Ooi' | 26 |

Chapitre II : Modélisation du mouvement d'un pendule inversé

| | |
|--|----|
| Figure 2.1 : Schémas d'un moteur DC | 30 |
| Figure 2.2 : Schémas corps libre pour les deux roues..... | 33 |
| Figure 2.3 : Schémas corps libre du châssis..... | 35 |
| Figure 2.4 : Pôles-zéros du système en boucle ouverte | 39 |
| Figure 2.5 : Réponse impulsionnelle du système en boucle ouverte | 40 |

Chapitre III : Commande et résultat de simulation

| | |
|--|----|
| Figure 3.1: Calculer de Tcr | 45 |
| Figure 3.2: Réponse impulsionnelle de l'angle d'inclinaison | 46 |
| Figure 3.3: Système en boucle ouverte | 47 |
| Figure 3.4: Bouclage du système par un vecteur de gain..... | 48 |
| Figure 3.5: La réponse impulsionnelle du système (les pôles à partie réelle négatif) | 49 |
| Figure 3.6 : La réponse impulsionnelle du système (les pôles sur l'axe imaginaire)..... | 50 |
| Figure 3.7 : La réponse impulsionnelle du système (3 ^{ème} cas)..... | 51 |
| Figure 3.8: Principe d'une commande LQR | 52 |
| Figure 3.9 : La réponse impulsionnelle du système avec la commande LQR lorsque(a>>>) | 55 |
| Figure 3.10 : la réponse impulsionnelle du système avec la commande optimale (LQR)..... | 56 |

Chapitre IV : Conception et réalisation d'un robot équilibriste

| | |
|---|----|
| Figure 4.1 : Moteurs a courant continue | 59 |
| Figure 4.2 : Courant dans un champ magnétique..... | 60 |
| Figure 4.3 : Le système balais-collecteurs | 61 |
| Figure 4.4 : Schéma équivalent du moteur à courant continu..... | 61 |
| Figure 4.5 : Module hacheur pont H..... | 62 |
| Figure 4.6 : Circuit L298..... | 63 |
| Figure 4.7 : Pont H a transistor CMOS | 64 |
| Figure 4.8 : MPU 6050 | 65 |
| Figure 4.9 : Carte Arduino UNO | 67 |
| Figure 4.10 : Arduino UNO la carte électronique..... | 68 |
| Figure 4.11 : Lignes SDA et SCL | 71 |
| Figure 4.12 : Montage réalisé | 73 |
| Figure 4.13 : Deux moteurs à courant continu avec un réducteur 'Pololu' | 74 |
| Figure 4.14 : Deux roues de 65 mm..... | 74 |
| Figure 4.15 : Le pont H 'L298N' | 75 |
| Figure 4.16 : Jumper fils | 75 |
| Figure 4.17 : Batterie Lipo 11.1 V | 75 |
| Figure 4.18 : Une feuille de plexiglass | 76 |
| Figure 4.19 : Les deux moteurs fixés sur la feuille de plexiglass | 76 |
| Figure 4.20 : Les deux faces de robot pendule inversé réalisé | 77 |
| Figure 4.21 : Explication de la 1ère fenêtre du logiciel Arduino..... | 78 |
| Figure 4.22 : Structure d'un programme (Sketch) Arduino..... | 79 |

Liste Des Tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 3.1: Les paramètres de PID avec (Ziegler Nichols)..... | 45 |
| Tableau 3.2: Les caractéristiques de la réponse impulsionnelle (1 ^{er} cas) | 49 |
| Tableau 3.3 : Les caractéristiques de la réponse impulsionnelle (2 ^{ème} cas)..... | 50 |
| Tableau 3.4: Les caractéristiques de la réponse impulsionnelle (3 ^{ème} cas)..... | 51 |
| Tableau 3.5: Les caractéristiques de la réponse impulsionnelle d'une commande optimale | 56 |
| | |
| Tableau 4.1 : Niveau High et Low du bus I2C..... | 71 |
| Tableau 4.2 : Les modes de transmission..... | 72 |

Nomenclature

| | |
|----------------------|---|
| x | vecteur d'état de processus. |
| u | fonction d'entrée de commande |
| I_R | inertie de rotor |
| τ_m | Couple de moteur |
| τ_e | Couple appliqué |
| M_w | la masse de la roue |
| M_p | la masse du châssis du robot. |
| I_w | moment d'inertie des roues. |
| I_p | moment d'inertie du châssis du robot. |
| H_L, H_R, P_L, P_R | forces de réaction entre la roue et le châssis. |
| l | distance entre les centres du roue et le centre de la gravité du robot |
| C_L, C_R | couple appliqué aux roues par les moteurs |
| H_{fL}, H_{fR} | forces de frottement entre la terre et les roues. |
| θ_w | angle de rotation des roues. |
| θ_p | angle de rotation du châssis. |
| k_m | Constante de couple |
| k_e | Constante de force électromotrice |
| R | Résistance nominale |
| L | Inductance de rotor |
| V_a | Tension appliquée |
| $\dot{\theta}_w$ | vitesse angulaire de roue |
| k_f | Constante de frottement |
| θ | Position angulaire de l'arbre |
| ω | Vitesse angulaire de l'arbre |
| α | Accélération angulaire de l'arbre |
| V_e | tension f.e.m |
| i | Courant à travers l'armature |
| k_p | Gain proportionnel |
| k_i | Gain intégrale |
| k_d | Gain dérivatif |

SOMMAIRE

| | |
|---|------|
| Remerciements | II |
| Dédicaces | III |
| Listes des figures | V |
| Listes des Tableaux | VII |
| LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES | VIII |
| Sommaire | IX |
| Résumé | XII |
| Introduction générale | 1 |

Chapitre I : Généralité sur la robotique mobile

| | | |
|-------|---|----|
| I.1 | La robotique..... | 6 |
| I.1.1 | Définition..... | 7 |
| I.1.2 | Historique | 7 |
| I.1.3 | Désclines de la robotique..... | 13 |
| I.1.4 | Composants fonctionales | 13 |
| I.1.5 | Classification des robots | 14 |
| I.1.6 | Caractéristique d'un robot | 17 |
| I.2 | Robot pendule inversé..... | 18 |
| I.2.1 | Intérêt de l'étude d'un pendule inversé | 19 |
| I.2.2 | L' état de l'art | 20 |
| I.3 | Conclusion | 28 |

Chapitre II : Modélisation du mouvement d'un pendule inversé

| | | |
|-------|---|----|
| II.1. | Modèle linéaire d'un moteur à courant continu (DC) | 30 |
| II.2. | Modèle dynamique pour un pendule inversé à deux roues | 32 |
| II.3. | Modèle d'état de la dynamique linéaire | 38 |
| II.4. | Problème de contrôle | 39 |
| II.5. | Conclusion | 40 |

Chapitre III : Commande et résultats de simulation

| | | |
|---------|--|----|
| III.1 | Commandabilité et observabilité..... | 42 |
| III.2 | Le cahier des charges..... | 43 |
| III.3 | La commande classique (PID)..... | 43 |
| III.3.1 | Actions du régulateurs PID :..... | 44 |
| III.3.2 | Méthodes de Ziegler et Nichols | 45 |
| III.3.3 | Commande de l'inclinaison du robot par PID | 45 |
| III.4 | Commande par retour d'état..... | 47 |
| III.4.1 | Introduction..... | 47 |
| III.4.2 | Principe de la commande par retour d'état | 47 |
| III.4.3 | Commande par placement de pôles | 48 |
| III.5 | Commande optimale..... | 51 |
| III.5.1 | Commande linéaire quadratique (LQR)..... | 52 |
| III.5.2 | Le choix des matrices de pondération..... | 54 |
| III.6 | Conclusion | 57 |

Chapitre IV : Conception et Réalisation d'un robot équilibriste

| | | |
|----------|---|----|
| IV.1 | Composants et dispositifs..... | 59 |
| IV.1.1 | Moteurs | 59 |
| IV.1.2 | Module hacheur L298 | 62 |
| IV.1.3 | Les capteurs..... | 64 |
| IV.1.4 | Carte Arduino..... | 66 |
| IV.1.4.1 | Principe de fonctionnement : | 68 |
| IV.2 | Communication..... | 69 |
| IV.2.1 | Protocole de communication..... | 69 |
| IV.2.1.1 | Introduction..... | 69 |
| IV.2.1.2 | Bluetooth..... | 69 |
| IV.2.1.3 | Radio communication | 69 |
| IV.2.1.4 | Bus I2C | 70 |
| IV.2.1.5 | Modulation de largeur d'impulsion (PWM) | 72 |
| IV.3 | Réalisation..... | 73 |
| IV.4 | Conclusion : | 80 |

| | |
|---------------------------|----|
| Conclusion générale | 81 |
| Annexes | 83 |
| Bibliographie | 89 |

Résumé

Ce travail de fin d'étude aborde le sujet de la modélisation, la commande et la réalisation d'un robot pendule inversé. Les robots pendulaires et ces différents types ont été présentés. Les équations de mouvement du système ont été établies ainsi que le modèle linéaire pour un moteur à courant continu et le problème de contrôle. Dans ce travail, nous avons étudié la conception de régulateurs pour des systèmes aux équations d'états linéaires. Après une étude précise des composants et des dispositifs de commande utilisés dans la conception du Robot équilibriste (self balancing robot), nous avons réalisé d'un pendule inversé à deux roues.

ملخص

يتحدث عمل التخرج هذا حول النمذجة و التحكم في الروبوت النواس و إنشائه. نقوم بتعريف الروبوتات النواسة و مختلف أنواعها. ثانيا ننشئ معادلات الحركة لهذا النظام بالإضافة إلى النموذج الخطي للمحرك ذو التيار المستمر، و نخرج على مشكلة السيطرة. بعدها نقوم بدراسة تصميم الطوابق لنظم معادلات الحالة الخطية. ننهي عملنا بإنشاء و صنع نموذج للروبوت النواس ثنائي العجلة بعد دراسة دقيقة لمكونات وأجهزة التحكم المستخدمة في تصميم روبوت التوازن الذاتي.

Abstract

This work of end of study deals with the subject of the modeling, the control and the realization of an inverted pendulum robot. The pendulous robots and these different types have been presented. The equations of motion of the system have been established as well as and the linear model for a DC motor and control problem. In this work, we studied the design of regulators for systems with linear state equations. After a precise study of the components and control devices used in the design of the self balancing robot, we realized a reversed pendulum with two wheels.

Introduction Générale

Introduction Générale

L'évolution de la science et des technologies nous permet aujourd'hui de mieux comprendre l'univers qui nous entoure et de mieux appréhender les principes qui le régissent. En conséquent, l'homme est désormais capable de créer des systèmes plus puissants, plus précis et plus efficaces et de repousser encore plus loin les limites que nous imposent les lois de la physique.

La robotique est l'un des domaines où l'on peut réellement observer l'étendue de cette avancée. En effet, on est aujourd'hui en mesure de concevoir des robots doués d'une réelle intelligence, capables d'agir avec précision en fonction des tâches qu'ils sont chargés d'accomplir et des conditions dans lesquelles ces tâches sont exécutés en relevant à chaque fois de nouveaux défis.

Parmi ces défis, le pendule inversé a toujours été l'une des problématiques majeures de tout système dont le centre de gravité se trouve au-dessus de son axe de pivotement ou de rotation. On en trouve des exemples d'applications dans de nombreux domaines mais plus particulièrement dans les transports. Ainsi, les trains à grandes vitesse, les Segway et les fusées spatiales représentent tous plus ou moins des pendules inversés. L'exemple le plus simple à observer reste néanmoins le corps humain. Il s'agit en effet d'un triple pendule inversé où les chevilles, genoux et hanches représentent les axes de rotations. De ce fait, les prothèses médicales modernes intègrent aujourd'hui une électronique embarquée afin d'aider le patient à se maintenir en équilibre sans effort.

En outre, la commande de ces systèmes non linéaires sous actionnés représente encore un champ très large et intéressant dans les travaux de recherche de nos jours, où la conception des contrôleurs pour les systèmes sous actionnés ne se limite pas à l'intérêt de commander ceux-ci, mais elle présente un avantage pour les systèmes qui sont entièrement actionnés et qu'ils ont aussi besoin d'avoir des contrôleurs de ce genre, ces contrôleurs sont implémentés en raison de sécurité dans le cas où un des actionneurs de ces systèmes subit un échec.

Dans ce qui suit, nous essayerons de concevoir et de réaliser un robot auto-équilibré à deux roues motrices. Nous porterons une attention particulière à l'électronique embarquée sur le « Robot mobile de type pendule inversé » et nous en expliquerons le fonctionnement avec son modèle mathématique. Enfin, nous faisons une synthèse des trois lois de commande utilisées à travers une simulation avec MATLAB, et nous discuterons les résultats obtenus.

Introduction Générale

Pour ce faire, dans le premier chapitre, nous aborderons l'état de l'art dans le domaine de la robotique et de la robotique mobile. Nous passerons en revue l'historique ainsi que les principes de fonctionnement qui régissent le domaine et nous caractériseront les grandes familles de ces robots. Dans le second chapitre Nous établissons les équations du mouvement pour un pendule inversé à deux roues et le modèle linéaire pour un moteur à courant continu sont décrites, ainsi que la représentation du modèle dans l'espace d'état. Dans le troisième chapitre nous nous concentrerons sur la commande du robot pendule inversé, donc, nous introduisons trois types de commande : la commande PID, la commande par placement des pôles et la commande optimale LQR, puis nous faisons une simulation de ces modèles sous MATLAB/SIMULINK avec commentaire des différents résultats de simulation numérique. Enfin, dans le dernier chapitre, nous nous intéressons de plus près aux robots pendules inversés, en présentant les différentes composants et dispositifs de commande utilisés dans la conception du Robot équilibriste. Afin de pouvoir concevoir un correcteur capable de stabiliser le robot et lui faire poursuivre une trajectoire, il est nécessaire dans un premier temps de mettre au point un modèle mathématique qui représente fidèlement son comportement.

Chapitre

1

*Généralités sur
la robotique mobile*

Chapitre I : Généralité sur la robotique mobile

Dans ce chapitre, nous ferons un tour d'horizon sur la robotique en générale et les robots équilibristes (pendules inversés mobiles), en particulier. Nous donnerons les définitions de base et ferons l'histoire des robots en citant quelques types de robots, leurs caractéristiques et quelques domaines d'application. Cette revue littéraire est essentielle pour fournir au chercheur les informations utiles sur les technologies disponibles et les méthodologies utilisées de part le monde sur le sujet du pendule inversé mobile.

I.1. La robotique

C'est l'auteur dramatique tchèque Karel Capek qui fit découvrir le mot « Robot » en 1921, avec sa pièce de théâtre *R. U. R (Rossum's Universal Robots)*. Celle-ci décrivait une société dans laquelle une usine fabriquait des travailleurs artificiels qui ressemblaient aux êtres humains et pouvaient penser par eux-mêmes. L'idée initiale de Karel Capek était d'utiliser un dérivé du mot latin *labor* (travail). Les robots faillirent donc s'appeler Labori. Mais pas satisfait de son idée, il demanda l'avis à son frère, le peintre cubiste Josef Capek. Celui-ci proposa tout de suite un mot dérivé de *robota*, en slave qui signifie « corvée » [1].

Les robots étaient nés ! Si la pièce de théâtre n'a pas laissé un souvenir impérissable, le mot prit vite de l'ampleur. Fritz Lang le reprit en 1927 pour désigner dans son film *Metropolis* les êtres mécaniques. Quant à la robotique, c'est l'auteur de science-fiction Isaac Asimov qui l'extrapola, en 1942, dans son livre *Run around*. Il y énonce les « trois règles de la robotique » qui deviendront par la suite les trois lois de la robotique :

- Un robot ne peut porter atteinte à un être humain, ni, restant passif, permettre qu'un être humain soit exposé au danger.
- Un robot doit obéir aux ordres que lui donne un être humain, sauf si de tels ordres entrent en conflit avec la Première loi.
- Un robot doit protéger son existence tant que cette protection n'entre pas en conflit avec la Première ou la Deuxième loi.

Chapitre I : Généralité sur la robotique mobile

I.1.1. Définition

La **robotique** peut être définie comme l'ensemble des techniques et études tendant à concevoir des systèmes mécaniques, informatiques ou mixtes, capables de se substituer à l'Homme dans ses fonctions motrices, sensorielles et intellectuelles [1].

Les **robots** sont des systèmes munis de capteurs, capables d'agir de façon autonome et pas seulement selon un programme préétabli. Ces dispositifs dits « intelligents » sont capables de recueillir des informations extraites de leur environnement dont le traitement va influencer leur fonctionnement [2].

D'autres définitions sont aussi proposées :

- "C'est une machine pouvant manipuler des objets et réalisant des mouvements variés dictés par un programme aisément modifiable." *Jeunesse et science*.
- "Appareil automatique capable de manipuler des objets ou d'exécuter des opérations selon un programme fixe ou modifiable." *Petit Larousse*
- "Un manipulateur reprogrammable multifonctionnel conçu pour déplacer des matériaux, des outils, des pièces ou des composants spécialisés à travers une série de mouvements programmés pour effectuer une tâche précise." *Institut de robotique d'Amérique, 1979*
- "Le robot effectue des tâches répétitives et/ou précises dans des environnements de travail trop dangereux pour l'Homme. Bien qu'ils effectuent des tâches automatiques, les robots doivent aussi pouvoir s'adapter à des situations particulières et/ou non prévus par le roboticien. Cela est possible grâce à l'Intelligence Artificielle." *Robot-site Université Lyon 2*.

I.1.2. Historique

La robotique est passée par plusieurs générations notamment [3] :

- **Les premiers mécanismes**, Apparue vers 3500 av. J-C. la roue (Figure 1.1) est considérée comme le premier ouvrage technique significatif de l'histoire de l'humanité, que ce soit pour les tours de potiers ou pour le transport.

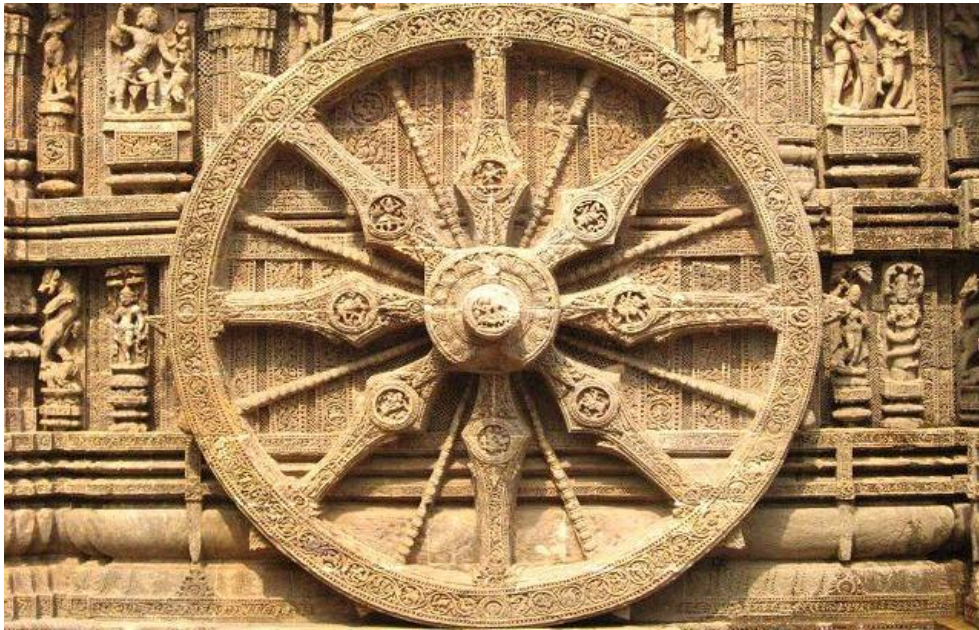


Figure 1.1 – La roue

- **L'horlogerie**, Les clepsydes (horloges à eau) furent probablement inventées vers 1600 av. J-C. en Egypte. De simples bols percés dont l'écoulement régulier permettait une mesure rudimentaire du temps (figure 1.2), elles furent perfectionnées en Grèce quelques siècles avant Jésus Christ, avant de constituer de véritables automates sophistiqués sous les civilisations chinoises et arabes du premier millénaire.

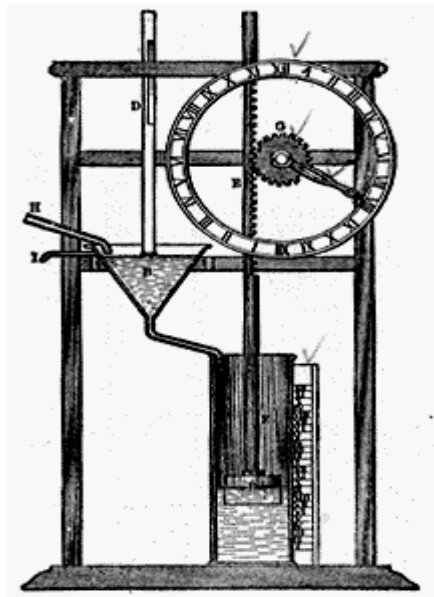


Figure 1.2 – L'horlogerie ou Les clepsydes (horloges à eau)

Chapitre I : Généralité sur la robotique mobile

L'horlogerie est aussi le berceau des premiers automates dont nous avons la trace, le plus ancien conservé étant le coq automate des Trois Rois (figure 1.3) de l'horloge astronomique de la cathédrale Notre-Dame de Strasbourg.



Figure 1.3 - Le coq automate des Trois Rois

- **Les Automates**, Humanoïdes mécaniques non programmables: Al-Jazari 1136-1206 réalisé le premier robot humanoïde en 1206 qui innove sur les automates non programmables. Le robot d'Al-Jazari, (figure 1.4), fabriqué pour les fêtes royales, était au départ un bateau flottant sur un lac et embarquant quatre musiciens automatiques.



Figure 1.4 – Robot Al-jazari

Chapitre I : Généralité sur la robotique mobile

Un des automates les plus surprenants est certainement le canard digérateur de Jacques de Vaucanson (1738). Capable de boire, manger, cancaner et digérer comme un véritable animal (figure 1.5).

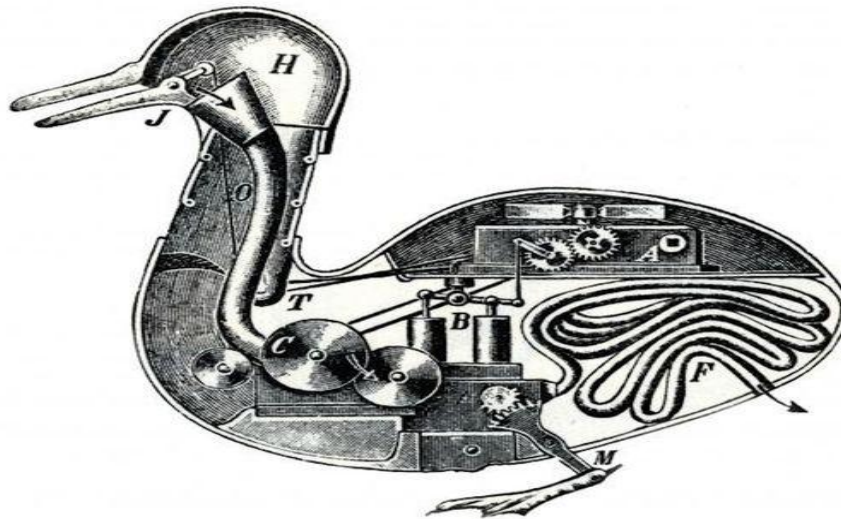


Figure 1.5 - Schéma hypothétique de l'appareil digestif du canard de Vaucanson

- **La cybernétique**, Les automates autorégulés forment la base de la cybernétique. Ici les automates ne se contentent pas d'effectuer des mouvements préprogrammés, mais interagissent avec leur environnement, qui les gouverne.
- **L'intelligence artificielle**, Dans la droite ligne de la cybernétique, l'objectif de rendre les machines intelligentes a mené Alan Turing à définir en 1950 une méthode afin de tester la présence d'une conscience ou d'une intelligence au sein d'une machine. C'est le test de Turing, discuté de nos jours, mais certainement fondateur dans le domaine de l'intelligence artificielle, tout comme les travaux de John McCarthy qui définit le terme d'« intelligence artificielle » (1956).
- **Les rovers**, Véhicules destinés à explorer la surface de planètes de façon quasiment autonome, effectuer des mesures et prélever des échantillons, les rovers (ou astromobiles) furent développés par les russes dès les années 1960, tel le Lunokhod 1 (figure 1.6). La Nasa développa aussi des rovers à partir de 1970 dans le cadre du programme Apollo. Sojourner explora la planète Mars en 1997 et Curiosity en 2012.

Chapitre I : Généralité sur la robotique mobile

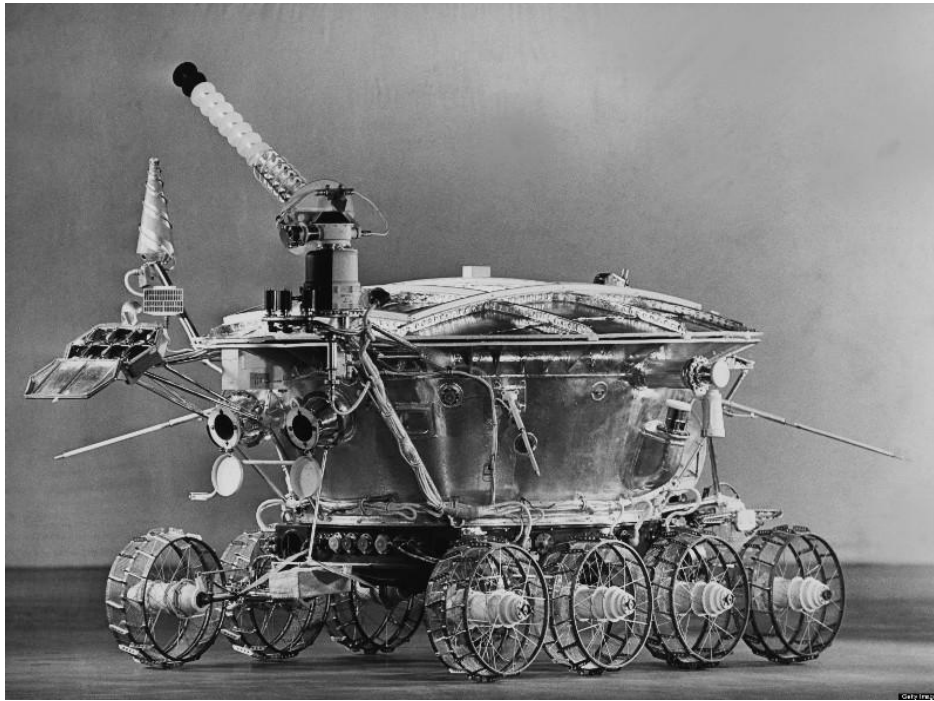


Figure 1.6 – Rover Spatial Lunokhod 1

- **Les animats**, Animaux artificiels, ils sont l'objet d'une branche particulière de la cybernétique dont l'objectif est de copier les mécanismes du vivant. Si le terme animat ne fut défini qu'en 1985 par S.W. Wilson, en revanche les machines inspirées du vivant ont de tous temps stimulé les artistes et savants.
- **Les robots humanoïdes**, Le premier robot humanoïde est probablement dû à Léonard De Vinci, qui présenta en 1495 un chevalier en armure capable de s'asseoir, relever sa visière et bouger ses bras. Après avoir découvert ses notes et schémas en 1950, une réplique fonctionnelle fut construite et exposée au musée de Berlin (figure 1.7).



Figure 1.7 - Armure capable de s'asseoir, relever sa visière et bouger ses bras

Chapitre I : Généralité sur la robotique mobile

- **1973** : WABOT-1 de l'université de Waseda (1973) est l'un des premiers robots humains capables de se déplacer (de façon rudimentaire).
- **1985** : WHL-11 de Hitachi.
- **1986-1993** : Les premiers robots de Honda E0 à E6.
- **1992-1997** : P1 à P3 capable de marcher comme un humain et de monter des escaliers.
- **2000** : Le 11^{ème} robot développé par Honda, Asimo, est capable de courir.
- **2003** : SDR pour Sony Dream Robot, tel que SDR-3X. Ils seront renommés QRIO.
- **2005-2006** : Nao est un petit robot humanoïde de la société française Aldebaran Robotics. Il est autonome, programmable et forme une plateforme pédagogique idéale pour la recherche et l'enseignement. Une version « Next Gen » améliorée a été lancée fin 2011.
- **2007** : Robot violoniste de Toyota.
- **2010** : Kobian de l'université Waseda au Japon est un robot capable de reproduire les expressions humaines.
- **2012** : Des robots dans un souci de réalisme maximal, comme le Geminoid F (figure 1.8) de l'université d'Osaka et du laboratoire ATR de Hiroshi Ishiguro.



Figure 1.8 – Le robot (à gauche) Germinoid F

- **Les exosquelettes**, Qu'ils soient biomécaniques ou motorisés, ces squelettes externes mécaniques auraient de nombreuses applications : dans la médecine afin d'aider les personnes handicapées motrices à se déplacer, ou même dans le domaine militaire afin de rendre les soldats plus forts et endurants.

Chapitre I : Généralité sur la robotique mobile

I.1.3. Disciplines de la robotique

- Mécanique : Conception, réalisation, modélisation des robots.
- Electronique : Mise en place de composants pour les robots, télécommunications
- Informatique : Création de programmes destinés à la gestion du transfert d'information entre les différents composants du robot.
- Automatique : Commande, calibrage des capteurs, des effecteurs, identification des paramètres.
- Traitement du signal : Analyse des informations enregistrées par les capteurs du robot.
- Mathématiques : Modèles mathématiques pour la prise de décision ou/et l'apprentissage, calcul de trajectoires, localisation, planification.
- Sciences cognitives : Interactions homme-machine, machine-machine, prise de décision.

I.1.4. Composants fonctionnels

Les composants fonctionnels, figure (1.9), qui constituent la base d'un système robotisé sont [4]:

- Mécanismes: Système de corps articulés disposant d'une haute mobilité.
- Actionneurs: Générateurs d'actions mécanismes pour mettre le mécanisme en mouvement.
- Capteurs: Mesure l'état du système mécanique et extraction d'informations relatives à la tâche et l'environnement dans lequel le système évolue.
- Système de contrôle: Ensemble électronique pour la commande des actions à partir d'informations des capteurs.
- Interface de programmation: Système de communication entre l'opérateur et la machine ou entre les machines (Interface graphique, interface de télé opération, langage structuré, etc. . . .)

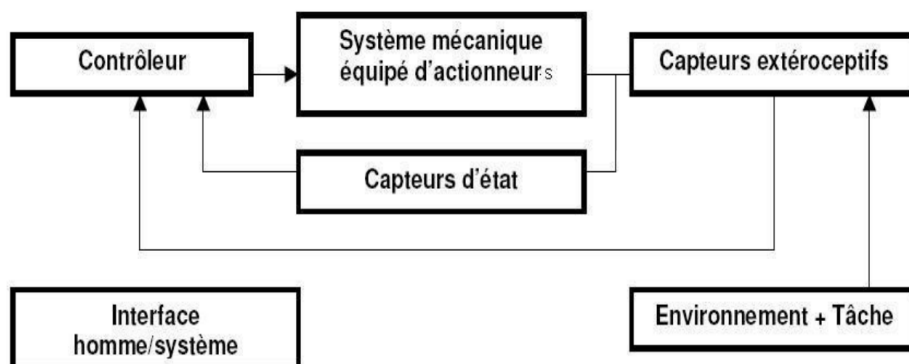


Figure 1.9 – Architecture générale d'un système robotisé

Chapitre I : Généralité sur la robotique mobile

I.1.5. Classification des robots [5]

Selon JIRA, nous pouvons classifie les robots comme suit :

JIRA (*Japanese Industrial Robot Association*) principalement concerné par des robots industriels, mais a créé un système de classification par robot.

a) *Robot manuel*

Ce type de robot a plusieurs degrés de liberté, mais toutes ses actions sont réalisées sous le contrôle direct d'un opérateur.



Figure 1.10 - Véhicule robotisé contrôlé par téléphone portable

b) *Robot de séquence fixe*

Ce type de robot répète une séquence fixe d'actions sans avoir à être contrôlé par un opérateur.

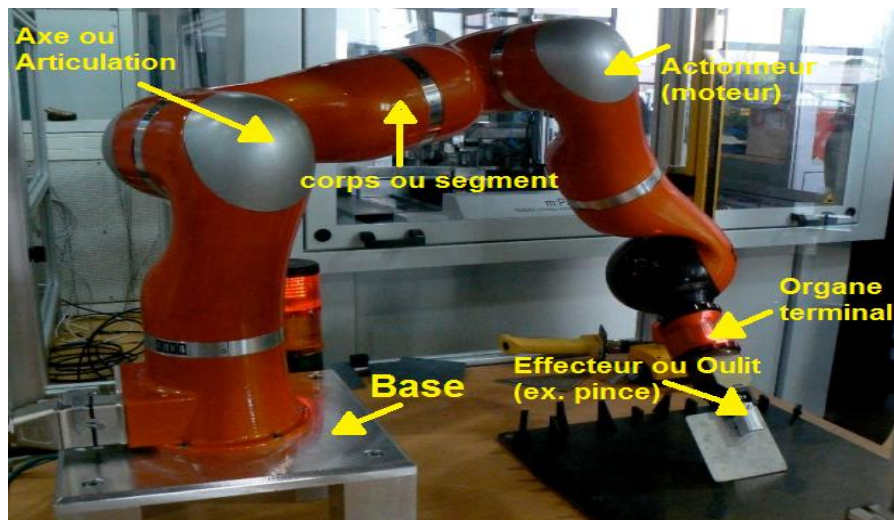


Figure 1.11 - Constitution d'un robot manipulateur (fixe)

Chapitre I : Généralité sur la robotique mobile

c) *Robot de séquence variable*

Ce type de robot est similaire à la classe b, sauf que la séquence d'actions peut être reprogrammée facilement, ce qui lui permet d'être rapidement adapté pour effectuer de nouvelles tâches.



Figure 1.12 – Robot manipulateur de séquence variable

d) *Robot numérique*

Ce type de robot se déplace à travers une séquence d'actions qu'il reçoit sous forme de données numériques.

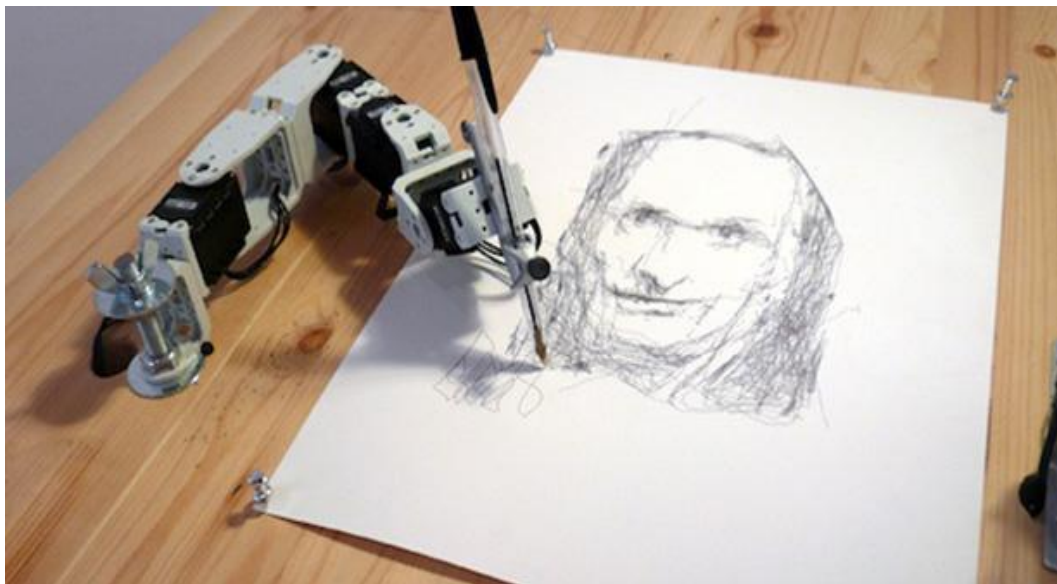


Figure 1.13 – Le robot Paul vous tire le portrait

Chapitre I : Généralité sur la robotique mobile

e) *Robot de lecture*

Ce type de robot est d'abord guidé par une séquence d'actions par un opérateur, puis répète les mêmes actions automatiquement.

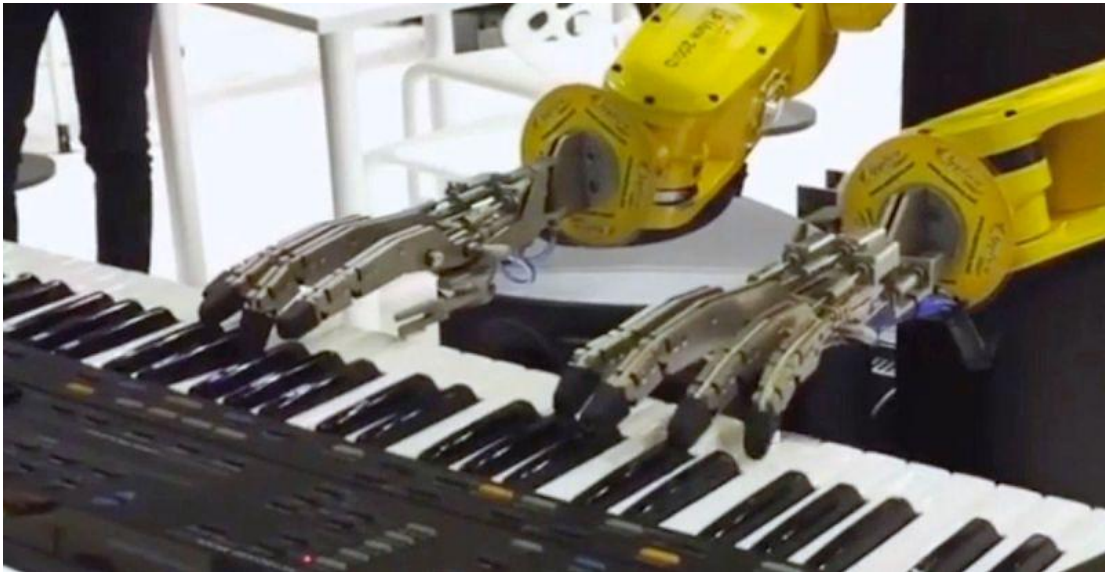


Figure 1.14 - Le robot talentueux joue le piano

f) *Robot Intelligent*

Un robot qui sent son environnement et répond à ses changements afin de continuer à exercer sa fonction.



Figure 1.15 – Robot intelligent

I.1.6. Caractéristiques d'un robot

Un robot doit être choisi en fonction de l'application qu'on lui réserve. Voici quelques paramètres à prendre, éventuellement, en compte [1] :

A. La charge maximale transportable

De quelques kilos à quelques tonnes, à déterminer dans les conditions les plus défavorables (en élongation maximum).

B. Le volume de travail

Défini comme l'ensemble des points qu'on peut atteindre par l'organe terminal. Tous les mouvements ne sont pas possibles en tout point du volume de travail. L'espace (volume) de travail (reachable workspace), également appelé espace de travail maximal, est le volume de l'espace que le robot peut atteindre via au moins une orientation. L'espace de travail de dextérité (dextrous- workspace) est le volume de l'espace que le robot peut atteindre avec toutes les orientations possibles de l'organe terminal. Cet espace de travail est un sous-ensemble de l'espace de travail maximal.

C. Le positionnement absolu

Il correspond à l'erreur entre un point souhaité (réel), défini par une position et une orientation dans l'espace cartésien et le point atteint. Il est calculé via le modèle géométrique inverse du robot. Cette erreur est due au modèle utilisé, à la quantification de la mesure de position et à la flexibilité du système mécanique. En général, l'erreur de positionnement absolu, également appelée précision, est de l'ordre de 1 mm.

D. La répétabilité

Ce paramètre caractérise la capacité que le robot à retourner vers un point (position, orientation) donné. La répétabilité correspond à l'erreur maximum de positionnement sur un point prédéfini dans le cas de trajectoires répétitives.

E. La vitesse de déplacement

Vitesse maximum en élongation maximum ou accélération.

F. Tâches

- Les robots ont un ensemble de tâches à réaliser
- Leur exécution consomme du temps et des ressources.

Chapitre I : Généralité sur la robotique mobile

- De plus, des contraintes (temporelles, spatiales, etc.) peuvent leur être associées.

G. Niveaux d'autonomie

- Robots télécommandés : aucune autonomie, les commandes sont envoyées au robot par l'utilisateur.
- Robots semi-autonomes : l'utilisateur intervient en cas de panne ou de situations non-prévues.
- Robots totalement autonomes : l'utilisateur n'intervient jamais.

H. Environnement :

Les robots évoluent généralement dans des environnements :

- Dynamiques.
- Incertains.
- Partiellement observables.

Les robots n'ont qu'une observabilité limitée de l'environnement dans lequel ils évoluent :

- Vision locale de l'environnement.
- Information sur les autres robots.
- erreurs et imprécision sur les capteurs.
- Par ailleurs, les environnements peuvent être difficilement accessibles et les erreurs irrémédiables : nécessite d'avoir recours à la simulation avant l'exécution.
- La simulation offre la possibilité d'étudier et de tester les comportements des robots.

Il existe d'autres caractéristiques comme : La masse du robot, le coût du robot, la maintenance...

I.2. Robot pendule inversé

Un pendule inversé est un pendule dont le centre de gravité est au dessus de son point de pivotement. Il est souvent mis en œuvre avec le point de pivot monté sur un chariot, appelé un panier, qui peut se déplacer horizontalement. Alors qu'un pendule normale est stable lorsqu'il est accroché à un point, un pendule inversé est intrinsèquement instable, et doit être activement équilibrée afin de rester debout, soit en appliquant un couple au point de pivot ou en déplaçant le point de pivot à l'horizontale dans le cadre d'un système de rétroaction.

Chapitre I : Généralité sur la robotique mobile

Le Robot pendule inversé est un système mécatronique consistant en un pendule inversé mobile, Figure (1.16). 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.

Cela signifie que le robot est libre de tomber en avant ou en arrière sans aucunes forces appliquées. Le Robot est en équilibre lorsque son centre de gravité et les roues sont situés sur une ligne verticale imaginaire identique. Sinon, les roues devraient suivre la chute du robot jusqu'à ce qu'il se remet en équilibre. L'utilisation de deux roues seulement permet d'avoir un poids plus léger et une manœuvre plus lisse. La figure (1.17) illustre le fonctionnement de base d'un robot équilibriste [6].

I.2.1. Intérêt de l'étude d'un pendule inversé

L'étude du pendule inversé a assez bien d'importance. 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 auxquelles est soumise la prothèse.

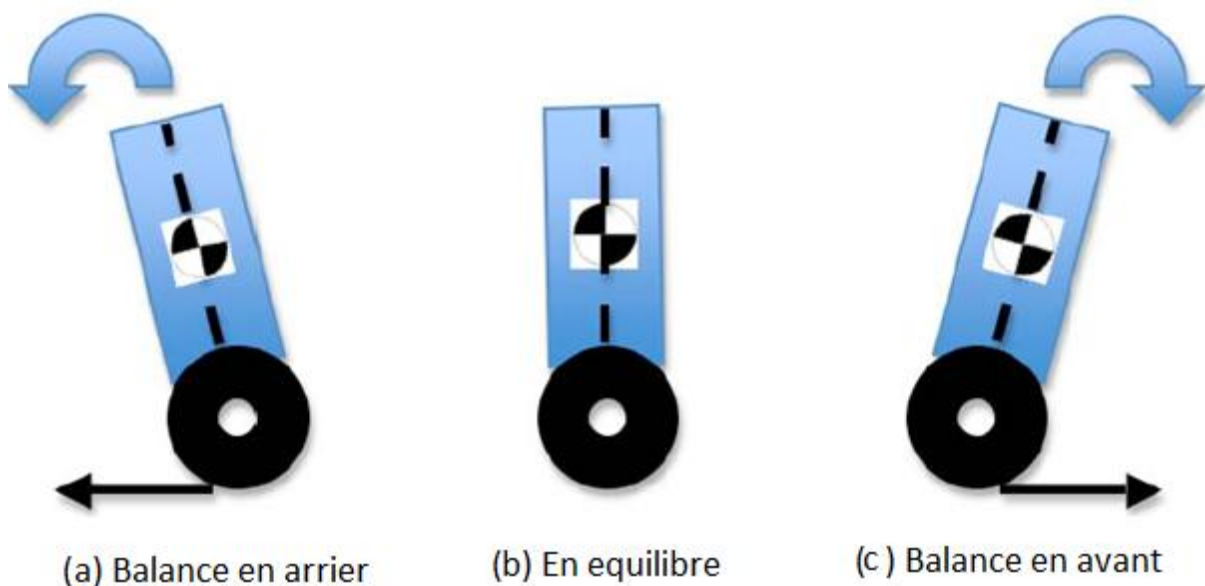


Figure 1.16 - Les trois cas du pendule inversé

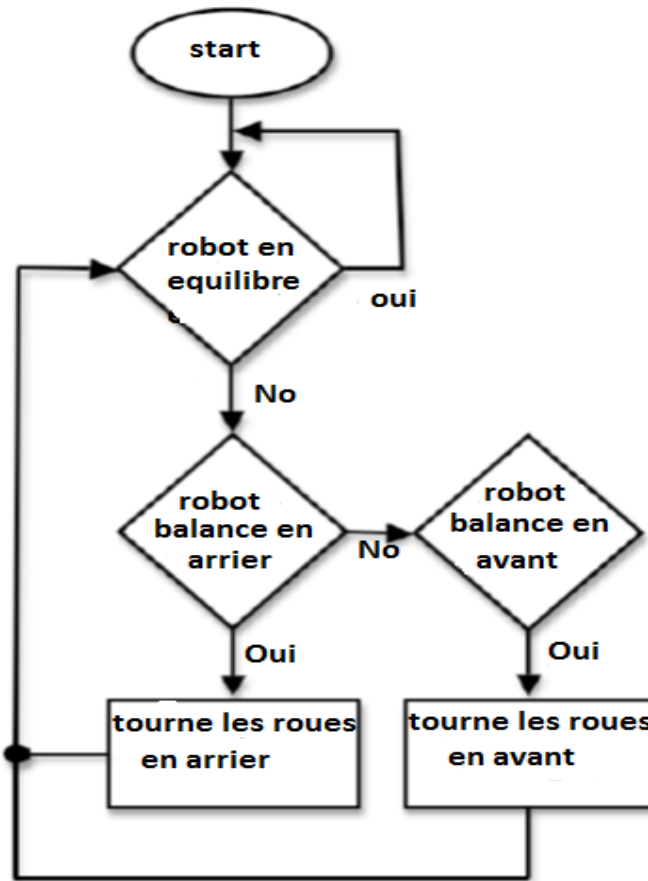


Figure 1.17 - Diagramme de fonctionnement d'un robot pendule inversé

- Dans le même ordre d'idée, la robotique utilise ce genre de concept.
- 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 on ralentit 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.
- Les étudiants en automatique, en robotique font des laboratoires de recherches avec ce genre de dispositif. Parce qu'ils font intervenir beaucoup de notions intéressantes pour eux : Programmation, automatisation, mécanique, électronique... etc.

I.2.2. L'état de l'art

Un certain nombre d'études portant sur le robot à pendule inversé à deux roues ont été entreprises. L'idée qu'un robot peut s'auto-équilibrer sur les roues a gagné de l'élan au cours de la dernière décennie dans divers laboratoires de robots, tant pour la recherche universitaire que pour l'application pratique dans le monde entier. Dans la Figure 1.18. Le premier robot à pendule inversé à deux roues a été construit par Kazuo Yamafuji, un professeur émérite à l'Université de

Chapitre I : Généralité sur la robotique mobile

Electro-Communication à Tokyo, en 1986, selon un article au Japon. Le robot peut simuler le comportement d'un pendule inversé, mais il est différent, le chariot roulant est fixé sur une plateforme ou deux roues [7].

- L'Equibot montré à la Figure (1.19). Est un robot d'équilibrage développé par Dani Piponi. Il utilise un capteur infrarouge pointu pour mesurer la distance au sol et utilise des informations de distance pour en déduire son angle d'inclinaison.
- Le Segbot montré à la Figure (1.20). A été développé au printemps 2004. L'objectif était de concevoir et de construire un robot d'équilibrage à deux roues basé sur les mêmes principes du Segway.

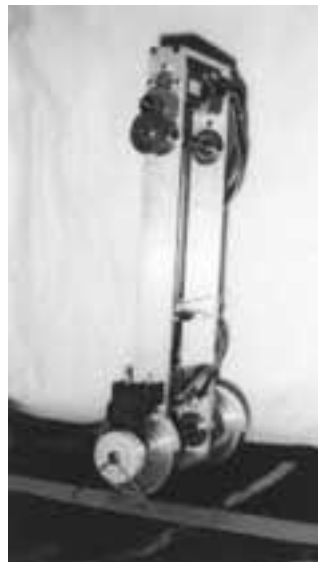


Figure 1.18 - Robot auto-équilibré de l'Université de Electro-Communication

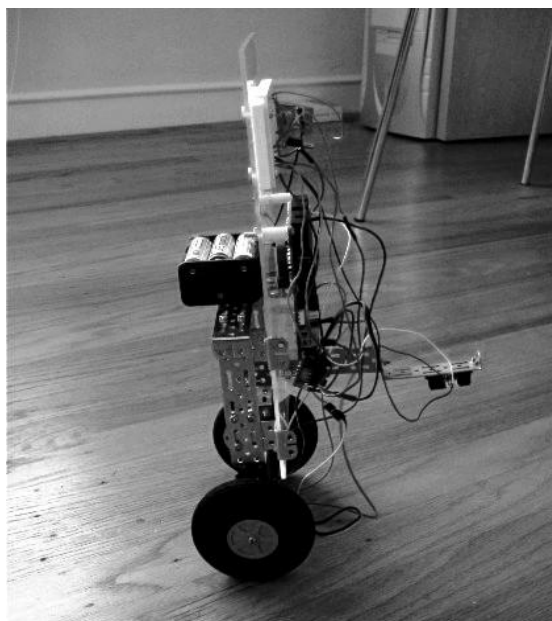


Figure 1.19 – Equibot d'équilibrage [8]



Figure 1.20 – Le Segbot

Dans la figure (1.21). *L'UMASS uBot-5* est un autre robot WIP, utilisant deux roues dans une configuration différentielle pour la mobilité. Les robots dynamiquement stables sont bien adaptés aux environnements conçus pour les humains où un centre de masse élevé et une petite empreinte sont souvent nécessaires. Dans le cas de uBot-5, qui se comporte comme un pendule inversé, la stabilisation active devient plus facile lorsque le robot (et donc le centre de masse) devient plus grand. L'uBot-5 peut également utiliser le contrôle postural du corps entier grâce à sa configuration stable en dynamique pour générer plus de forces de poussée et de traction. [8]

Un autre exemple d'un pendule inversé qui utilise l'accéléromètre et le gyroscope est David P. Anderson *nBot*, qui est montré à la Figure (1.22). Les données recueillies à partir des deux capteurs sont traitées par l'unité de mesure de l'inertie (UMI) qui met en œuvre un filtre pour combiner les deux capteurs en une mesure unique.

Le Laboratoire de l'électronique industrielle de l'Institut fédéral de technologie de la Suisse a développé le robot *JOE* montré en Figure (1.23), capable de faire des virages en U stationnaires, en raison de sa configuration de deux roues coaxiales, chacune couplée à un moteur à courant continu. Un système de contrôle, composé de deux contrôleurs d'espace d'état découplés, pilote les moteurs afin de maintenir le système en équilibre.

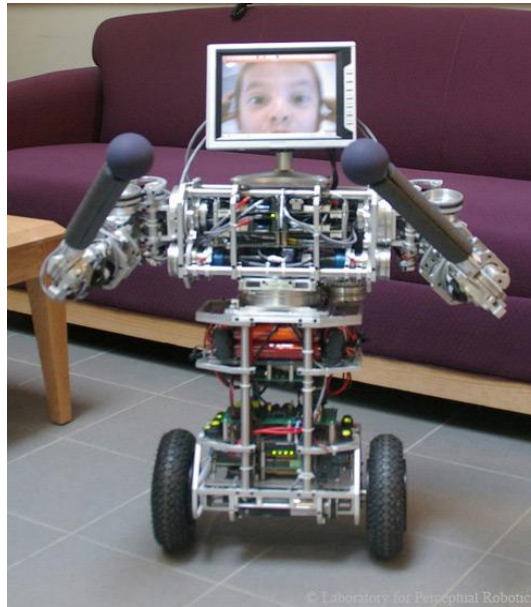


Figure 1.21 – Le UMASS uBot-5 [8]

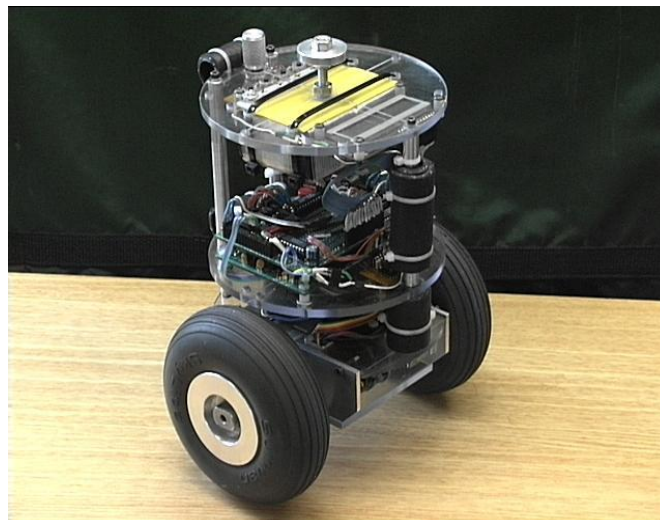


Figure 1.22 – Le nBot



Figure 1.23 – Le robot JOE

Chapitre I : Généralité sur la robotique mobile

En tentant de résoudre le problème du monocycle robotique, en Figure (1.24), *Ballbot* a été développé pour s'aligner sur sa roue sphérique unique en voyageant. Solde Ballbot à l'aide de capteurs et d'ordinateurs embarqués et utilise un mécanisme d'actionnement basé sur un entraînement inverse de la balle de souris pour se déplacer et changer de direction sans avoir à tourner en premier.

Le *Rezero* représenté sur Figure (1.25), est un autre robot d'équilibrage à balle, composé de balle revêtue, les trois moteurs électriques, chacun conduisant une roue omni et le corps principal, contenant un microprocesseur, un UMI, des électromètres et des batteries, sont typiques Caractéristiques d'un Ballbot.

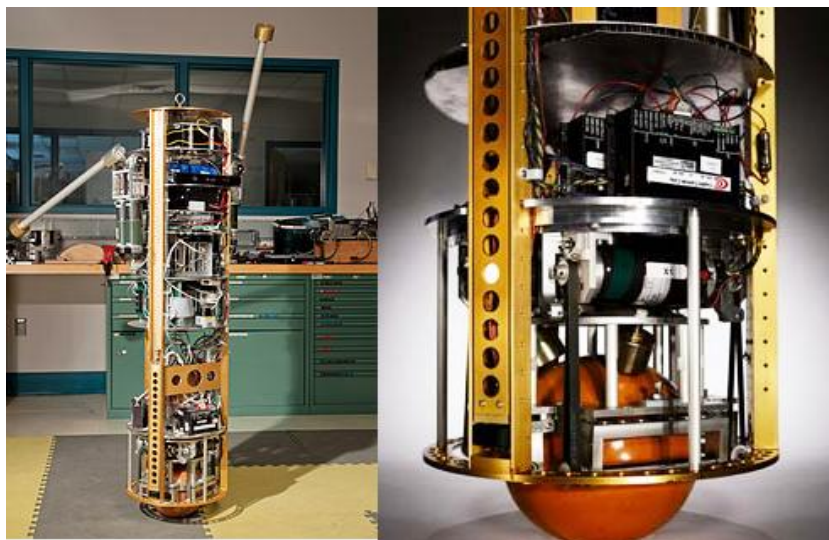


Figure 1.24 – Le robot CMU Ballbot



Figure 1.25 – Le robot Rezero Ballbot

Chapitre I : Généralité sur la robotique mobile

En figure (1.26), un robot WIP commercialisé SEGWAY HT, animé par Dean Kamen, a été très populaire ces dernières années. Le SEGWAY HT est capable d'équilibrer un homme sur sa plate-forme tandis que l'utilisateur parcourt le terrain avec lui. Cette innovation utilise cinq gyroscopes et une collection d'autres capteurs d'inclinaison pour se maintenir en position verticale.



Figure 1.26 – Le Segway HT

En fait, seuls trois gyroscopes sont nécessaires pour l'ensemble du système, tandis que les capteurs supplémentaires sont inclus comme mesure de sécurité. Le RMP (*Risk Management Plan*) de Segway est créé en combinant un Transporteur Humain Segway (HT) standard avec du matériel et des logiciels spéciaux (le kit de conversion RMP). Le résultat est une plate-forme de mobilité robotique à usage général.

En 2002 D'Arrigo, Colombi & Rufer, afin de contrôler leur propre robot pendule inversé à deux roues *Two-Wheeled Inverted Pendulum* (T-WIP), ont utilisé un correcteur à retour d'état pour lequel les gains ont été calculés avec la technique de placement de pôles. Leur contribution vient du fait qu'ils ont mis en place l'algorithme dans le logiciel Matlab et sont en mesure de contrôler leur robot en temps réel. Cela nécessite une configuration relativement coûteuse et offre des avantages seulement pendant la phase de développement du produit.

En 2003 Ooi R, a développé un modèle d'état pour la dynamique d'inclinaison et de déplacement linéaire, Figure (1.27). Il propose un filtre de Kalman pour estimer l'angle

Chapitre I : Généralité sur la robotique mobile

d'inclinaison et sa dérivée par rapport au temps, basé sur un sous-système composé exclusivement de capteurs. Il propose un correcteur par retour d'état pour l'inclinaison et le déplacement linéaire et un correcteur PID pour la direction. Il propose également deux méthodes pour le calcul des gains du correcteur de l'inclinaison et du déplacement linéaire : Le Linear Quadratic Regulator (LQR) et le placement de pôles et montre des simulations et des résultats expérimentaux qu'il a obtenu.[8]

Malheureusement, la technique utilisée pour obtenir le modèle mathématique de la dynamique de l'inclinaison et du déplacement linéaire donne de nombreux termes non-linéaires et certains détails sont perdus après la linéarisation. En outre, l'approche du filtre de Kalman utilisé ne parvient pas à prendre avantage de la dynamique connue du système et exige le réglage manuel par essais et erreurs pour obtenir des résultats acceptables.

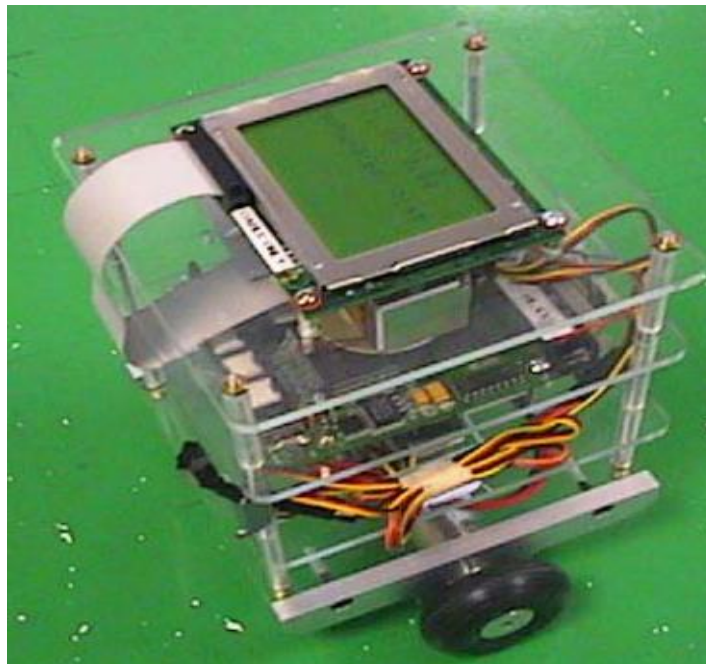


Figure 1.1: Le projet de 'Rich Chi Ooi' [8]

En 2005 H. Kadir, discrétise le modèle développé par Ooi R. dans le but de concevoir un correcteur discret. Il propose les approches du LQR et du placement de pôles et étudie la performance du système par simulation. Toutefois, sa contribution demeure restreinte car il ne montre pas de résultats expérimentaux.

En 2006 Abdollah M. utilise le modèle développé par Ooi R et ajoute la dynamique de direction et propose un algorithme de commande non-linéaire par mode de glissement qu'il étudie par le biais de simulations.

Chapitre I : Généralité sur la robotique mobile

Toutefois, il ne donne pas de résultats expérimentaux et son algorithme est très intensif en calculs et serait difficile à implémenter numériquement.

En 1996 Ha & Yuta, l'équipe de chercheurs a développé un modèle mathématique en utilisant l'équation du mouvement de Lagrange en considérant l'angle d'inclinaison ainsi que sa dérivée par rapport au temps et la vitesse angulaire des roues comme étant les états du système et le couple appliqué aux roues comme étant l'entrée du système. Ils proposent un correcteur capable de maintenir le robot en équilibre tout en allant à une vitesse constante définie par un signal de référence dans lequel les valeurs en régime permanent des états et du signal d'entrée sont d'abord calculées et le signal d'entrée est ensuite corrigé en utilisant un retour d'erreurs des états. Ils augmentent également le système en ajoutant un intégrateur de l'erreur de vitesse des roues, ajoutant ainsi la position angulaire des roues comme un autre état, et font valoir que cet intégrateur est capable de remédier à l'effet de dérive du gyroscope et contribue à la robustesse paramétrique du système. [8]

Les gains de leur correcteur sont déterminés selon la technique de LQR. Pour le contrôle de la direction, ils ne font que calculer la vitesse désirée de chaque roue en fonction des signaux de référence pour la vitesse linéaire et la vitesse de changement de direction et envoient celles-ci aux correcteurs des roues telles que défini précédemment. Ils ont ensuite introduit un correcteur de poursuite de trajectoire dans lequel ils corrigent la référence de la vitesse de changement de direction en utilisant la distance perpendiculaire de la trajectoire désirée à la position réelle du robot et l'erreur dans l'angle de direction.

Enfin, ils montrent certains résultats expérimentaux. Bien que la solution qu'ils proposent soit très complète, leur approche a plusieurs inconvénients. L'hypothèse selon laquelle le robot va en ligne droite a été émise lors de l'élaboration de la dynamique et la conception du correcteur qui est ensuite utilisé pour le contrôle de la direction, la structure du correcteur part de l'hypothèse que la référence des vitesses des roues demeure constante au fil du temps mais en pratique, ce n'est pas le cas, l'effet de dérive du gyroscope et le jeu des boîtes de réduction sont supposés être traités par l'utilisation d'un intégrateur sur l'erreur en vitesse des roues, et en raison du fait qu'ils ont ignoré la dynamique des moteurs dans leur modèle, ils ont besoin d'utiliser des contrôleurs de moteurs séparés.

Toutes les références trouvées dans la littérature mentionnées ci-dessus utilisent un certain type de commande par retour d'état afin de stabiliser le système. Tous les chercheurs sauf (Ooi R., 2003) et (Kadir H., 2005) ont fait l'hypothèse que les encodeurs optiques captent les positions des roues par rapport au sol et peuvent donc être utilisés pour mesurer le déplacement linéaire du robot. Ceci n'est pas précisément le cas puisque l'inclinaison du robot provoque aussi

Chapitre I : Généralité sur la robotique mobile

le mouvement des moteurs et donc des encodeurs également. De plus, de nombreux modèles ne tiennent pas compte des boîtes de réduction, qui sont souvent nécessaires pour accroître le couple fourni par les moteurs à courant continu. La plupart des modèles existants ignorent la dynamique des moteurs et considère les couples générés par les moteurs comme étant les entrées du système, ce qui implique la nécessité d'utiliser des contrôleurs de moteurs additionnels. Ils prennent également l'hypothèse irréaliste et contradictoire que le robot va en ligne droite lors de l'élaboration du modèle de la dynamique d'angle de direction.

I.3. Conclusion

Nous avons présenté, dans ce chapitre la robotique d'une façon générale, ses commandes et son utilisation, les robots qui remplacent l'homme dans les tâches pénibles et dangereuses. Nous avons vu aussi les robots équilibristes et leurs intérêts d'étude. Dans l'avenir les robots vont jouer un rôle de plus en plus important dans notre vie d'où la nécessité de résoudre tous les problèmes pour assurer une bonne application de ces robots. Comme exemples de ces problèmes nous citons l'analyse de l'environnement, la planification, la navigation

Nous avons vu qu'un robot a trois aptitudes : **Détecter** (Un robot doit recevoir des informations sur son environnement), **Planifier** (Un robot doit utiliser ces informations pour prendre une ou des décisions), **Agir** (Un robot doit exécuter des commandes à l'aide d'actionneurs, souvent mobiles). C'est pourquoi, nous essayerons dans les chapitres suivants d'illustrer ces trois aptitudes pour réaliser un robot pendule inversé à deux roues parallèle (*Two Wheel Self Balancing Robot*).

Chapitre

2

*Modélisation du
mouvement d'un
pendule inversé*

Chapitre II : Modélisation

Afin de pouvoir concevoir un correcteur capable de stabiliser le robot et lui faire poursuivre une trajectoire, il est nécessaire dans un premier temps de mettre au point un modèle mathématique qui représente fidèlement son comportement.

Dans ce chapitre, les équations du mouvement pour un pendule inversé à deux roues et le modèle linéaire pour un moteur à courant continu sont détaillées.

II.1. Modèle linéaire d'un moteur à courant continu (DC) [9]

Le robot est mobile grâce à deux moteurs à courant continu (DC).

Dans cette section, le modèle d'espace d'état du moteur à courant continu est décrit. Ce modèle est ensuite utilisé dans le modèle dynamique du robot équilibriste pour fournir une relation entre la tension d'entrée aux moteurs et le couple de contrôle nécessaire pour équilibrer le robot.

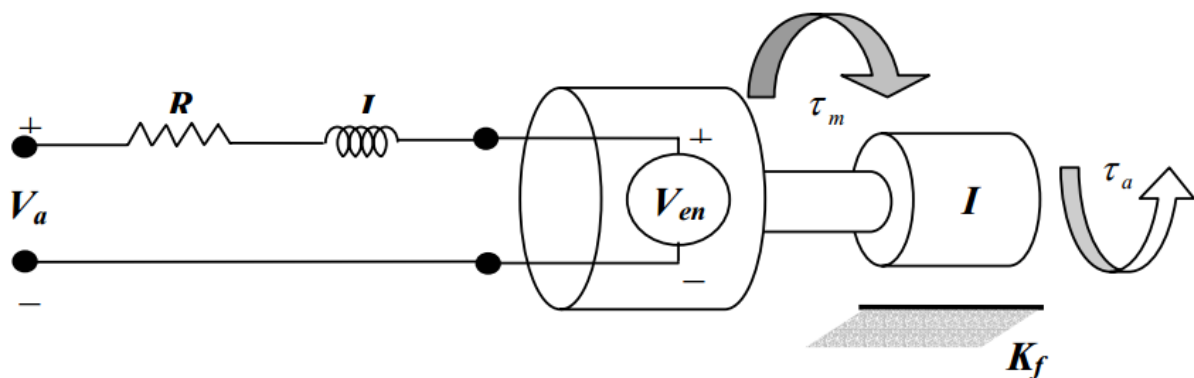


Figure 2.1 - Schémas d'un moteur DC

La Figure (2.1) illustre un modèle linéaire efficace pour un moteur à courant continu. Lorsqu'une tension est appliquée aux bornes du moteur, un courant « i » est généré dans l'armature du moteur. Le moteur produit un couple " τ_m ", qui est proportionnel au courant. Cette relation peut être exprimée par :

$$\tau_m = k_m i \quad (2.1)$$

Une paire de résistance- inductance en série avec une tension V_a , peut être utilisé pour modéliser le circuit électrique du moteur. Une force électromotrice est produite parce que les bobines du moteur sont traversées par un champ magnétique. La tension produite peut être approximée par une fonction linéaire de la vitesse de l'arbre :

$$V_e = k_e \omega \quad (2.2)$$

Chapitre II : Modélisation

À ce point, une équation différentielle linéaire pour le circuit électrique du moteur à courant continu est déduite en utilisant la loi des tensions de « Kirchhoff ». Cette loi indique que la somme de toutes les tensions dans le circuit doit être égale à zéro. Pour le moteur à courant continu, cela peut s'écrire comme :

$$V_a - Ri - L \frac{di}{dt} - V_e = 0 \quad (2.3)$$

Pour décrire l'équation de mouvement pour le moteur, le frottement sur l'arbre du moteur est approximée par une fonction linéaire de la vitesse de l'arbre. L'approximation est effectuée pour que le frottement sur l'arbre du moteur k_f soit une fonction linéaire de la vitesse de l'arbre. La loi de Newton sur le mouvement indique que la somme de tous les couples produit sur l'arbre est liée linéairement à l'accélération de l'arbre par la force d'inertie de l'induit. I_R . Soit l'équation:

$$\sum M = \tau_m - k_f \omega - \tau_a = I_R \dot{\omega} \quad (2.4)$$

En introduisant les équations (2.1) et (2.2) dans les équations (2.3) et (2.4) et en réarrangeant les termes des dérivés, on obtient les deux équations fondamentales suivantes et qui résument le mouvement du moteur.

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_a}{L} - \frac{R}{L}i - \frac{k_e}{L}\omega \quad (2.5)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{k_m}{I_R}i - \frac{k_f}{I_R}\omega - \frac{\tau_a}{I_R} \quad (2.6)$$

Les deux équations sont des fonctions linéaires du courant et de la vitesse et elles contiennent des dérivés du premier ordre. Un modèle simplifié du moteur à courant continu est suffisant pour l'équilibre du robot. Pour cette raison, l'inductance du moteur est prise nulle et les frottements du moteur sont négligeables. Par conséquent, (2.5) et (2.6) deviennent :

$$i = \frac{V_a}{R} - \frac{k_e}{R}\omega \quad (2.7)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{k_m}{I_R} i - \frac{\tau_a}{I_R} \quad (2.8)$$

En remplaçant l'équation (2.7) dans l'équation (2.8), une relation approximative du moteur à courant continu est obtenue en fonction de la vitesse actuelle du moteur, la tension appliquée et le couple comme :

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{k_m k_a}{I_R R} - \frac{k_m V_e}{I_R R} \omega - \frac{\tau_a}{I_R} \quad (2.9)$$

Etant donné que l'inductance du moteur est négligée, le courant à travers les enroulements n'est pas pris en compte dans l'équation de mouvement du moteur. Le courant atteint son état constant par rapport à la vitesse de l'arbre, qui va prendre beaucoup plus de temps pour arriver à la vitesse finale lors d'un changement de la tension d'entrée.

La dynamique du moteur peut être représentée par un modèle d'espace d'état. C'est un système d'équations différentielles de premier ordre avec les paramètres position, θ , et vitesse, ω , qui représentent uniquement le fonctionnement. Les entrées du moteur sont alors la tension appliquée et le couple appliqué.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{k_m k_e}{I_R R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{k_m}{I_R R} & -\frac{1}{I_R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ \tau_a \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$y = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix} + [0 \quad 0] \begin{bmatrix} V_a \\ \tau_a \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

II.2. Modèle dynamique pour un pendule inversé à deux roues [9]

Le Pendule inversé à deux roues, a un comportement similaire avec un pendule sur un chariot. La dynamique des roues et le pendule sont analysés séparément au début, mais cela finira par deux équations de mouvement qui décrivent complètement le comportement du robot équilibriste.

Comme le comportement du robot peut être influencé par des perturbations ainsi que le couple de rotation de moteur, le modèle mathématique devra tenir compte de ces forces. Premièrement on obtient les équations de mouvement associé aux roues gauche et droite.

Chapitre II : Modélisation

La figure (2.2) ci-dessous montre le diagramme de corps libre pour les deux roues. Etant donné que les équations des roues gauche et droite sont tout à fait analogues, seule l'équation de la roue droite est donnée.

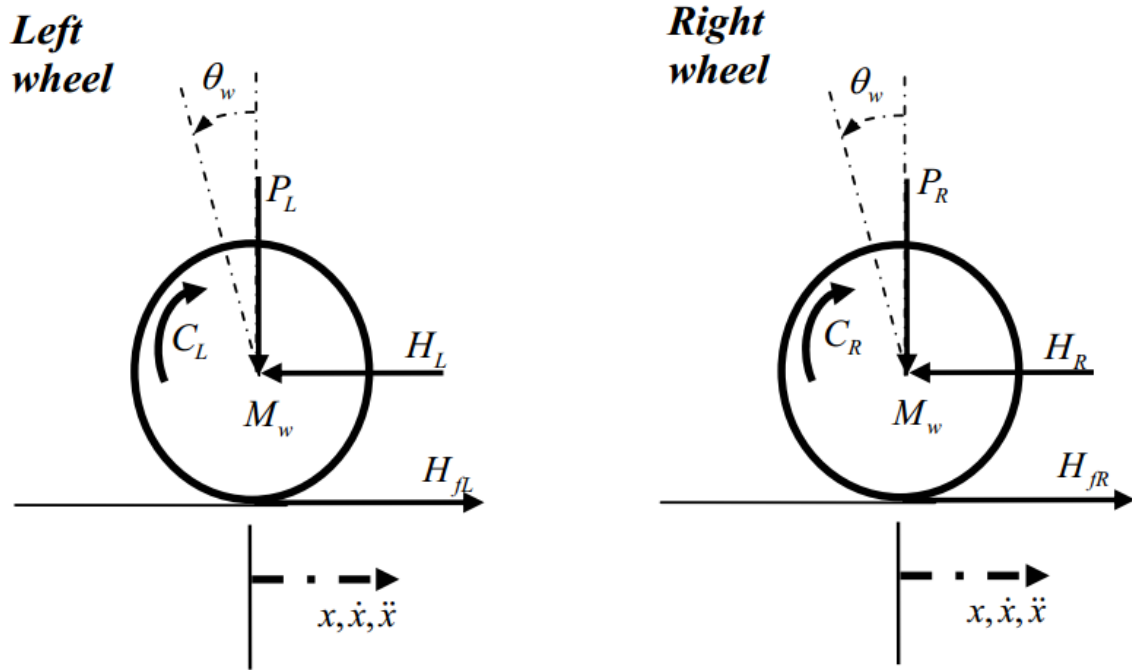


Figure 2.2 - Schémas corps libre pour les deux roues

Utilisant la loi de mouvement de Newton, la somme des forces sur la direction x est :

$$\sum F_x = Ma$$

$$M_w \ddot{x} = H_{fR} - H_R \quad (2.12)$$

La Somme des forces autour du centre de la roue donne :

$$\sum M_o = I\alpha$$

$$I_w \ddot{\theta}_w = C_R - H_{fR} r \quad (2.13)$$

À partir de la dynamique du moteur à courant continu, le couple du moteur peut être exprimé sous la forme :

$$\tau_m = I_R \frac{d\omega}{dt} + \tau_a \quad (2.14)$$

Chapitre II : Modélisation

En réarrangeant l'équation et remplaçant par les paramètres du moteur à courant continu, le couple de sortie aux roues est atteinte :

$$C = I_R \frac{d\omega}{dt} = \frac{-k_m k_e}{R} \dot{\theta}_w + \frac{k_m}{R} V_a \quad (2.15)$$

Par conséquent, l'équation (II.13) devient

$$I_w \ddot{\theta}_w = \frac{-k_m k_e}{R} \dot{\theta}_w + \frac{k_m}{R} V_a - H_{fR} r \quad (2.16)$$

Ainsi

$$H_{fR} = \frac{-k_m k_e}{Rr} \dot{\theta}_w + \frac{k_m}{Rr} V_a - \frac{I_w}{r} \ddot{\theta}_w \quad (2.17)$$

L'équation (2.15) est remplacée dans (2.12) pour obtenir l'équation des roues gauche et droite.

Pour la roue gauche

$$M_w \ddot{x} = \frac{-k_m k_e}{Rr} \dot{\theta}_w + \frac{k_m}{Rr} V_a - \frac{I_w}{r} \ddot{\theta}_w - H_L \quad (2.18)$$

Pour la roue droite

$$M_w \ddot{x} = \frac{-k_m k_e}{Rr} \dot{\theta}_w + \frac{k_m}{Rr} V_a - \frac{I_w}{r} \ddot{\theta}_w - H_R \quad (2.19)$$

Parce que le mouvement linéaire agit sur le centre de la roue, la rotation angulaire peut être transformée en mouvement linéaire par une simple transformation :

$$\begin{aligned} \ddot{\theta}_w r &= \ddot{x} \Rightarrow \ddot{\theta}_w = \frac{\ddot{x}}{r} \\ \dot{\theta}_w r &= \dot{x} \Rightarrow \dot{\theta}_w = \frac{\dot{x}}{r} \end{aligned}$$

Par la transformation linéaire, l'équation (2.18) et (2.19) devient :

Pour la roue gauche

$$M_w \ddot{x} = \frac{-k_m k_e}{Rr^2} \dot{x} + \frac{k_m}{Rr} V_a - \frac{I_w}{r^2} \ddot{x} - H_L \quad (2.20)$$

Pour la roue droite

$$M_w \ddot{x} = \frac{-k_m k_e}{Rr^2} \dot{x} + \frac{k_m}{Rr} V_a - \frac{I_w}{r^2} \ddot{x} - H_R \quad (2.21)$$

Chapitre II : Modélisation

Ajoutant les équations (2.20) et (2.21)

$$2 \left(M_w + \frac{I_w}{r^2} \right) \ddot{x} = \frac{-2k_m k_e}{Rr^2} \dot{x} + \frac{2k_m}{Rr} V_a - (H_L + H_R) \quad (2.22)$$

Le châssis du robot peut être modélisé comme un pendule inversé. La figure (2.3) montre le schéma du corps libre du châssis.

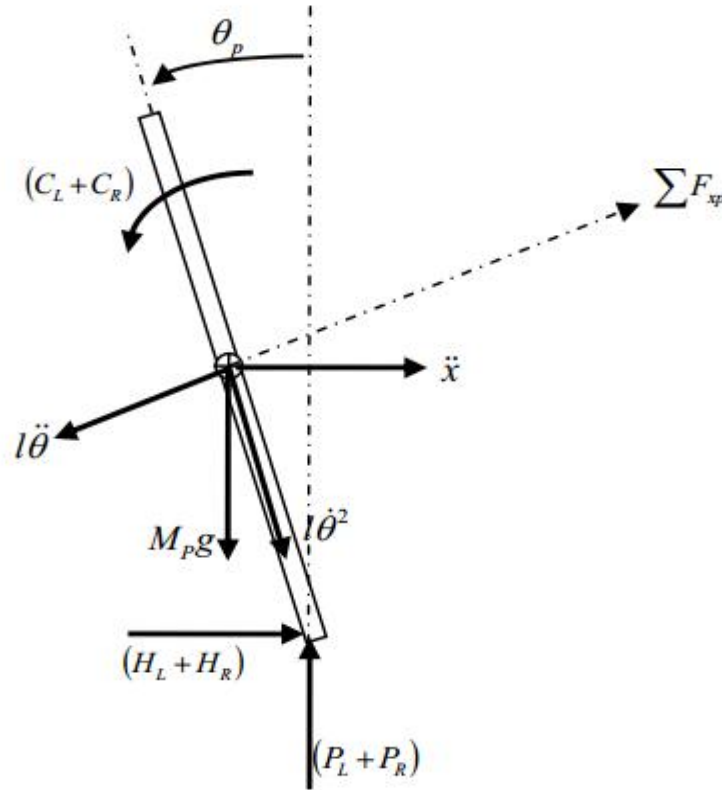


Figure 2.3 - Schémas corps libre du châssis

Encore une fois, en utilisant la loi du mouvement de Newton, la somme des forces dans le sens horizontal est :

$$\sum F_x = M_p \ddot{x}$$

$$(H_L + H_R) - M_p l \ddot{\theta}_p \cos \theta_p + M_p l \dot{\theta}_p^2 \sin \theta_p = M_p \ddot{x} \quad (2.23)$$

Ainsi

$$(H_L + H_R) = M_p \ddot{x} + M_p l \ddot{\theta}_p \cos \theta_p - M_p l \dot{\theta}_p^2 \sin \theta_p \quad (2.24)$$

Chapitre II : Modélisation

La somme des forces perpendiculaires au pendule

$$\sum F_{xp} = M_p \ddot{x} \cos \theta_p$$

$$(H_L + H_R) \cos \theta_p + (P_L + P_R) \sin \theta - M_p g \sin \theta_p - M_p l \ddot{\theta}_p = M_p \ddot{x} \cos \theta_p \quad (2.25)$$

Somme des moments autour du centre de masse du pendule

$$\sum M_o = I \alpha$$

$$-(H_L + H_R)l \cos \theta_p - (P_L + P_R)l \sin \theta_p - (C_L + C_R) = I_p \ddot{\theta}_p \quad (2.26)$$

Le couple, appliqué sur le pendule à partir du moteur tel qu'il est définie dans l'équation (2.15), après une transformation linéaire, est :

$$C_L + C_R = \frac{-2k_m k_e}{R} \frac{\dot{x}}{r} + \frac{2k_m}{R} V_a$$

Remplacer ceci dans l'équation (2.26) donne

$$-(H_L + H_R)l \cos \theta_p - (P_L + P_R)l \sin \theta_p - \left(\frac{-2k_m k_e}{Rr} \dot{x} + \frac{2k_m}{R} V_a \right) = I_p \ddot{\theta}_p$$

Ainsi

$$-(H_L + H_R)l \cos \theta_p - (P_L + P_R)l \sin \theta_p = I_p \ddot{\theta}_p - \frac{2k_m k_e}{Rr} \dot{x} + \frac{2k_m}{R} V_a \quad (2.27)$$

Multiplier l'équation (2.25) par $-l$,

$$[-(H_L + H_R)l \cos \theta_p - (P_L + P_R)l \sin \theta_p] + M_p g l \sin \theta_p + M_p l^2 \ddot{\theta}_p = -M_p l \ddot{x} \cos \theta_p \quad (2.28)$$

L'équation (2.27) est remplacée dans l'équation (2.28),

$$I_p \ddot{\theta}_p - \frac{2k_m k_e}{Rr} \dot{x} + \frac{2k_m}{R} V_a + M_p g l \sin \theta_p + M_p l^2 \ddot{\theta}_p = -M_p l \ddot{x} \cos \theta_p \quad (2.29)$$

Chapitre II : Modélisation

Pour éliminer $(H_L + H_R)$ de la dynamique du moteur, l'équation (2.24) est remplacée dans l'équation (2.22)

$$2 \left(M_w + \frac{I_w}{r^2} \right) \ddot{x} = \frac{-2k_m k_e}{Rr^2} \dot{x} + \frac{2k_m}{Rr} V_a - M_p \ddot{x} - M_p l \ddot{\theta}_p \cos \theta_p + M_p l \dot{\theta}_p^2 \sin \theta_p \quad (2.30)$$

Réorganisant les équations (2.29) et (2.30) donne les équations non - linéaires de mouvement du système :

$$(I_p + M_p l^2) \ddot{\theta}_p - \frac{2k_m k_e}{Rr} \dot{x} + \frac{2k_m}{R} V_a + M_p g l \sin \theta_p = -M_p l \ddot{x} \cos \theta_p \quad (2.31)$$

$$\frac{2k_m}{Rr} V_a = \left(2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p \right) \ddot{x} + \frac{2k_m k_e}{Rr^2} \dot{x} + M_p l \ddot{\theta}_p \cos \theta_p - M_p l \dot{\theta}_p^2 \sin \theta_p \quad (2.32)$$

Les deux équations ci-dessus peuvent être linéarisés en supposant $\theta_p = \pi + \phi$, où ϕ représente un petit angle de la direction verticale vers le haut. Cette simplification a été utilisée pour permettre d'obtenir de façon linéaire les contrôleurs de l'espace d'état pouvant être mis en œuvre.

Donc, $\cos \theta_p = -1, \sin \theta_p = -\phi$ et $\left(\frac{d\theta_p}{dt} \right)^2 = 0$.

L'équation linéaire du mouvement est :

$$(I_p + M_p l^2) \ddot{\phi} - \frac{2k_m k_e}{Rr} \dot{x} + \frac{2k_m}{R} V_a - M_p g l \phi = -M_p l \ddot{x} \quad (2.33)$$

$$\frac{2k_m}{Rr} V_a = \left(2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p \right) \ddot{x} + \frac{2k_m k_e}{Rr^2} \dot{x} - M_p l \ddot{\phi} \quad (2.34)$$

Afin d'obtenir la représentation dans l'espace d'état du système, les équations (2.33) et (2.34) sont réarrangées de telle façon que :

$$\ddot{\phi} = -\frac{M_p l}{(I_p + M_p l^2)} \ddot{x} + \frac{2k_m k_e}{Rr(I_p + M_p l^2)} \dot{x} - \frac{2k_m}{R(I_p + M_p l^2)} V_a + \frac{M_p g l}{(I_p + M_p l^2)} \phi \quad (2.35)$$

$$\ddot{x} = \frac{2k_m}{Rr \left(2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p \right)} V_a - \frac{2k_m k_e}{Rr^2 \left(2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p \right)} \dot{x} + \frac{M_p l}{\left(2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p \right)} \ddot{\phi} \quad (2.36)$$

En injectant l'équation (2.35) dans l'équation (2.34) et l'équation (2.36) dans l'équation (2.33), et après quelques opérations algébriques, l'équation dans l'espace d'état du système est obtenue.

Chapitre II : Modélisation

II.3. Modèle d'état de la dynamique linéaire [9]

En définissant le vecteur d'état $\mathbf{x}(t) = [\mathbf{x}(t) \ \dot{\mathbf{x}}(t) \ \phi(t) \ \dot{\phi}(t)]^T$ et le vecteur de sortie $\mathbf{y}(t) = [\mathbf{x}(t) \ \phi(t)]^T$, on obtient le modèle d'état suivant :

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{cases}$$

Ou encore :

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \ddot{\mathbf{x}} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{2k_m k_e (M_P l r - I_P - M_P l^2)}{R r^2 \Delta} & \frac{M_P^2 g l^2}{\Delta} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{2k_m k_e (r \beta - M_P l)}{R r^2 \Delta} & \frac{M_P g l \beta}{\Delta} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \dot{\mathbf{x}} \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2k_m (I_P + M_P l^2 - M_P l r)}{R r \Delta} \\ 0 \\ \frac{2k_m (r \beta - M_P l)}{R r \Delta} \end{bmatrix} V_a \quad (2.37)$$

$$\text{Où} \quad \beta = \left(2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_P \right) \quad \Delta = \left[I_P \beta + 2M_P l^2 \left(M_w + \frac{I_w}{r^2} \right) \right]$$

Dans le modèle ci-dessus, on suppose que les roues du véhicule resteront toujours en contact avec le sol, et qu'il n'y a pas de glissement au niveau des roues. Les forces de virage sont également considérées comme négligeables.

Tableau 2.1 - Les valeurs des paramètres

| Variables | Nomenclatures | Valeurs | Unités |
|-----------|--------------------------------------|-----------|-------------------|
| k_m | Constante de couple moteur | 0.006123 | N.m/A |
| k_e | Constante force électromotrice | 0.0069203 | V.s/rad |
| M_P | Masse du corps | 1.2 | Kg |
| M_w | Masse des roues | 0.03 | Kg |
| l | Longueur au centre de masse du corps | 0.12 | M |
| r | Rayon des roues | 0.035 | M |
| I_P | Inertie du corps | 0.0041 | Kg.m ² |
| I_w | Inertie des roues | 0.000039 | Kg.m ² |
| R | Résistance nominale | 3 | Ohm |
| g | La gravité | 9.81 | m/s ² |

Les valeurs des paramètres du moteur sont obtenues à partir de leurs fiches techniques tandis que les valeurs des moments d'inertie du robot ont été estimées à partir d'un modèle de

Chapitre II : Modélisation

conception mécanique assisté par ordinateur utilisant le logiciel « 3D builder ». Les poids des différentes composantes ont été obtenus en les pesants avec une balance électronique. Le tableau (2.1) regroupe toutes les valeurs des paramètres précédents.

L'équation de l'espace d'état pour le système devient.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0097 & 11.1594 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -0.0293 & 172.1160 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.0815 \\ 0 \\ 0.2456 \end{bmatrix} V_a \quad (2.38)$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0 ; 0 \ 0 \ 1 \ 0] ; D = [0 ; 0]$$

En réalité, les valeurs des paramètres ne peuvent être connues avec exactitude. Aussi, celles-ci peuvent varier dans le temps à cause de certains phénomènes tels que l'usure des composantes et la décharge des batteries. De plus, le modèle a été établi sous certaines hypothèses, en négligeant certains phénomènes et a été approximé linéairement à un point de fonctionnement. Pour toutes ces raisons, le modèle contient des incertitudes et le contrôleur qui sera abordé au chapitre (3) devra être en mesure de stabiliser le système malgré leur présence.

II.4. Problème de contrôle [9]

La Figure (2.3) montre les Pôles et Zéros du système. Le système est instable puisqu'il y a un pôle sur le plan droit du graphe. Dans le meilleur des cas, tous les pôles doivent être sur le plan gauche du graphe pour que le système soit stable.

Les pôles du système sont situés à **0, -0.0078, 13.1183, -13.1202**.

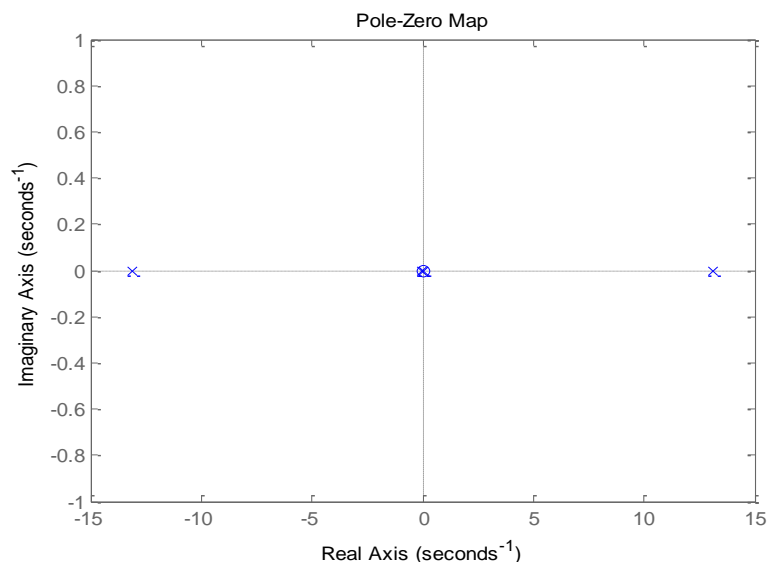


Figure 2.4 - Pôles-zéros du système en boucle ouverte

Chapitre II : Modélisation

Comme le système est instable, une entrée impulsionnelle appliquée au système en boucle ouverte augmentera l'angle d'inclinaison et la position du robot d'une façon exponentielle.

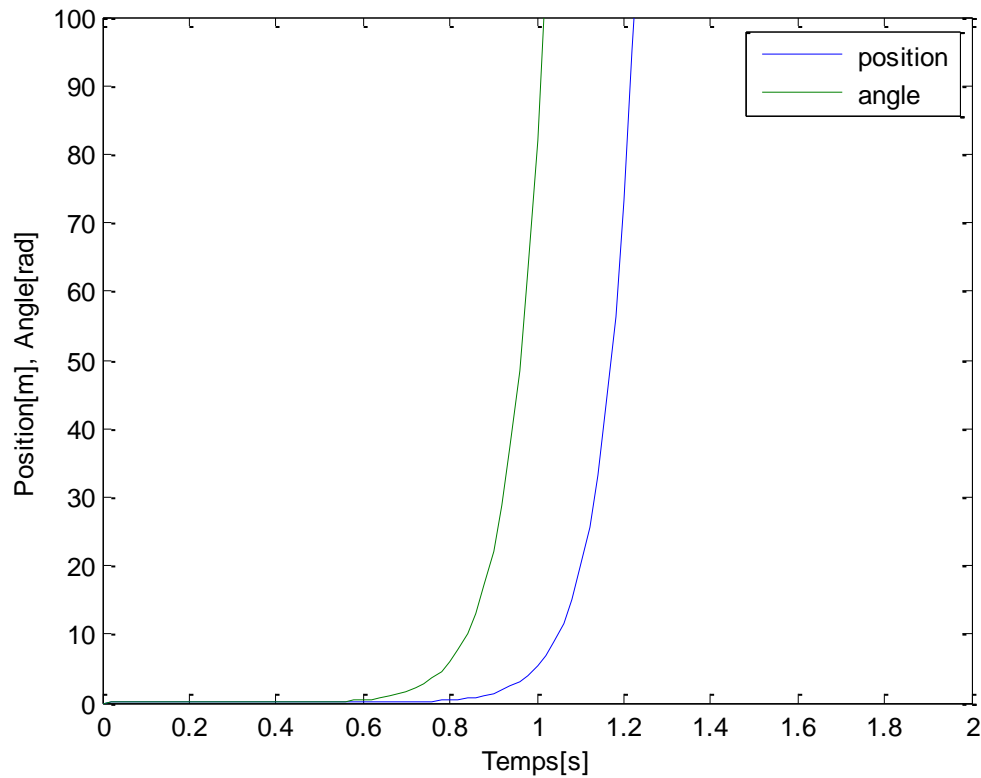


Figure 2.5 - Réponse impulsionnelle du système en boucle ouverte

Puisque la gamme d'inclinaison du robot est limitée à 0.35 radian de chaque côté, donc le robot tombe. La figure (2.5) montre la réponse impulsionnelle du système indiquant l'instabilité du système.

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre on a détaillé le modèle mathématique du robot équilibriste pour analyser son comportement en boucle ouverte puis en boucle fermée dans le prochain chapitre.

La réponse impulsionnelle en boucle ouverte d'un robot équilibriste prouve que le système est instable. Pour assurer la stabilité de notre robot on va introduire des régulateurs.

Chapitre

3

*Commande et résultat
de simulation*

Chapitre III : Commande et résultats de simulation

Dans ce chapitre, nous allons étudier la conception de régulateurs pour systèmes aux équations d'état linéaires. Nous montrons qu'autour de points particuliers de l'espace d'état, dit points de fonctionnement, de nombreux systèmes non linéaires se comportent comme de véritables systèmes linéaires. Les techniques développées dans ce chapitre seront alors utilisées pour la commande des systèmes non linéaires. Considérons donc le système linéaire suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (3.1)$$

Notons \mathbf{m} , \mathbf{n} , \mathbf{p} les dimensions respectives des vecteurs \mathbf{u} , \mathbf{x} et \mathbf{y} . Rappelons que \mathbf{A} est appelée matrice d'évolution, \mathbf{B} est la matrice de commande et \mathbf{C} est la matrice d'observation. L'objectif d'une régulation ou d'un asservissement est d'assurer le fonctionnement d'un procédé selon des critères prédéfinis par un cahier des charges malgré les perturbations agissant sur ce système asservi. Le cahier des charges qui est traduit le plus souvent en consigne définit des critères qualitatifs à imposer comme la stabilité, la précision, la rapidité, la bande passante...etc. Donc on choisit trois types de contrôleur : PID, commande par placement de pôles et la commande optimale LQR.

III.1. Commandabilité et observabilité

Avant de présenter les lois de commandes du système à régler, nous devons montrer que le système à piloter est commandable et observable. Un système est complètement contrôlable si la matrice \mathbf{C}_m est de rang n où n est le nombre de variables d'état. Par conséquent, il faut que le déterminant de la matrice de commandabilité soit différent de zéro. La même condition est exigé par rapport à la matrice observable \mathbf{O}_m .

Donc, il est possible de contrôler le système avec une commande par retour d'état :

$$\begin{aligned} C_m &= [B \ AB \ \dots \ A^{n-1}B] \\ O_m &= [C^T \ A^T C^T \ \dots \ (A^T)^{n-1} C^T] \end{aligned} \quad (3.2)$$

A. Commandabilité

Application numérique :

$$C_m = [B \ AB \ A^2B \ A^3B]$$

Chapitre III : Commande et résultats de simulation

$$C_m = \begin{bmatrix} 0 & 0.0815 & -0.008 & 2.74130 \\ 0.0815 & -0.0008 & 2.7413 & -0.0534 \\ 0 & 0.2456 & -0.0024 & 42.2797 \\ 0.2456 & -0.0024 & 42.2797 & -0.4918 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Le déterminant de C_m est $7.6941 \neq 0$, le rang de C_m est $n = 4$. Donc notre système est complètement contrôlable.

B. Observabilité

$$\text{rang} \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ CA^3 \end{bmatrix} = n$$

$$O_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -0.0097 & 11.1549 & 0 \\ 0 & -0.0293 & 172.1160 & 0 \\ 0 & 0.0001 & -0.1086 & 11.1594 \\ 0 & 0.0003 & -0.3272 & 172.1160 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Le rang de O_m est $n = 4$. Donc notre système est observable

III.2. Cahier des charges

La première qualité à assurer d'une régulation est la stabilité puisque toute instabilité conduit à la perte de contrôle du procédé. La précision, statique ou dynamique, est souvent la deuxième qualité attendue d'une régulation. Notre cahier des charges est résumé de la manière suivante :

- Une erreur statique nulle.
- Un temps de stabilisation court $\leq 3s$.
- la variation de l'angle d'inclinaison $-0.35 \leq \theta \leq +0.35$ rad

III.3. La commande classique PID

Les régulateurs PID répondent à plus de 90% aux besoins industriels et le nombre de régulateurs installés dans une usine pétrolière, par exemple, se compte par milliers. Parmi les innombrables méthodes de réglage PID, cette section expose la plus utilisée dans le contrôle

Chapitre III : Commande et résultats de simulation

des procédés industriels. La méthode universelle de réglage n'existe pas, et il est important de comprendre que c'est la connaissance comportementale du procédé qui induit la méthode à appliquer pour obtenir les paramètres PID d'un réglage satisfaisant.

III.3.1 Actions du régulateurs PID : [10]

Il existe trois actions correctives élémentaires qui permettent, individuellement, de corriger telle ou telle performance. Elles sont relativement simples à réaliser mais, en général, dégradent d'autres performances. Elles sont utilisables lorsque le cahier des charges est peu exigeant. Dans le cas contraire, il faut envisager de combiner ces différentes actions au sein d'un correcteur plus complexe.

➤ L'action proportionnelle

Elle permet d'agir directement en fonction de l'erreur de la sortie par rapport à la Consigne. Par conséquent, plus le gain proportionnel est grand, plus la réponse est rapide et plus l'erreur statique est petite, mais plus le gain proportionnel est grand, plus les oscillations sont importantes durant la phase transitoire.

Cependant, un gain proportionnel trop grand pourrait causer l'instabilité de la boucle fermée. Cette action peut être modélisée par la fonction de transfert suivante :

$$c_p(s) = K_p \quad (3.5)$$

➤ L'action intégrale

Elle permet d'annuler l'erreur statique, si le système initial n'a pas d'intégration, plus la constante T_i est petite plus l'action est forte. Une action excessive (T_i trop petite) conduit à une instabilité. Elle est donnée par la fonction de transfert qui est ci-après :

$$c_i(s) = \frac{1}{T_i s} \quad (3.6)$$

➤ L'action dérivée :

Plus la constante T_d est grande plus l'action dérivée est forte, elle permet de réduire le dépassement et les oscillations obtenues en action proportionnelle seule, mais elle amplifie les bruits de mesure et de plus un excès de cette action peut conduire à l'instabilité du système

Chapitre III : Commande et résultats de simulation

bouclé. L'action dérivée est représentée par la fonction de transfert suivante :

$$c_d(s) = T_d s \quad (3.7)$$

III.3.2 Méthodes de Ziegler et Nichols [10]

En 1942, Ziegler et Nichols ont proposé deux approches heuristiques basées sur leur expérience et quelques simulations pour ajuster rapidement les paramètres des régulateurs P, PI et PID. La première méthode nécessite l'enregistrement de la réponse indicielle en boucle ouverte, alors que la deuxième permet d'amener le système bouclé à sa limite de stabilité [7]. Puisque notre système n'est pas de premier ordre on utilise la deuxième méthode avec les paramètres du tableau (3.1) et où T_{cr} est définie sur la figure (3.1).

Tableau 3.1 - Paramètres PID selon Ziegler-Nichols

| Type | K_p | T_i | T_d |
|------|----------------|----------------|----------------|
| P | $0.5. K_{cr}$ | - | - |
| PI | $0.45. K_{cr}$ | $0.83. T_{cr}$ | - |
| PID | $0.6. K_{cr}$ | $0.5. T_{cr}$ | $0.125.T_{cr}$ |

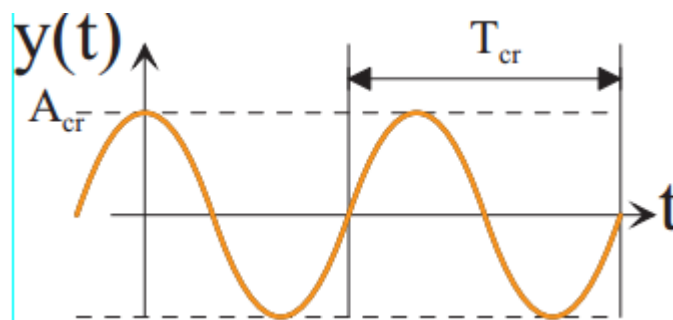


Figure 3.1 – Calcul de T_{cr} .

III.3.3 Commande de l'inclinaison du robot par PID

La fonction de transfert pour l'inclinaison est décrite par :

$$G_1(s) = \frac{0.2465s^2}{s^4 + 0.0097s^3 - 172.1160s^2 - 1.3426s} \quad (3.8)$$

Chapitre III : Commande et résultats de simulation

$G_1(s)$ est une fonction de transfert de quatrième degré.

Le but de ce correcteur est d'annuler l'erreur de position tout en conservant de bonnes performances dynamiques. Pour cela le correcteur doit posséder une fonction de transfert $C_{PID}(s)$ équivalente en régime statique à un intégrateur, et en régime dynamique équivalente à un correcteur proportionnel. On constate que l'expression du correcteur qui convient est :

$$C_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = \frac{K_p}{T_i s} (1 + T_i s + T_i T_d s^2) \quad (3.9)$$

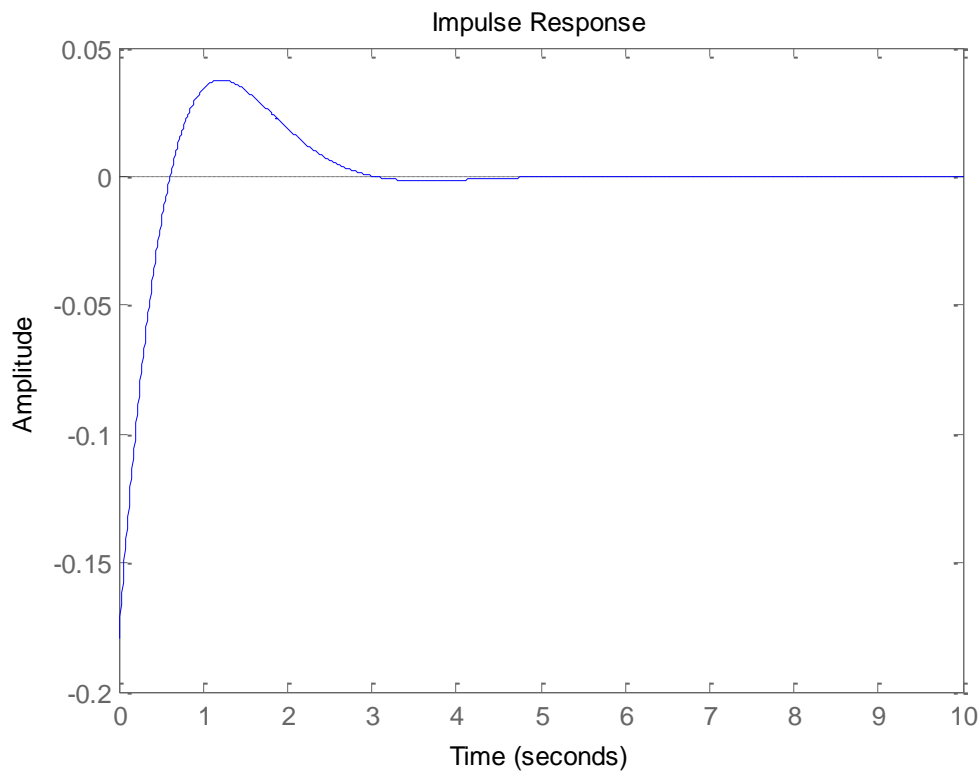


Figure 3.2 - Réponse impulsionnelle de l'angle d'inclinaison.

L'objectif principal du système de régulation est de faire converger l'angle d'inclinaison (θ) vers zéro dans les plus brefs délais. Cette convergence signifie que le mobile est en position verticale. Ceci ne peut être réalisé qu'après un certain temps du régime transitoire (oscillation). La figure (3.2) montre la réponse du système à une impulsion de force de perturbation à partir d'une position de repos. On remarque que θ converge vers 0 après un régime transitoire qui converge relativement lent '3.8s' avec un dépassement de 16%, donc on constate que le régulateur PID n'est pas robuste.

III.4. Commande par retour d'état [11]

III.4.1 Introduction

La commande par retour d'état est à la commande des systèmes modélisés par leur représentation d'état, ce que la boucle fermée est aux systèmes représentés par une fonction de transfert. L'idée consiste toujours à piloter le système par un signal de consigne et à générer automatiquement le signal de commande en confrontant en permanence la valeur de la consigne et le comportement réel du système. L'écart entre consigne et comportement réel sert de base au signal de commande du système. Dans la commande par retour d'état, nous n'allons pas mesurer le signal de sortie pour le boucler sur l'entrée, mais nous allons nous servir du vecteur d'état complet pour prendre connaissance du comportement du système, Figure (3.3).

III.4.2 Principe de la commande par retour d'état

Le principe est de déterminer une commande telle que les pôles du système de la fonction de transfert du système bouclé soient convenablement placés dans le plan complexe et satisfasse des spécifications d'amortissement, de rapidité, etc. Les pôles de la fonction de transfert étant les valeurs propres de la matrice d'état, le but est donc de réaliser un asservissement modifiant convenablement la matrice d'état du système.



Figure 3.3 - Système en boucle ouverte

Le signal de commande du système (autrement dit l'écart), Figure (3.4), doit être construit en soustrayant au signal de consigne un signal qui dépend du vecteur d'état. Ce vecteur d'état étant composé de 4 signaux $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$, $x_4(t)$ on le multiplie par un vecteur ligne (K) appelé vecteur de gain pour pouvoir effectuer cette soustraction. On a alors :

$$K = [K_1 \ K_2 \ K_3 \ K_4]$$

$$u(t) = r(t) - Kx(t) = r(t) - [K_1 K_2 K_3 K_4] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

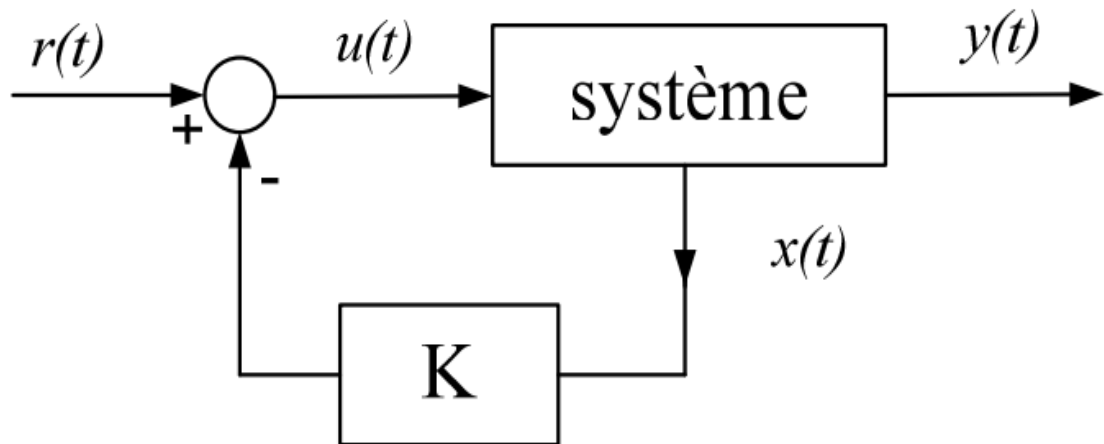


Figure 3.4 - Bouclage du système par un vecteur de gain.

III.4.3 Commande par placement de pôles [12]

Puisque notre système est commandable donc on cherche un régulateur pour ce système de la forme $u(t) = r(t) - Kx(t)$, où r est la nouvelle entrée. Il est légitime de vouloir choisir la matrice de régulation de façon à imposer les pôles du système bouclé. Plusieurs essais de simulation en utilisant MATLAB doivent être effectués pour atteindre le meilleur emplacement des pôles qui donne la réponse souhaitable sans forcer l'entrée de commande.

La stabilité du système peut être assurée aussi longtemps que tous les pôles du système sont situés dans le plan gauche de la carte pôle-zéro, mais la question est où dans le plan gauche devrait-il être placé. Si une réponse rapide est souhaitée, les pôles doivent être placés le plus loin possible de l'axe imaginaire. Plus les pôles sont placés loin de l'axe imaginaire, plus la réponse du système est rapide et plus forte est l'action de l'actionneur à effectuer la tâche. Considérons quelques cas :

➤ Premier cas : pôles réels négatifs

Pour : $P = [-1 \ -2 \ -4 \ -5]$ et $K = [-3.5424 \ -7.0269 \ 901.3151 \ 51.1434]$, on obtient les résultats de la figure (3.5) et du tableau (3.2).

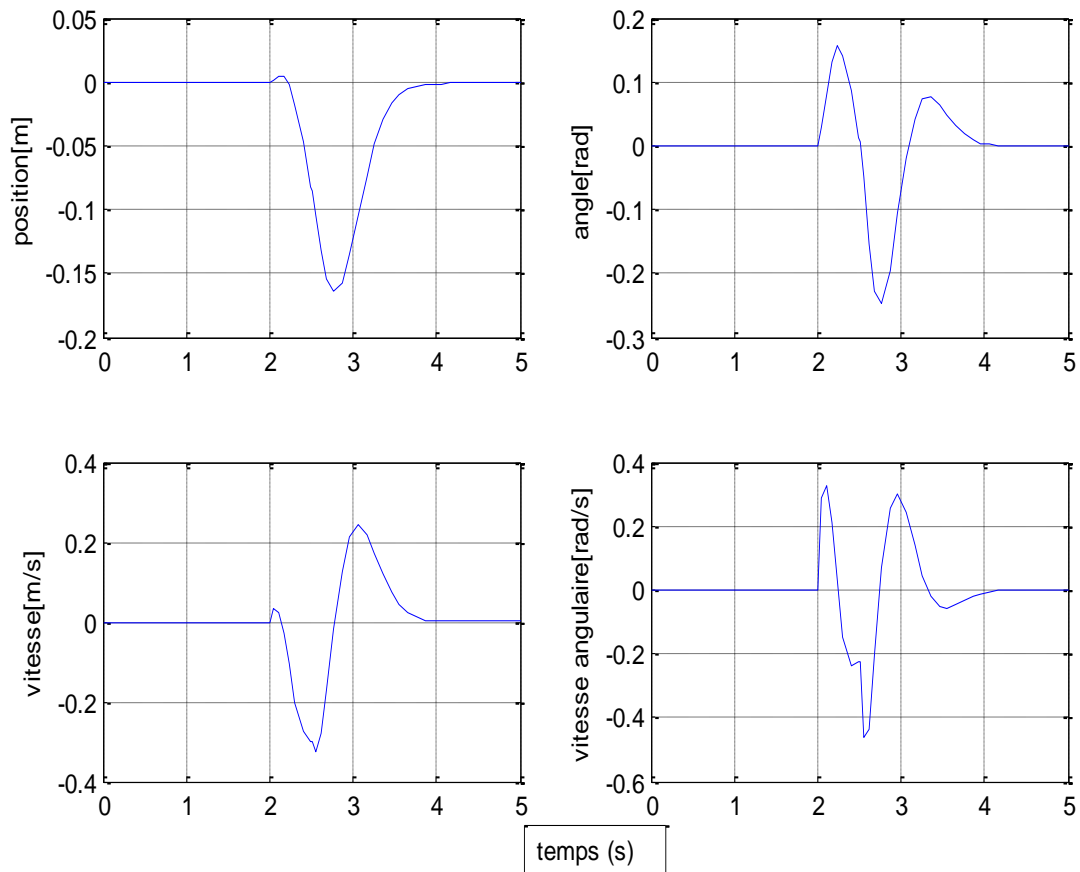


Figure 3.3 – La réponse impulsionnelle du système (les pôles à partie réelle négatif)

Tableau 3.2 - Les caractéristiques de la réponse impulsionnelle (1^{er} cas)

| L'état | Temps de stabilisation | La plus grande variation |
|----------|------------------------|--------------------------|
| Angle | 2s | 0.24 rad = 13.75° |
| position | 2s | 16cm |

Remarque :

Les pôles réels négatifs donnent une réponse rapide (temps de stabilité = 2s) mais avec une grande variation dans le régime transitoire de la position.

➤ **Deuxième cas : pôles complexes**

Pour $P = [-0.5-i; -0.5+i; -4-5*i; -4+5*i]$ et donc $K = [-4.5386 \quad -4.6359 \quad 906.7344 \quad 38.1371]$, on obtient les résultats de la figure (3.6) et du tableau (3.3).

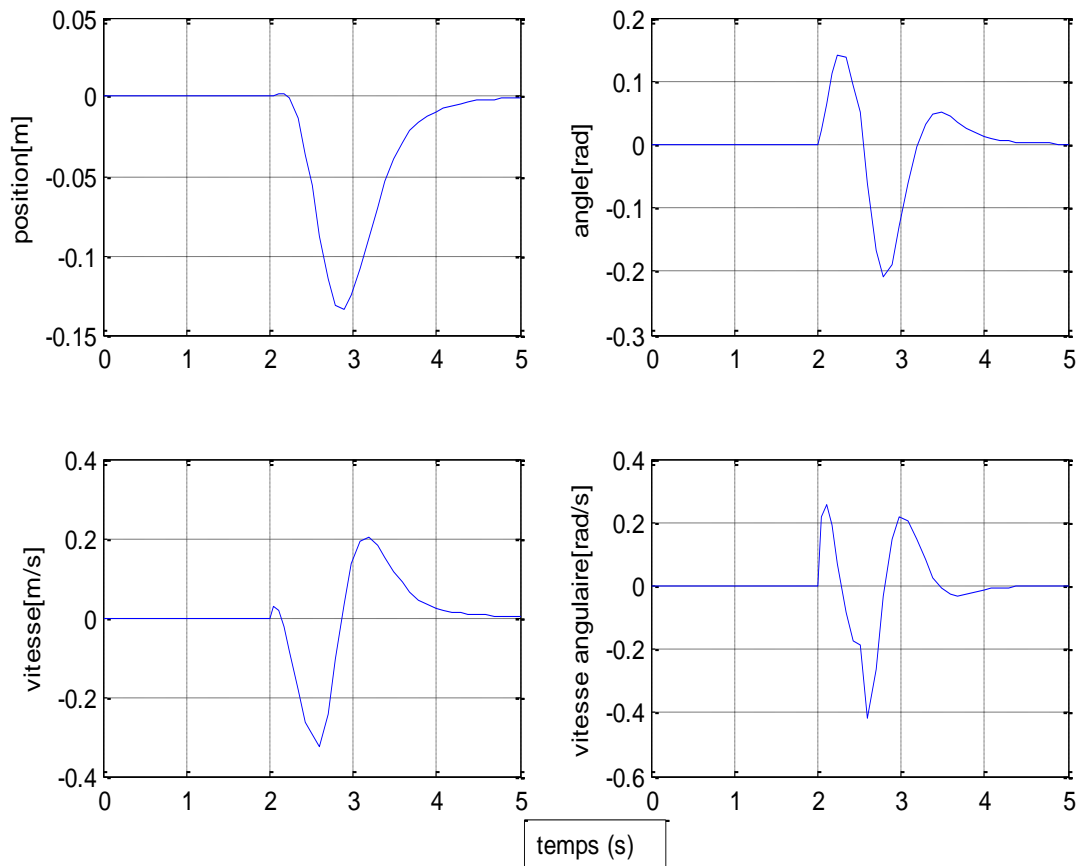


Figure 3.4 – La réponse impulsionnelle du système (les pôles sur l'axe imaginaire)

Tableau 3.3 - Caractéristiques de la réponse impulsionnelle (2^{ème} cas)

| L'état | Temps de stabilisation | La plus grande variation |
|----------|------------------------|--------------------------|
| Angle | 2.7s | 0.21 rad=12.03° |
| Position | 2.7s | 12cm |

Remarque :

Les pôles à partie imaginaire donne une réponse lente par rapport au 1^{er} cas (temps de stabilité = 2.7s) mais avec une variation moyenne en régime transitoire.

➤ **Troisième cas : Autres pôles complexes**

Pour $P = [-13.1410 + 0.7342i \quad -13.1410 - 0.7342i \quad -1.0818 + 1.0768i \quad -1.0818 - 1.0768i]$, on a $K = 10^3 [-0.0357 \quad -0.0387 \quad 1.6587 \quad 0.12861]$. La figure (3.7) et le tableau (3.4) montrent les résultats obtenus.

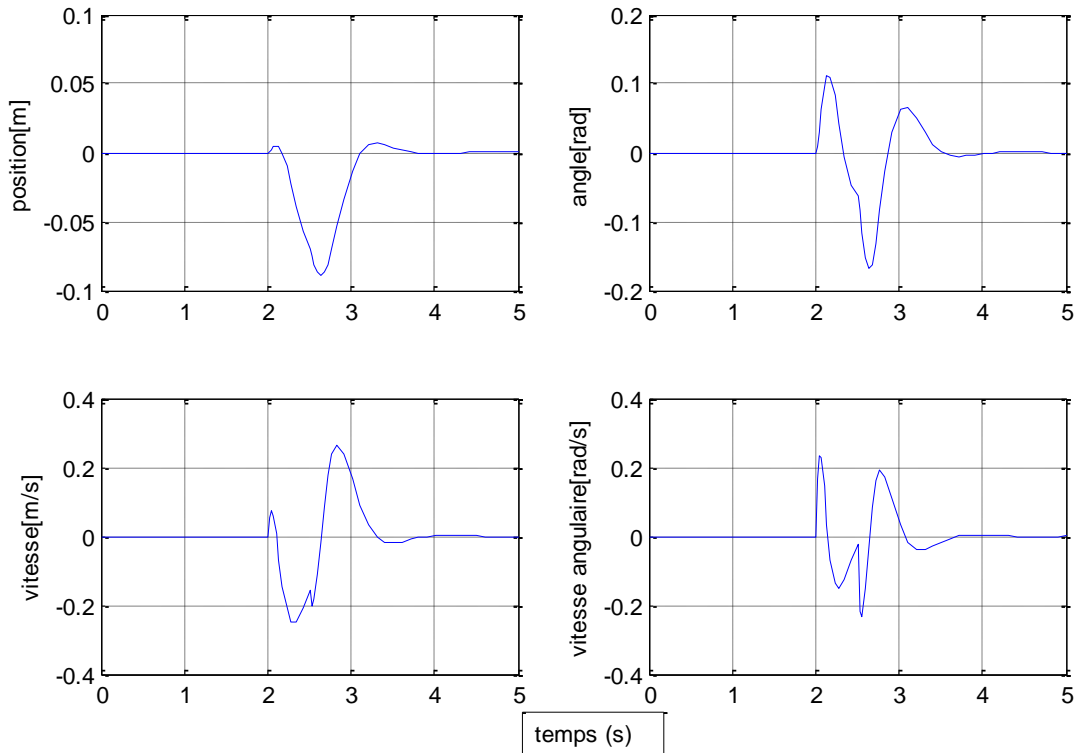


Figure 3.5 – La réponse impulsionnelle du système (3^{ème} cas)

Tableau 3.4 - Caractéristiques de la réponse impulsionnelle (3^{ème} cas)

| L'état | Temps de stabilisation | La plus grande variation |
|----------|------------------------|--------------------------|
| Angle | 2.1s | 0.17 rad=9.74° |
| Position | 2.1s | 9cm |

Remarque :

Le placement de deux paires de pôles complexes avec une petite valeur imaginaire ($\pm 0.7i$, $\pm 1.7i$) donne une réponse rapide par rapport au deuxième cas (temps de stabilité =2.1s) et avec une petite variation de position en régime transitoire.

III.5. Commande optimale [13]

Les problèmes de commande optimale se rencontrent dans la vie de tous les jours : comment arriver à destination le plus rapidement possible, comment minimiser sa consommation... Pour un système dynamique donné et dont les équations sont connues, le problème de commande optimale consiste alors à trouver la commande minimisant un critère donné.

Chapitre III : Commande et résultats de simulation

III.5.1 Commande linéaire quadratique (LQR)

On parle de commande linéaire quadratique : LQ ou LQR pour (Linear Quadratic Regulator). Le système est linéaire et la commande est quadratique. La commande optimale est à un retour d'état. Le principe de la commande LQR est présenté dans la figure (3.8).

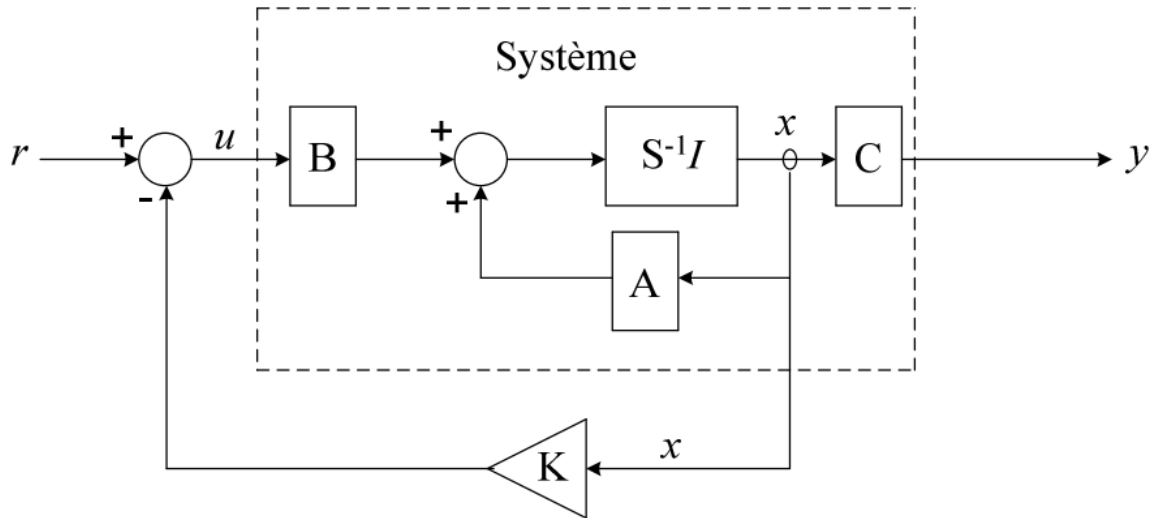


Figure 3.8 - Principe d'une commande LQR

On a

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (3.11)$$

La paire (A, B) est stabilisable, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de mode instable et ingouvernable dans le système. Soit un régulateur par retour d'états dont le processus obéit à une équation d'état. Le problème simplifié du régulateur linéaire quadratique consiste à trouver la matrice du correcteur K qui minimise la fonction du coût (ou le critère de performance) suivante:

$$J(x_0, u) = \frac{1}{2} x^T(t_f) S x(t_f) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (x^T(t) Q(t) x(t) + u^T(t) R(t) u(t)) dt \quad (3.12)$$

Les matrices de pondération Q et R sont définies positives et symétriques. Et S est la matrice de solution de l'équation de Riccati (est définie positive et symétrique).

Le Lagrangien s'écrit alors:

$$L(x, u, p, t) = p^T A(t) x + p^T B(t) u + \frac{1}{2} (x^T Q(t) x + u^T R(t) u) \quad (3.13)$$

La loi de commande optimale est obtenue si le dérivé de lagrangien par rapport à la loi de commande est nul :

$$\frac{\partial L}{\partial u} = B^T(t) p + R(t) u = 0 \quad (3.14)$$

Chapitre III : Commande et résultats de simulation

Donc

$$u_{opt} = -R^{-1}(t)B^T p(t) \quad (3.15)$$

Où :

$$p(t_f) = Sx(t_f) \quad (3.16)$$

Le principe du maximum donne la condition suivante :

$$\dot{p} = -\frac{\partial L}{\partial x} = A^T(t)p - Q(t)x \quad (3.17)$$

Alors l'équation dynamique du système en boucle fermée s'écrit :

$$\dot{x} = A^T(t)x(t) - B(t)R^{-1}(t)B^T(t)p(t) \quad (3.18)$$

Les équations (3.17) et (3.18) peuvent se mettre sous la forme d'un système matriciel appelé système Hamiltonien :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x(t) \\ p(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A(t) & -B(t)R^{-1}(t)B^T \\ -Q(t) & -A^T(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(t) \\ p(t) \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

Ecrivons $p(t) = P(t)x(t)$, avec comme condition finale $P(t_f) = S$. L'équation (3.17) s'écrit alors :

$$\dot{p}(t) = -(A^T(t)P(t) + Q(t))x(t) \quad (3.20)$$

Avec $\dot{p}(t) = \dot{P}(t)x(t) + P(t)\dot{x}(t)$ et l'équation d'état du système, l'équation (3.20) s'écrit (en omettant la référence au temps pour alléger les notations) :

$$(\dot{P} + PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q)x = 0 \quad (3.21)$$

La solution est alors obtenue en résolvant l'équation (différentielle) de Riccati suivante:

$$\dot{P} + PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (3.22)$$

Avec \mathbf{P} est une matrice symétrique, présente la solution de l'équation de Riccati (3.22)

Il est intéressant de noter que la commande optimale obtenue s'écrit comme un retour d'état $u = -K(t)x$: avec :

$$K = -R^{-1}R^T P \quad (3.23)$$

Chapitre III : Commande et résultats de simulation

III.5.2 Le choix des matrices de pondération

Il est intéressant de remarquer d'abord que la multiplication des matrices de pondération Q et R par un même scalaire laisse inchangé le gain K . En effet, soit le nouveau problème basé sur les matrices de pondération $Q_0 = \rho Q$ et $R_0 = \rho R$. On vérifie que $P_0 = \rho P$ solution de l'équation de Riccati correspondante. En effet :

$$K_0 = -R_0^{-1} B^T P_0 = -R^{-1} B^T P = K \quad (3.24)$$

Sans restriction, les pondérations peuvent être choisies symétriques. Elles sont généralement choisies diagonales. Voici une méthode simple de choix et de modification des pondérations en vue d'aboutir à un correcteur satisfaisant.

1. Au départ, on choisit généralement des pondérations égales aux matrices identité.
2. Dans une seconde étape, on accélère ou décélère globalement le système en multipliant la matrice Q par un scalaire ρ (accélération avec $\rho > 1$ et décélération avec $\rho < 1$), jusqu'à obtenir une dynamique moyenne adaptée.
3. Dans le cas où certains états auraient des dynamiques trop lentes par rapport à d'autres, on peut choisir d'augmenter la pondération de Q correspondant aux premiers.
4. Dans le cas où certains actionneurs seraient trop sollicités par rapport à d'autres, on peut choisir d'augmenter la pondération de R correspondant.

Les étapes 2, 3 et 4 peuvent être réitérées dans l'ordre souhaité jusqu'à obtenir un correcteur satisfaisant le cahier des charges.

La matrice Q s'écrit :

$$Q = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

où les valeurs de a, b, c, d sont les pondérations pour les états respectifs $x, \dot{x}, \theta, \dot{\theta}$, tandis que la matrice de pondération R est une valeur scalaire puisqu'il n'y a qu'une seule entrée de commande au système. Les valeurs contenues dans la matrice Q sont ajustées en fonction de la réponse nécessaire du système, une valeur plus élevée des pondérations indique l'importance des états par rapport aux autres.

L'objectif principal du système de contrôle est de faire converger tous les états du système vers zéro avec le plus court temps possible. Une pondération élevée pour R indique moins de contrôle pour équilibrer le système, cela se traduit par une faible valeur du gain pour la position linéaire x ,

Chapitre III : Commande et résultats de simulation

et la vitesse linéaire, \dot{x} permet au robot de continuer à se déplacer afin d'équilibrer le système, figure (3.9).

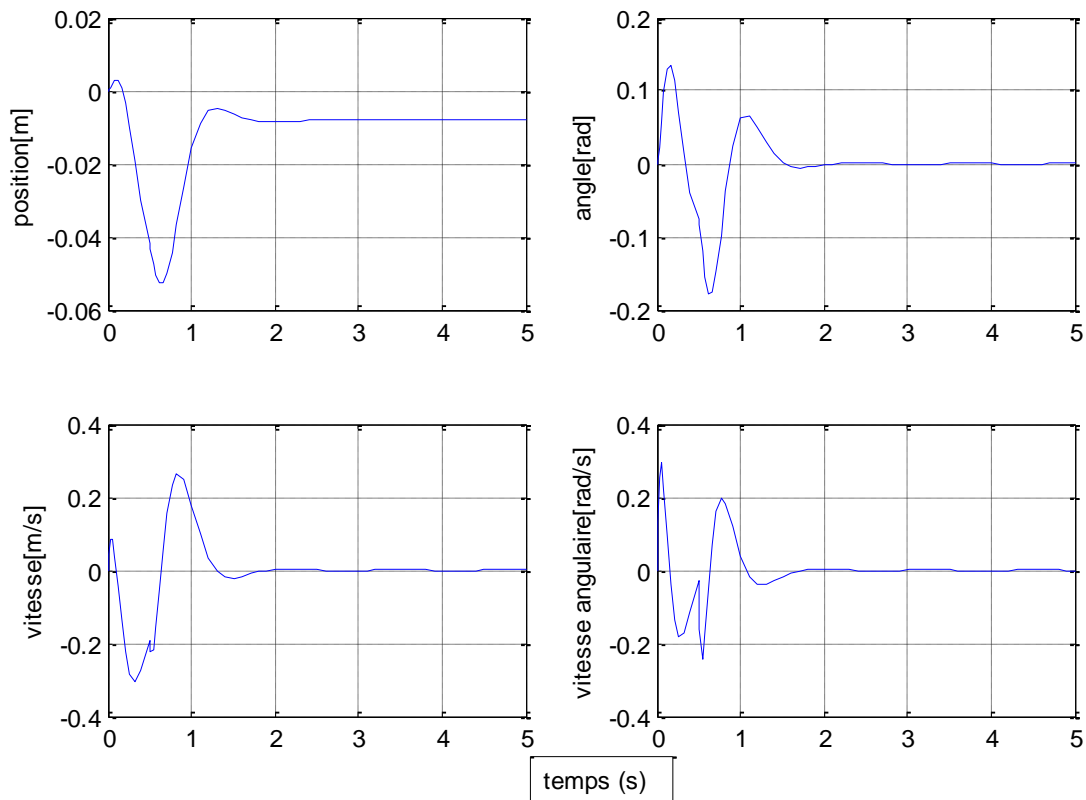


Figure 3.9 – La réponse impulsionnelle du système à commande LQR lorsque(a>>>)

La figure (3.9) montre que l'augmentation de la pondération pour l'état x se traduit par un gain élevé qui réduit le temps de réglage de la position du robot. Malheureusement, les moteurs ne seront pas capables de répondre à la réponse désirée parce que le couple requis dépasse le maximum du couple moteur.

Il faut faire un bon choix des matrices de pondération Q et R pour contrôler tous les états du système d'une manière optimale, c'est-à-dire optimiser le temps de stabilisation et la variation de position ainsi que l'inclinaison.

$$\text{Pour : } R=1 ; \quad \text{et } Q = \begin{bmatrix} 5000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

On obtient les résultats de la figure (3.10) et le tableau (3.5) :

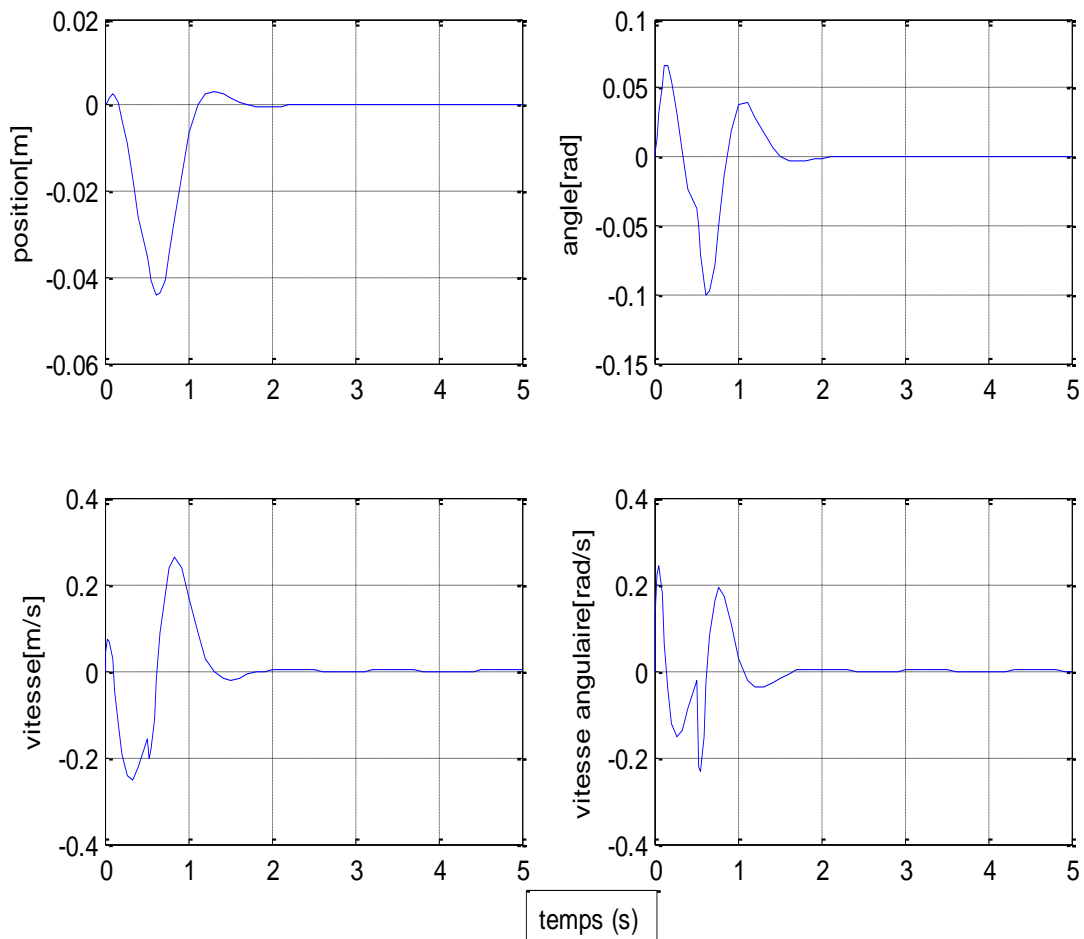


Figure 3.10 – La réponse impulsionnelle du système à commande optimale(LQR).

Tableau 3.5 - Caractéristiques de la réponse impulsionnelle d'une commande optimale

| L'état | Temps de stabilisation | La plus grande variation |
|----------|------------------------|--------------------------|
| Angle | 1.95s | 0.1 rad=5.72° |
| Position | 1.95s | 4.2cm |

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre on a détaillé trois stratégies de contrôle pour équilibrer notre robot pendule inversé, la commande **PID**, la commande par **placement de pôles** et la commande optimale **LQR**. Chaque stratégie a sa propre caractéristique, ses propres avantages et inconvénients.

Les résultats de simulations montrent que le contrôleur LQR donne de meilleures performances par rapport au régulateur PID ou avec la commande par placement de pôles, car le contrôleur LQR cherche à trouver les valeurs optimales soit pour la position ou pour l'angle de l'inclinaison pour maintenir l'équilibre du robot.

Chapitre

4

*Conception et réalisation
d'un robot équilibriste*

Chapitre IV : Conception et Réalisation d'un robot équilibriste

Dans ce chapitre nous nous intéresserons aux composants et dispositifs de commande utilisés dans la conception du Robot équilibriste (*self balancing robot*)

La réalisation de ce robot nécessite divers notions dans plusieurs domaines électroniques informatiques et automatiques, ce qu'on appelle brièvement Robotique.

IV.1 Composants et dispositifs

IV.1.1 Moteur [14]

Chaque roue est motorisée indépendamment de l'autre, offrant le contrôle de lacet par différenciation, voir inversion du régime de rotation. Le moteur utilisé est de type moteur à courant continu 12V, Figure (4.1).



Figure 4.1 - Moteurs à courant continue

Il existe principalement deux types de moteurs : synchrones ou alternateurs et asynchrones d'induction. Les premiers sont utilisés dans des systèmes à vitesse constante et faible couple de démarrage tandis que les derniers sont employés dans la gamme des hautes puissances.

Principe de fonctionnement [15]

Le moteur à courant continu se compose :

- De l'inducteur ou du stator,
- De l'induit ou du rotor,
- Du collecteur et des balais.

Lorsque le bobinage de l'inducteur du moteur est alimenté par un courant continu, sur le même principe qu'un moteur à aimant permanent, Figure (4.2), il se crée un champ magnétique (flux d'excitation) de direction Nord-Sud.

Une spire capable de tourner sur un axe de rotation est placée dans le champ magnétique. De plus, les deux conducteurs formant la spire sont chacun raccordés électriquement à un demi collecteur et alimentés en courant continu via deux balais frotteur.

D'après la loi de Laplace (tout conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique est soumis à une force), les conducteurs de l'induit placés de part et d'autre de l'axe des balais (ligne neutre) sont soumis à des forces F égales mais de sens opposé en créant un couple moteur : l'induit se met à tourner.

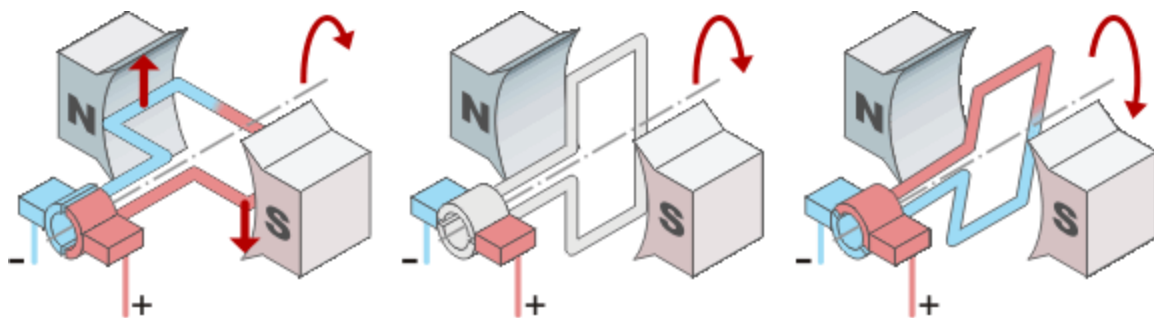


Figure 4.2 - Courant dans un champ magnétique.

Si le système balais-collecteurs n'était pas présent (simple spire alimentée en courant continu), la spire s'arrêterait de tourner en position verticale sur un axe appelé communément "ligne neutre". Le système balais-collecteurs, Figure (4.3), a pour rôle de faire commuter le sens du courant dans les deux conducteurs au passage de la ligne neutre. Le courant étant inversé, les forces motrices sur les conducteurs le sont aussi permettant ainsi de poursuivre la rotation de la spire.

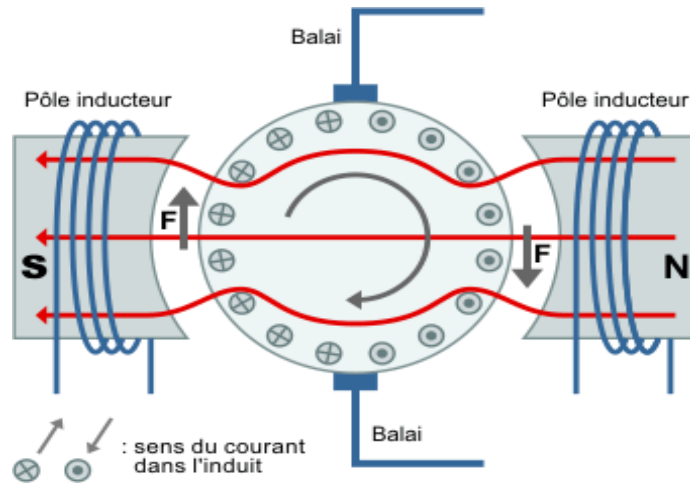


Figure 4.3 - Le système balais-collecteurs

Dans la pratique, la spire est remplacée par un induit (rotor) de conception très complexe sur lequel sont montés des enroulements (composés d'un grand nombre de spires) raccordés à un collecteur "calé" en bout d'arbre. Dans cette configuration, l'induit peut être considéré comme un seul et même enroulement semblable à une spire unique. [14]

La Figure (4.4) montre le schéma équivalent du moteur à courant continu. Si le courant est en régime continu on peut négliger l'inductance dans ce circuit, le moteur se comporte comme une résistance en série avec un générateur de tension.

I : courant consommé par le moteur (Ampère)

U : Tension d'alimentation du moteur (Volt)

E : force électromotrice (Volt)

R : résistance interne du bobinage (Ohm)

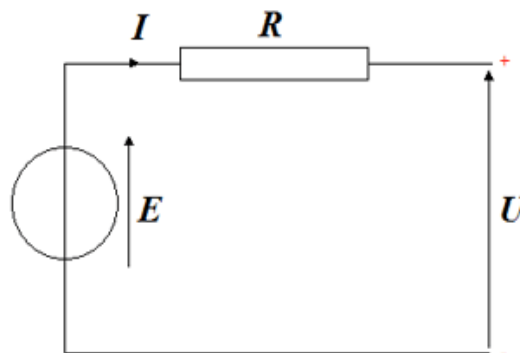


Figure 4.4 - Schéma équivalent du moteur à courant continu

Du schéma équivalent de la figure (4.4), on déduit l'équation:

$$U = E + RI \quad (4.1)$$

La tension FEM est proportionnelle à la vitesse angulaire :

$$E = k \cdot \omega \quad (4.2)$$

Avec :

k : une constante caractéristique du moteur.

ω : vitesse angulaire en rad/s.

Le courant est directement lié au couple résistant sur l'arbre :

$$C = k \cdot I \quad (4.3)$$

C : couple en m.N

IV.1.2 Module hacheur L298 [15]

Le L298 est un module qui dispose de 2 hacheurs 4-quadrants dans un circuit intégré de type Multi watt, Figure (4.5). Le hacheur est un convertisseur statique continu-continu permettant de fabriquer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe. Il reçoit les signaux de commande PWM (*Pulse Width Modulation*) ou MLI (*Modulation de Largeur d'Impulsion*) issus de l'Arduino. Selon le rapport cyclique de ces signaux, le hacheur délivre la tension adéquate.

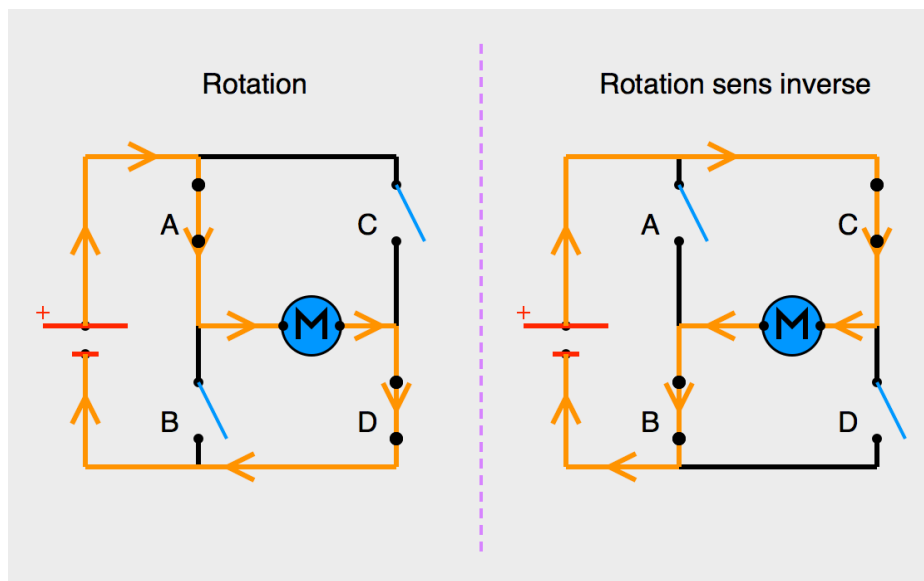


Figure 4.5 - Module hacheur en pont H

Chapitre IV : Conception et Réalisation d'un robot équilibriste

Le pont en H permet de réaliser 2 fonctions qui sont d'inverser le sens de rotation du moteur, en inversant la tension aux bornes du moteur et la variation de la vitesse du moteur en modulant la tension aux bornes du moteur.

De plus, le pont en H permet d'effectuer un freinage magnétique s'il est capable d'en dissiper la puissance générée. Cette opération s'effectue en actionnant soit les deux commutateurs supérieurs ou inférieurs en même temps, ce qui court-circuite les bornes du moteur et le fait freiner. Mieux encore, il est possible avec un peu d'électronique et un contrôleur perfectionné d'effectuer un freinage régénératif. Dans le cas d'une alimentation à batterie, l'énergie est renvoyée aux batteries plutôt que dissipée dans les commutateurs du pont.

Différents types du pont H :

a) Pont en H intégré pour 2 moteurs « Circuit L 298 » :

Ces circuits intégrés sont utiles pour l'intégration car ils peuvent commander 2 moteurs à courant continu, Figure (4.6). Les 4 diodes aux bornes du moteur sont des diodes rapides ou diodes de Schottky. Elles jouent principalement le rôle de diode de roue libre pour l'inductance interne du moteur afin de protéger le circuit des surtensions lors du freinage. On inclut dans le montage des capacités de découplage. Ces capacités, placées au plus près de l'alimentation des circuits numériques vont supprimer les signaux hautes fréquences parasites qui pourraient remonter le long de la ligne d'alimentation, par exemple lors du hachage créé par le PWM.

Une résistance placée entre la masse et le circuit de puissance permet de déterminer le courant traversant le moteur par la loi d'Ohm en mesurant la tension à ses bornes. Elle sert de shunt de mesure.

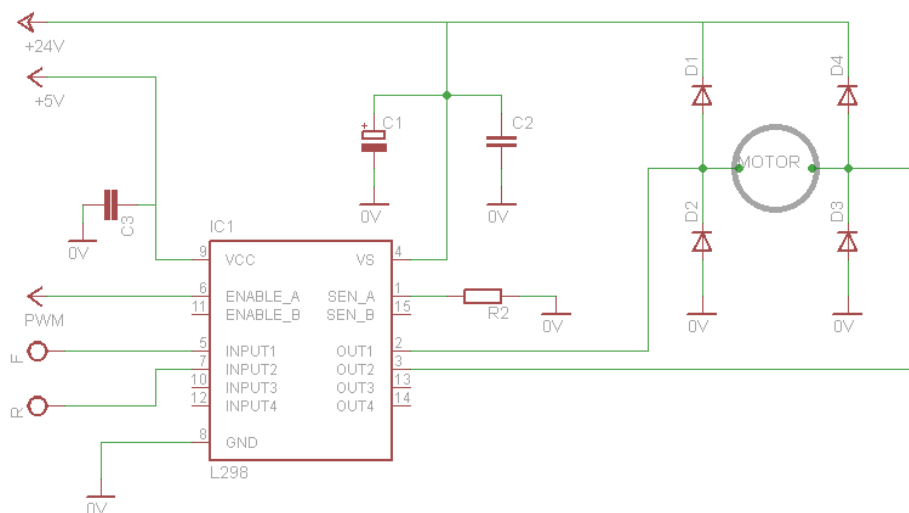


Figure 4.6 - Circuit L298

b) Pont en H intégré pour 1 moteur (Circuit L 6203)

L'utilisation du pont en H intégré simplifie la commande des moteurs. Ces circuits intégrés sont particulièrement utiles pour l'intégration au sein d'un robot car ils sont compacts mais attention toutefois à la dissipation thermique.

c) Pont en H a transistor MOS

Les transistors MOS sont mieux adaptés pour l'utilisation d'un pont en H, Figure (4.7). La chute de tension à leurs bornes est plus faible, la commutation est plus rapide et le courant supporté par le transistor est plus important. La résistance résiduelle lorsqu'ils sont saturés est assez faible et limite donc la puissance dissipée. Comme pour les transistors bipolaires, on utilise des Mosfets à canal P pour les transistors du haut et des Mosfets à canal N pour les transistors du bas.

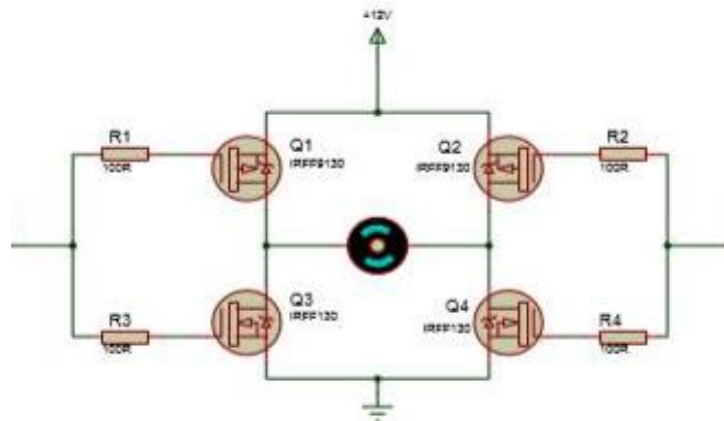


Figure 4.7 - Pont H a transistor CMOS

IV.1.3 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.

Les signaux de ces capteurs comportent différents types de bruit et il est donc difficile d'obtenir une mesure fiable de l'angle d'inclinaison à partir d'un seul de ceux-ci. Par contre, il est possible d'obtenir un bon estimé en les combinant.

Chapitre IV : Conception et Réalisation d'un robot équilibriste

Quant à la position linéaire et l'angle de direction du robot, ceux-ci sont déterminés à partir des positions angulaires des deux roues obtenues à partir des encodeurs optiques installés sur les arbres des moteurs. Ces différents capteurs sont présentés dans les sections qui suivent.

❖ Gyroscope :

Il est nécessaire pour un système de balancement d'avoir la possibilité de déterminer l'angle d'inclinaison. Ceci peut être obtenu par l'utilisation d'un gyroscope à 3 axes. Un gyroscope est un capteur qui produit un signal proportionnel à sa vitesse de rotation. Un gyromètre sert à mesurer une vitesse angulaire [rad.s^{-1}], selon 1 à 3 axes. Un gyromètre 3 axes permet une mesure selon 3 degrés de liberté (le tangage, le roulis et le lacet). Il est utilisé dans de nombreuses applications comme le gaming (Wii), la réalité augmentée, la navigation par GPS ou encore la robotique.

Ce capteur en MEMS (*Micro-machined Electro-Mechanical System*), Figure (4.8), est composé d'une structure à quartz vibrant sensible aux rotations par l'intermédiaire de la force de Coriolis. Cette force agit perpendiculairement à la direction du mouvement d'un corps en déplacement dans un milieu en rotation. [16]



Figure 4.8 - MPU 6050

Deux masses vibrent en opposition de phase sur un certain axe dit drive axe. Lorsque le capteur tourne, la force de Coriolis crée une vibration dans un axe orthogonal à la vitesse linéaire au drive axe et à la vitesse angulaire Ω . Étant proportionnelle à la vitesse Ω , cette vibration est la base pour le calcul. On appelle cet axe : sens axe. Du point de vue électrique, les matériaux qui ont des propriétés piézoélectriques sont utiles pour générer la vibration du drive axe ou pour la mesure dans le sens axis. Il existe des matériaux qui peuvent générer une différence de potentiel lors d'une compression. La force de Coriolis vaut :

$$\vec{F}_c = -2m\vec{\Omega}(t)\Lambda\vec{v} \quad (4.4)$$

Comme ce type de capteur se base sur les vibrations, il faut faire attention à la température et aux vibrations mécaniques. Sachant que le signal de sortie est la combinaison d'une droite avec un bruit souvent modélisé par un bruit blanc, on retire le facteur dû à la droite, puis on fait le filtrage. [12]

❖ Accéléromètre [17]

Comme mentionné dans la section précédente, il est nécessaire de combiner l'angle d'inclinaison du robot obtenu à partir du signal du gyroscope et celui obtenu par un autre moyen pour avoir une valeur fiable. Un type de capteur couramment utilisé dans ce contexte est un inclinomètre. Par contre, à cause de son principe de fonctionnement basé sur un pendule, ce type de capteur a une dynamique relativement lente et donc une bande passante étroite limitant la performance du système d'estimation.

De façon alternative, un accéléromètre ayant une bande passante largement supérieure à celle d'un inclinomètre peut être utilisé afin d'obtenir une mesure de l'angle d'inclinaison. Cette dernière alternative a été choisie dans la conception du système de mesure du robot équilibriste en raison de la meilleure performance offerte par un tel capteur et étant donné que ce type de capteur est également moins coûteux.

À la base, un accéléromètre est un capteur produisant un signal proportionnel à son accélération. Par contre, celui-ci ne détecte pas uniquement les accélérations mais aussi la force de la gravité. Par conséquent, il est possible d'obtenir un estimé de l'angle d'inclinaison du robot en utilisant un calcul de trigonométrie inverse sur les forces détectées dans les directions des axes perpendiculaires à l'axe autour duquel le robot s'incline.

IV.1.4 Carte Arduino [18]

Arduino est un projet créé par une équipe de développeurs, composée de six individus : Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino, David Mellis et Nicholas Zambetti. Cette équipe a créé le "système Arduino", Figure (4.9). C'est un outil qui va permettre aux débutants, amateurs ou professionnels de créer des systèmes électroniques plus ou moins complexes.

Le système Arduino, nous donne la possibilité d'allier les performances de la programmation à celles de l'électronique. Plus précisément, nous allons programmer des systèmes électroniques. Le gros avantage de l'électronique programmée c'est qu'elle simplifie

Chapitre IV : Conception et Réalisation d'un robot équilibriste

grandement les schémas électroniques et par conséquent, le coût de la réalisation, mais aussi la charge de travail à la conception d'une carte électronique.

Le système Arduino nous permet de réaliser un grand nombre de choses, qui ont une application dans tous les domaines, l'étendue de l'utilisation de l'Arduino est gigantesque. Pour vous donner quelques exemples, vous pouvez :

- Contrôler les appareils domestiques
- Fabriquer votre propre robot
- Communiquer avec l'ordinateur
- Télécommander un appareil mobile (modélisme) ... etc.

Il existe pourtant dans le commerce, une multitude de plateformes qui permettent de faire la même chose. Notamment les microcontrôleurs. Nous allons voir pourquoi choisir l'Arduino.

- **Le prix** : En vue des performances qu'elles offrent, les cartes Arduino sont relativement peu coûteuses, ce qui est un critère majeur pour un ingénieur.
- **La liberté** : elle définit de façon assez concise l'esprit de l'Arduino. Elle constitue en elle-même deux choses :
- **Le logiciel** : gratuit et open source, développé en Java, dont la simplicité d'utilisation relève du savoir cliquer sur la souris.
- **Le matériel** : cartes électroniques dont les schémas sont en libre circulation sur internet.
- **La compatibilité** : Le logiciel, tout comme la carte, est compatible sous les plateformes les plus courantes (Windows, Linux et Mac), contrairement aux autres outils de programmation du commerce qui ne sont, en général, compatibles qu'avec Windows.



Figure 4.9 - Carte Arduino UNO

IV.1.4.1 Principe de fonctionnement :

1. On conçoit ou on ouvre un programme existant avec le logiciel Arduino.
2. On vérifie ce programme avec le logiciel Arduino (compilation).
3. Si des erreurs sont signalées, on modifie le programme.
4. On charge le programme sur la carte.
5. On câble le montage électronique.
6. L'exécution de programme est automatique après quelques secondes.
7. On alimente la carte soit par le port USB, soit par une source d'alimentation.
8. Autonome (pile 9 volts par exemple).
9. On vérifie que notre montage fonctionne.

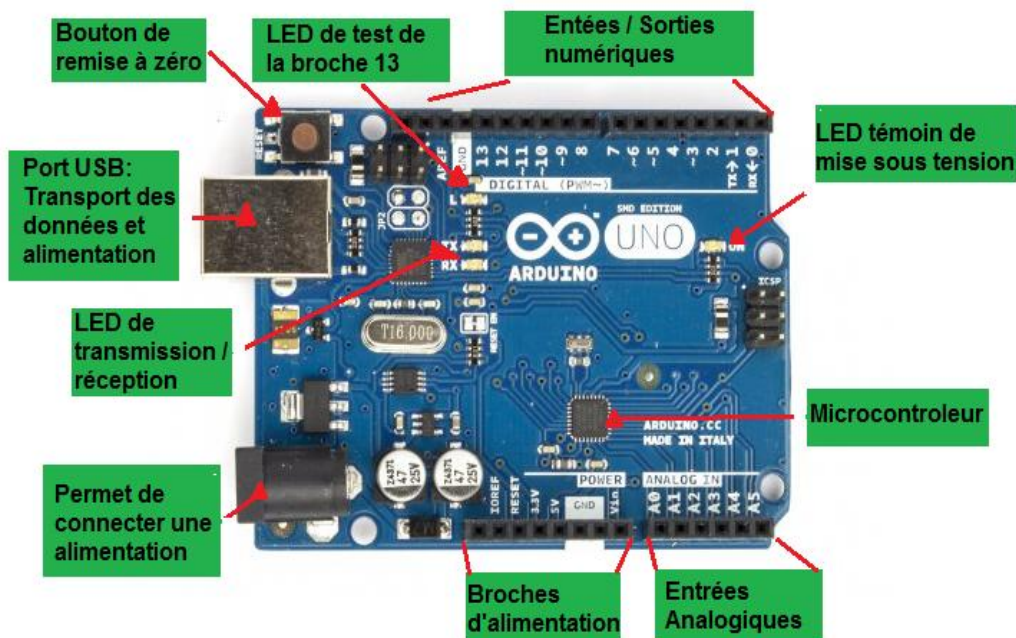


Figure 4.10 - Arduino UNO la carte électronique

- ✓ Pour les entrées / sorties numérique ceux sont les pattes dites digitales (0,1) ou "tout ou rien", Elles offrent en sortie du 5V et acceptent en entrée du 5V sur le même principe. Sont activées avec les Fonction `digitalWrite()` et `digitalRead()`.
- ✓ Les entrées analogiques ce sont les pattes dites analogiques, valeur entre 0V et 5V. Sont activées avec les Fonction `analogWrite()` et `analogRead()`.

IV.2 Communication

L'Arduino Nano a un certain nombre de moyens pour communiquer avec un ordinateur, un autre Arduino, ou d'autres microcontrôleurs. Les ATmega168 et ATmega328 fournissent UART TTL (5V) communication série, qui est disponible sur les broches numériques 0 (RX) et 1 (TX).

Le logiciel Arduino comprend un moniteur de série qui permet aux données textuelles simples pour être envoyés vers et depuis la carte Arduino. Les voyants RX et TX sur la carte clignote lorsque des données sont transmises via la puce et la connexion USB FTDI à l'ordinateur (mais pas pour la communication série sur les broches 0 et 1). Une bibliothèque SoftwareSerial permet une communication série sur l'une des broches numériques de la Nano.

IV.2.1 Protocole de communication

IV.2.1.1 Introduction

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.

IV.2.1.2 Bluetooth [21]

Bluetooth est un standard de communication permettant l'échange bidirectionnel de données à très courte distance et utilisant des ondes radio UHF. Son objectif est de simplifier les connexions entre les appareils électroniques en supprimant des liaisons filaires. Elle peut remplacer par exemple les câbles entre ordinateurs, tablettes, téléphones mobiles entre eux ou avec des imprimantes, scanners, claviers, souris, manettes de jeu vidéo, téléphones portables, PDA, systèmes et kits mains libres micro et/ou écouteurs, autoradios, appareils photo numériques, lecteurs de code-barres et bornes publicitaires interactives.

IV.2.1.3 Radio communication

Une radio communication est une télécommunication effectuée dans l'espace au moyen d'ondes électromagnétiques. Ces ondes constituent une propagation d'énergie se manifestant sous

la forme d'un champ électrique couplé à un champ magnétique. L'information est transportée grâce à une modulation constante des propriétés de l'onde, soit son amplitude, sa fréquence, sa phase ou, entre autres, par la largeur d'une impulsion. Une radiocommunication est généralement constituée d'un émetteur produisant un signal modulé, d'une antenne radioélectrique émettrice, d'un espace dans lequel l'onde radioélectrique est conduite, d'une antenne radioélectrique réceptrice et d'un récepteur.

IV.2.1.4 Bus I2C

I2C est un bus de données qui a émergé de la « guerre des standards » lancée par les acteurs du monde électronique. Conçu par Philips pour les applications de domotique et d'électronique domestique, il permet de relier facilement un microprocesseur et différents circuits, notamment ceux d'une télévision moderne : récepteur de la télécommande, réglages des amplificateurs basses fréquences, tuner, horloge, gestion de la prise pÉritel, etc.

Il existe d'innombrables périphériques exploitant ce bus, il est même implémenté par logiciel dans n'importe quel microcontrôleur. Le poids de l'industrie de l'électronique grand public a permis des prix très bas grâce à ces nombreux composants.

Ce bus porte parfois le nom de TWI (*Two Wire Interface*) chez certains constructeurs.

❖ Topologie

I2C est un bus série synchrone bidirectionnel half-duplex. Plusieurs équipements, soit maîtres, soit esclaves, peuvent être connectés au bus. Les échanges ont toujours lieu entre un seul maître et un (ou tous les) esclave(s), toujours à l'initiative du maître (jamais de maître à maître ou d'esclave à esclave). Cependant, rien n'empêche un composant de passer du statut de maître à esclave et réciproquement.

La connexion est réalisée par l'intermédiaire de deux lignes :

- SDA (*Serial Data Line*) : ligne de données bidirectionnelle,
- SCL (*Serial Clock Line*) : ligne d'horloge de synchronisation bidirectionnelle.

Il ne faut également pas oublier la masse qui doit être commune aux équipements, Figure (4.13). Les 2 lignes sont tirées au niveau de tension V_{DD} à travers des résistances de pull-up (R_P). Le nombre maximal d'équipements est limité par le nombre d'adresses disponibles, 7 bits pour l'adresse et un bit pour définir si on écrit ou on lit, soit 128 périphériques, mais il dépend également de la capacité (C_B) du bus (dont dépend la vitesse maximale du bus). Il faut savoir que

des adresses sont réservées pour diffuser des messages en broadcast et que de nombreuses adresses sont déjà attribuées par les fabricants ce qui limite grandement le nombre d'équipements (une variante d'adressage sur 10 bits existe également). [20]

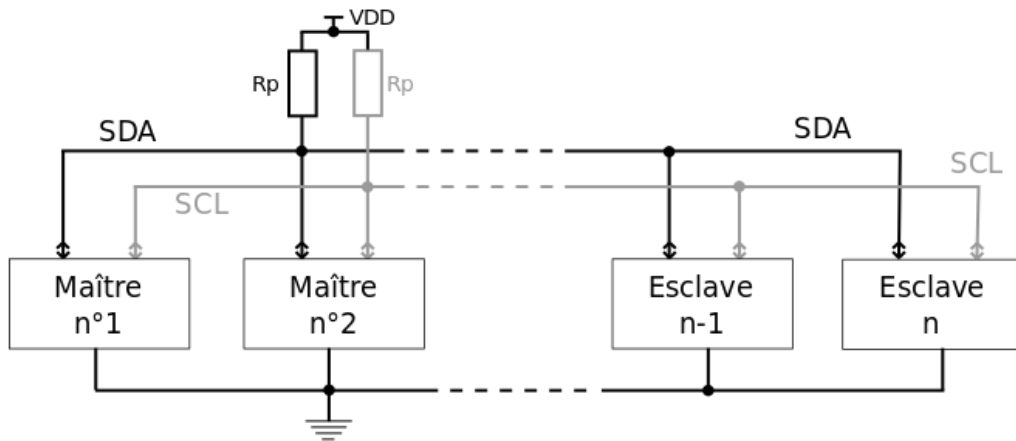


Figure 4.11 - Lignes SDA et SCL

❖ Niveaux électriques

Les équipements connectés au bus le sont par des sorties de type drain ouvert (ou collecteur ouvert) sur les deux lignes SDA et SCL.

Les équipements sont donc câblés sur le bus par le principe du « ET câblé », ce qui veut dire qu'en cas d'émission simultanée de deux équipements, la valeur 0 écrase la valeur 1, Tableau (4.1).

On dit donc :

- que l'état logique « 0 » ou « LOW » est l'état « dominant »,
- que l'état logique « 1 » ou « HIGH » est l'état « récessif ».

Lorsque le bus n'est pas utilisé, il est au niveau haut (à travers les résistances de pull-up R_P).

Les niveaux utilisés entre les lignes de bus sont proportionnels à V_{DD} :

Tableau 4.1 - Niveau High et Low du bus I2C

| Etat | Niveau |
|-------------------------------|----------------------------|
| Dominant ou « 0 » ou « LOW » | de $-0,5V$ à $0,3xV_{DD}$ |
| Récessif ou « 1 » ou « HIGH » | de $0,7xV_{DD}$ à V_{DD} |

Chapitre IV : Conception et Réalisation d'un robot équilibriste

Sur certains anciens circuits, les niveaux utilisés peuvent être fixes et donnés par les formules suscitées pour une valeur de $V_{DD} = 5V$.

❖ Temps et vitesses

Il existe cinq vitesses de transmission, Tableau (4.2) :

- « Standard mode » ≤ 100 kbit/s,
- « Fast mode » ≤ 400 kbit/s,
- « Fast plus mode » ≤ 1 Mbit/s,
- « High-speed mode » $\leq 3,4$ Mbit/s,
- « Ultra-fast mode » ≤ 5 Mbit/s.

Le bus étant synchrone, le maître impose l'horloge via la ligne SCL, il existe des temps minimum à respecter pour les paliers des niveaux « LOW » et « HIGH » sur cette ligne :

Tableau 4.2 - Les modes de transmission

| Mode | t_{LOWmin} | $t_{HIGHmin}$ |
|-----------|--------------|---------------|
| Standard | 4,7 μ s | 4 μ s |
| Fast | 1,3 μ s | 0,6 μ s |
| Fast plus | 0,5 μ s | 0,26 μ s |

IV.2.1.5 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 audibles par l'oreille humaine afin d'éviter de produire des sifflements. [22]

❖ Le montage

En utilisant le Logiciel Fritzing, la figure (4.12) montre tous les composants utilisés et le montage réalisé.

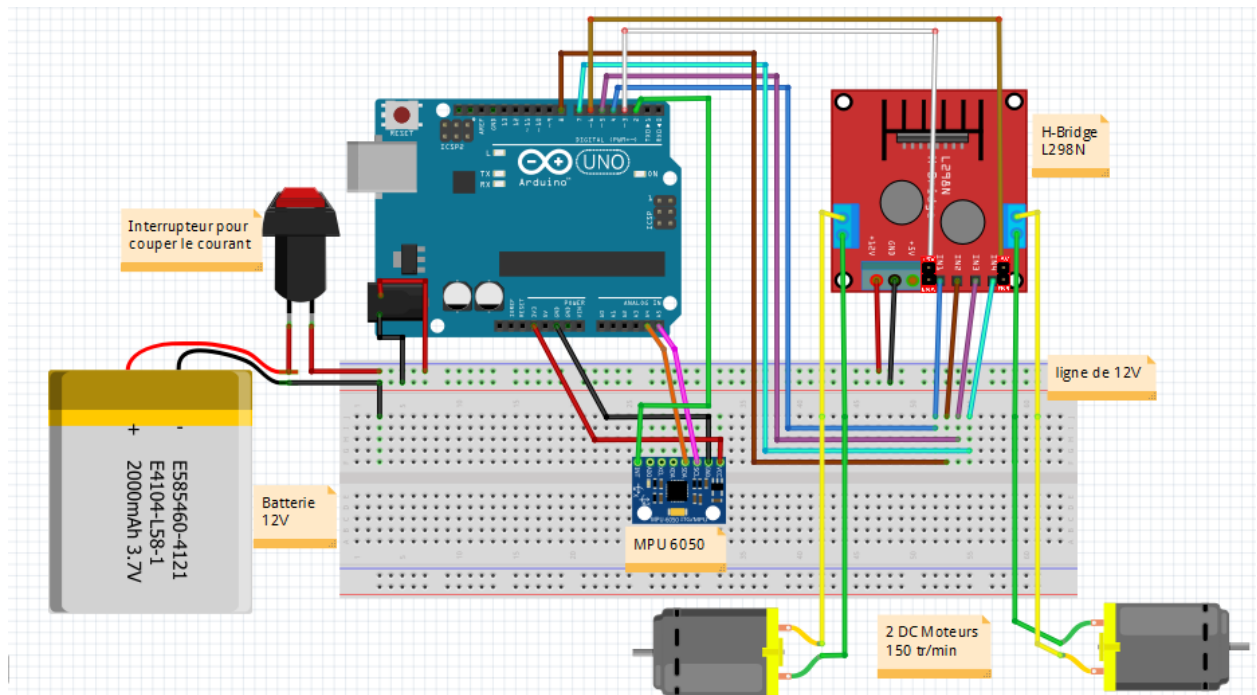


Figure 4.12 – Montage réalisé

IV.3 Réalisation

Nous allons aborder en détails les étapes de la conception et de la réalisation du Robot. Nous passerons tour à tour les cartes qui commande les moteurs, les majeurs capteurs spécifiques, Arduino qui comporte le microprocesseur, puis la structure mécanique qui sert de squelette au robot. On abordera en détails les modules et composants utilisés ainsi que les approches choisies pour les utilisés.

La partie logicielle sera aussi décrite au fur et à mesure de l'avancement afin d'avoir une idée précise sur tout le processus de création et sur le fonctionnement du dispositif.

Nous utilisons pour réaliser notre robot les matériaux suivants :

- ❖ 2 moteurs DC avec un réducteur motorisation 300 tr/min 6V / 12V (figure 4.13).
- ❖ 2 roues 65 mm (figure 4.14)
- ❖ L298N H-bridge « contrôleur moteur » (figure 4.15)
- ❖ La carte Arduino UNO (figure 4.9)
- ❖ Jumper fils (figure 4.16)
- ❖ Gyro-accéléromètre, le MPU6050. (figure 4.8)

Chapitre IV : Conception et Réalisation d'un robot équilibriste

- ❖ Un interrupteur à bascule est nécessaire pour pouvoir et éteindre l'appareil.
- ❖ Une Alimentation 12V 2A « Batterie Lipo 11.1 V 2000 mAh » (figure 4.17)
- ❖ Une feuille de plexiglass sur laquelle nous allons installer nos matériaux (figure 4.18)

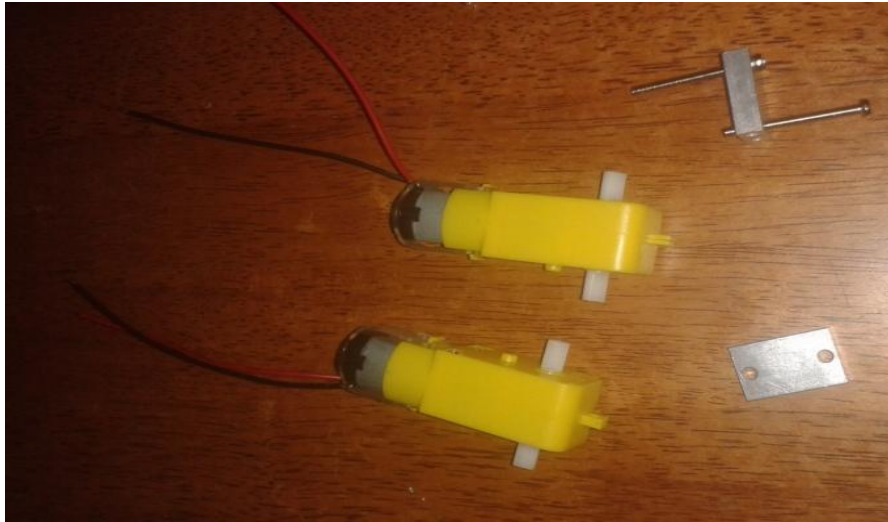


Figure 4.13 – Deux moteurs à courant continu avec un réducteur ‘Pololu’



Figure 4.14 – Deux roues de 65 mm

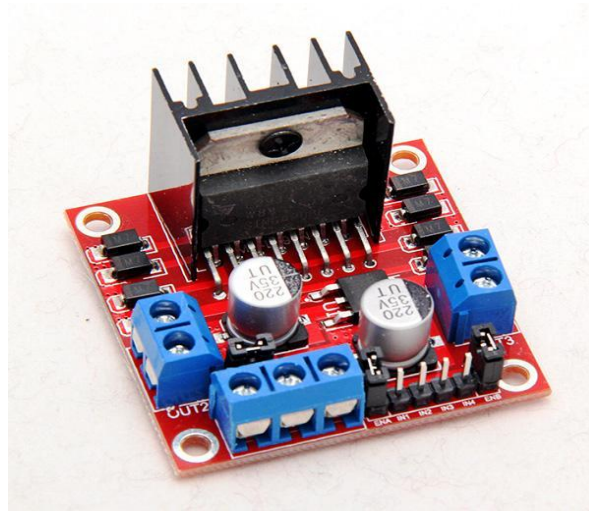


Figure 4.15 – Le pont H ‘L298N’



Figure 4.16 – Jumper fils



Figure 4.17 – Batterie Lipo 11.1 V



Figure 4.18 - Une feuille de plexiglass

On réalise notre robot montage comme suit :

Les moteurs a la feuille de plexiglass boulonnée sur elle (Figure 4.19).

Les moteurs choisis pour notre robot sont des moteurs à courant continu. Le choix des moteurs est conditionné par la disponibilité sur le marché d'une part, mais aussi par la puissance et le couple développé. En effet, les moteurs doivent être capables de répondre rapidement afin de compenser le pivotement du robot. Les dimensions des moteurs jouent aussi un rôle clé dans la structure mécanique du robot. Les Moteurs sont du type « pololu » 12V à courant continu de 300 tours par minutes.

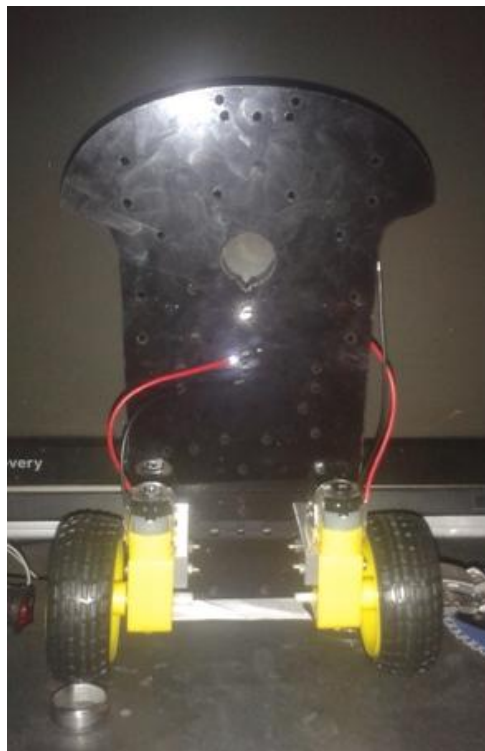


Figure 4.19 – Les deux moteurs fixés sur la feuille de plexiglass

Puis juste percer quelques trous et fixer l'Arduino et le pont-H les potentiomètres et l'interrupteur. Tout ce que nous faire, gardons le gyroscope au plus près du milieu de l'essieu que possible et posez à plat avec les broches dressaient. N'installons pas le gyroscope à mi-chemin vers le haut ou nous obtiendrons une erreur avec vos lectures (Figure 4.20). Au lieu de la feuille de plexiglass nous pouvons utiliser une boîte en plastique peut-être si nous pouvons trouver un la bonne largeur.

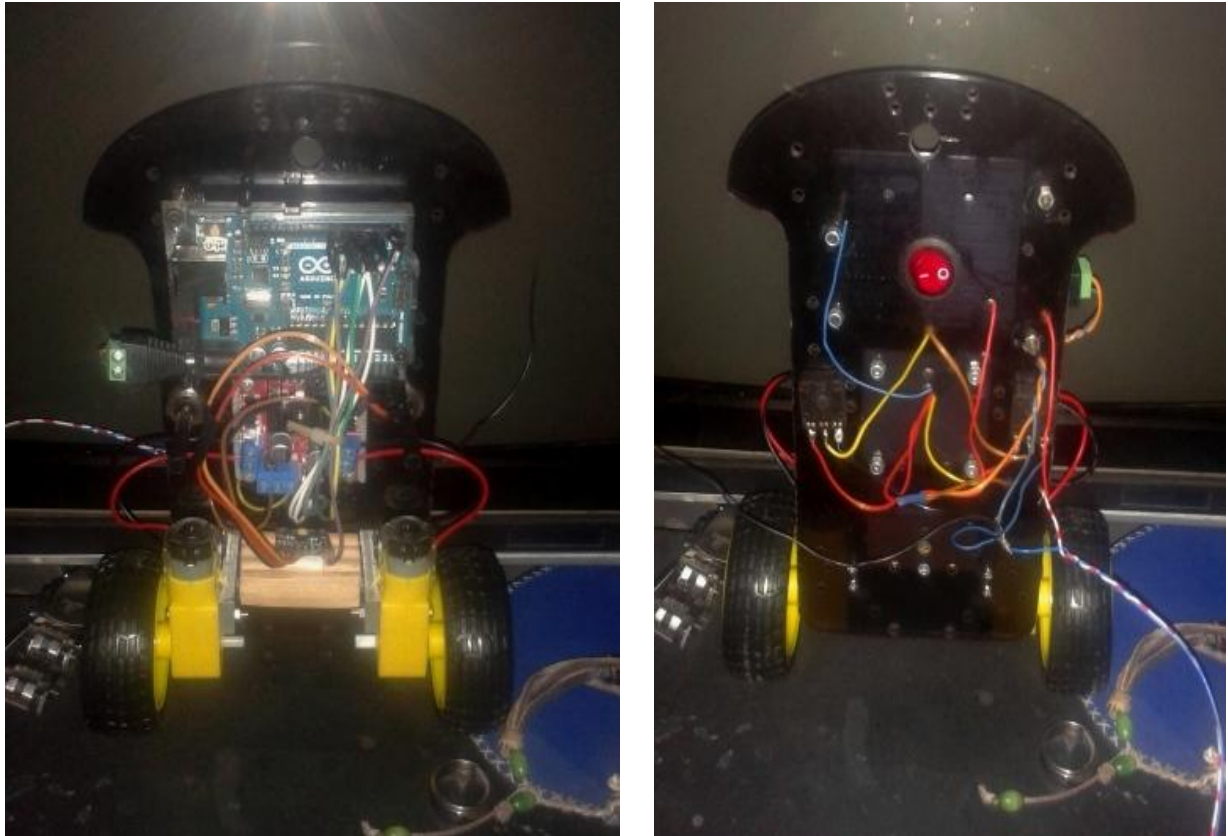


Figure 4.20 – Les deux faces de robot pendule inversé réalisé

❖ Alimentation

Comme tout système mobile ou embarqué, le Robot comporte un système de régulation pour sa tension d'entrée. Il peut ainsi être alimenté via n'importe quelle source d'alimentation en courant continu avec une tension comprise entre 9V et 18V.

❖ La partie logicielle

Arduino est le logiciel de programmation de notre robot pendule inversé.

La figure suivante (figure 4.21) représente la 1^{ère} fenêtre qui s'affiche quand on ouvre le logiciel Arduino.

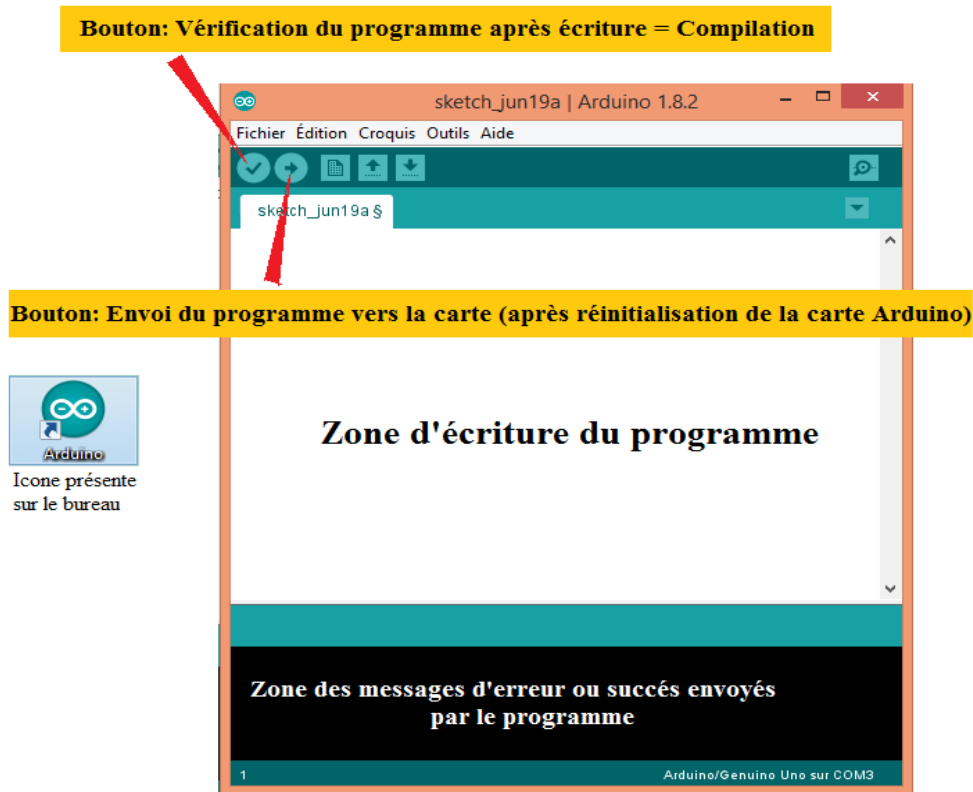


Figure 4.21 – Explication de la 1^{ère} fenêtre du logiciel Arduino

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.

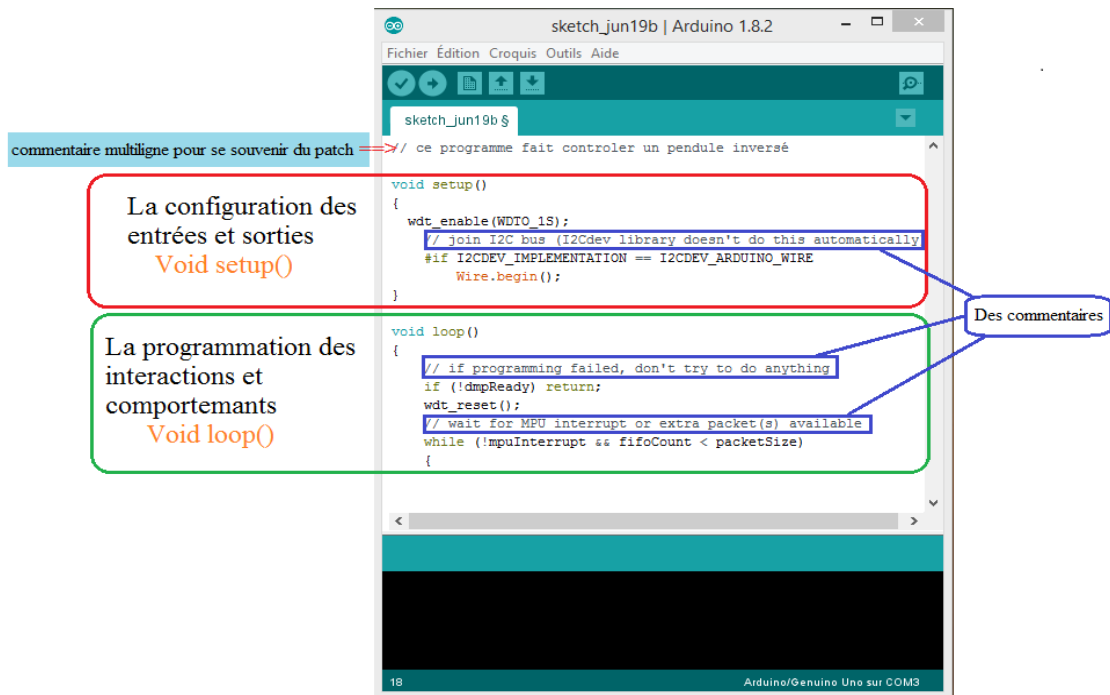


Figure 4.22 – Structure d'un programme (Sketch) Arduino

Une fois la dernière ligne exécutée, la carte revient au début de la troisième phase et recommence sa lecture et son exécution des instructions successives. Et ainsi de suite.

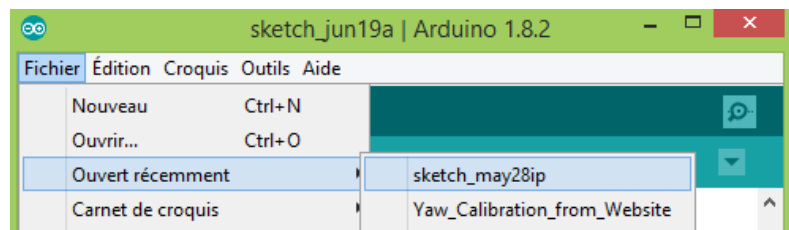
Cette boucle se déroule des milliers de fois par seconde et anime la carte.

✓ **Exemple de remplissage d'un sketch dans la carte Arduino.**

Etape 1 : Ouvrir le logiciel Arduino



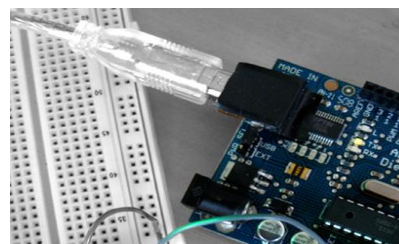
Etape 2 : Ouvrir le fichier du programme (déjà écrit) qui fait contrôler le robot



Etape 3 : Compiler le programme



Etape 4 : Si il n'ya pas d'erreurs, brancher la carte Arduino avec la cordon USB



Etape 5 : Charger le programme dans la carte Arduino



✓ Lexique de terme anglais

IS : Est (souvent dans le sens d'une question : Est ?).

INT : Abréviatiion pour INTeger, entier. Groupe de 16 bits, 2 octets groupés, considérés comme représentant un nombre entier négatif ou positif.

LONG : Abréviatiion pour "entier long". Groupe de 32 bits, 4 octets groupés, considérés comme représentant un nombre entier négatif ou positif.

LOOP : Boucle.

LOW : Bas.

OUT : Souvent l'abréviatiion pour OUTput, Sortie. Est toujours en rapport avec le sens carte Arduino vers extérieur.

OUTPUT : Sortie.

PIN : Broche.

POWER : Puissance, alimentation.

PWM : Abréviatiion de (Pulse WidthModulation), soit Modulation en Largeur d'Impulsion.

PWR : Abréviatiion pour PoWeR, puissance, alimentation.

READ: Lire.

RESISTOR: résistance.

RELAY: relais.

RX : Abréviatiion pour Receive, réception.

SERIAL : Série.

SETUP : Initialisation.

SENSOR: capteur

SWITCH :basculer, interrupteur.

TX: Abréviatiion pour Transmit, transmission.

WIRE: câble, fil.

IV.4 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.

Le volet logiciel pourrait être encore plus optimisé et complété par une solution logicielle sur ordinateur qui ferait du Robot une véritable plateforme d'essai et d'étude d'un robot à pendule inversée.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce projet a réussi à atteindre ses objectifs d'équilibrer un robot à deux roues autonome basé sur le modèle du pendule inversé. Deux stratégies de contrôle ont été mises en œuvre pour résoudre le problème de contrôle de l'équilibre pour le système. Les matrices de gain obtenues à partir de la simulation pour PID et LQR, les deux contrôleurs ont montré des résultats prometteurs dans l'équilibre du robot. Pendant le test, le robot est capable de maintenir sa position verticale en ajustant légèrement ses roues. Deux contrôleurs comme PID et LQR sont conçus avec succès. Basé sur les résultats et l'analyse, une conclusion a été faite que les deux méthodes de contrôle, moderne de contrôleur (LQR) et le contrôleur classique (PID) sont capables de contrôler les deux non-linéaires équilibrage des roues position du robot angulaires et linéaires. Tous les contrôleurs de succès conçus ont été comparés.

D'après la littérature nous arrivons à comprendre que le contrôleur LQR a de meilleures performances par rapport à régulateur PID dans le contrôle du système d'équilibrage non linéaire du robot.

Le régulateur PID doit être amélioré afin que le dépassement maximale et sous shooting pour décantation pour les positions linéaires et angulaires n'ont pas très haute gamme tel que requis par les critères de conception.

De l'autre côté, le contrôleur LQR peut être amélioré de sorte qu'il est temps de décantation pour la position angulaire peut être réduite plus rapidement que le régulateur PID.

Les règles Zeigler-Nichols de réglage utilisés pour le régulateur PID sont simples et intuitive car elles nécessitent la connaissance des processus peu et peut être appliqué avec un effort modeste. Cependant, pour une opération précise et robuste, la dynamique de contrôle de trajectoire serait calquée pour permettre à un contrôleur adéquat être conçu. Plus de recherches sont nécessaires pour étudier les effets de linéariser la dynamique de la mode du système pour améliorer la stabilité et la robustesse du robot.

Une tentative de contrôle le système en utilisant des méthodes non linéaires est fortement recommandé pour la recherche future.

De cette façon, les mouvements oscillatoire du robot tout en équilibrant peuvent être éliminés, le contrôle de la trajectoire ainsi précise et waypoint de navigation peut être mis en œuvre.

Annexes

Annexes

a) Caractéristiques des différents Arduino

ARDUINO UNO : Dimensions : 53 mm x 68 mm

| | |
|---|--|
| Microcontrôleur | ATmega328 |
| Tension de fonctionnement | 5V |
| Tension d'alimentation (recommandée) | 7-12V |
| Tension d'alimentation (limites) | 6-20V |
| Broches E/S numériques | 14 (dont 6 disposent d'une sortie PWM) |
| Broches d'entrées analogiques | 6 |
| Intensité maxi disponible par broche E/S (5V) | 40 mA |
| Intensité maxi disponible par broche E/S (3.3V) | 50 mA |
| Mémoire Programme Flash | 16 KB (ATmega168) or 32 KB (ATmega328) dont 2 KB sont utilisés par le bootloader |
| Mémoire SRAM (mémoire volatile) | 1 KB (ATmega168) Ou 2 KB (ATmega328) |
| Mémoire EEPROM (mémoire non volatile) | 512 bytes (ATmega168) Ou 1 KB (ATmega328) |
| Vitesse d'horloge | 16 MHz |

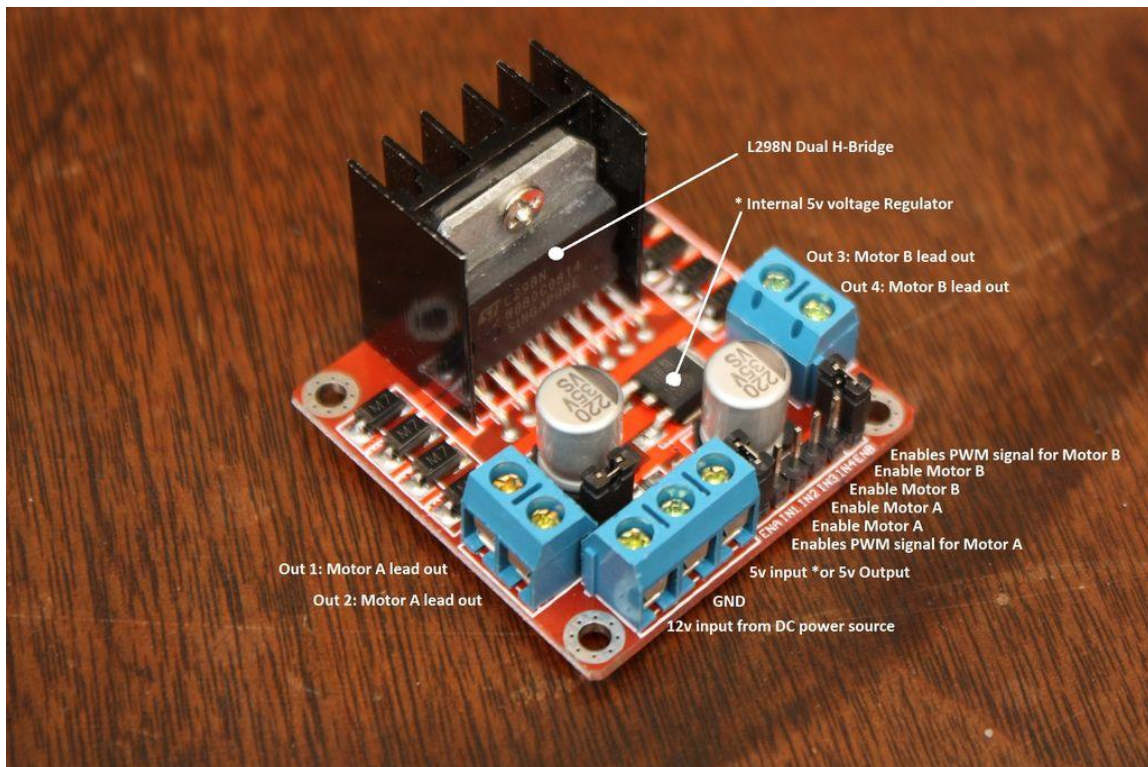
b) Datasheet moteur (Pololu Plastic Gear)

| | |
|-------------------------|---------------------|
| Dimensions Size: | 64.4 x 22.3 x 21 mm |
| Weight: | 32 g |
| Shaft diameter: | 3mm |

Spécification Générale :

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| Typical operating voltage: | 6 V |
| Gear ratio: | 200:1 |
| Free-run speed at 6V: | 51 rpm |
| Free-run current at 6V: | 70 mA |
| Stall current at 6V: | 800 mA |
| Stall torque at 6V: | 100 oz·in |

c) Pont H (L298N)



- Wide Supply-Voltage Range: 4.5 V to 36 V
- Separate Input-Logic Supply
- Internal ESD Protection
- Thermal Shutdown
- High-Noise-Immunity Inputs
- Functional Replacements by SGS
- Output Current 2 A Per Channel
- Peak Output Current 4 A Per Channel

d) MPU 6050:

IMU capteurs se composent généralement de deux ou plusieurs parties. Par priorité, ils sont: accéléromètre, gyroscope, magnétomètre et un altimètre. Le MPU 6050 est un 6 DOF (degrés de liberté) ou un capteur d'IMU six axes, ce qui signifie qu'il donne six valeurs en tant que sortie. Trois valeurs de l'accéléromètre et trois valeurs du gyroscope. Le MPU 6050 est un capteur basé sur

Annexes

la technologie MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) technologie. Tant l'accéléromètre et le gyroscope est intégré dans une seule puce.

➤ Le fonctionnement d'un accéléromètre

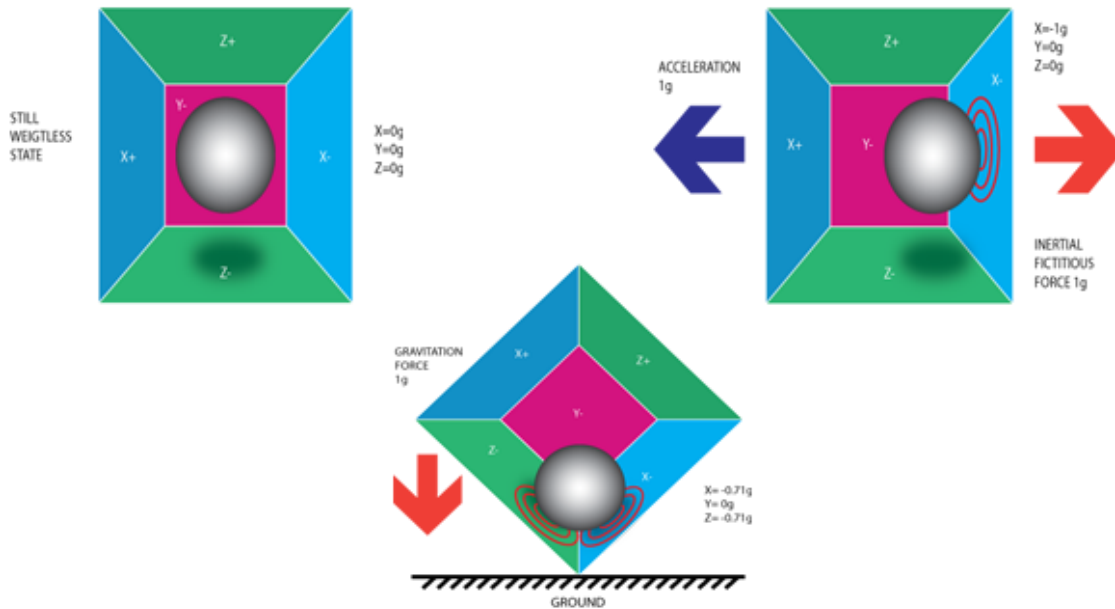


Figure 1: Accéléromètre Piezo Electric

Un accéléromètre fonctionne sur le principe de l'effet piézo-électrique. Ici, imaginez une boîte parallélépipédique, ayant une petite boule à l'intérieur, comme dans l'image ci-dessus. Les murs de cette boîte sont fabriqués avec des cristaux piézo électriques. Chaque fois que vous inclinez la boîte, la balle est forcée de se déplacer dans le sens de l'inclinaison, en raison de la gravité. Le mur avec lequel la balle entre en collision, crée minuscules piézo courants électriques. Il y a au total trois paires de parois opposées dans un parallélépipède. Chaque paire correspond à un axe dans l'espace 3D: X, Y et Z axes. En fonction du courant produit à partir des parois piézo électriques, on peut déterminer la direction d'inclinaison et de sa grandeur.

Annexes

➤ Le fonctionnement d'un gyroscope

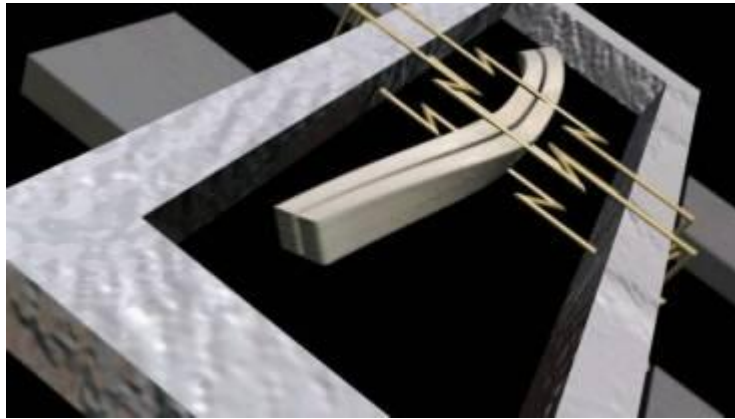


Figure 2: Gyroscope Piezo Electric

Gyroscopes fonctionnent sur le principe de l'accélération de Coriolis. Imaginez qu'il y a une fourchette, comme la structure, qui est en mouvement constant de va-et-vient. Maintenu en place à l'aide de cristaux piézo électriques. Chaque fois, vous essayez de basculer cet arrangement, les cristaux subissent une force dans le sens de l'inclinaison. Ceci est causé en raison de l'inertie de la fourche mobile. Les cristaux produisent ainsi un courant dans un consensus avec l'effet piézo-électrique, et ce courant est amplifié. Les valeurs sont ensuite affinées par le microcontrôleur.

e) Connexion à la carte Arduino :

Le MPU 6050 communique avec l'Arduino via le protocole I2C. Le MPU 6050 est connecté à Arduino comme indiqué dans le schéma suivant. Ici, si votre module MPU 6050 a une broche de 5V, alors vous pouvez le connecter à 5V la broche de votre Arduino. Sinon, vous devrez le connecter à la broche de 3.3V. Ensuite, la GND de l'arduino est reliée à la GND du MPU 6050.

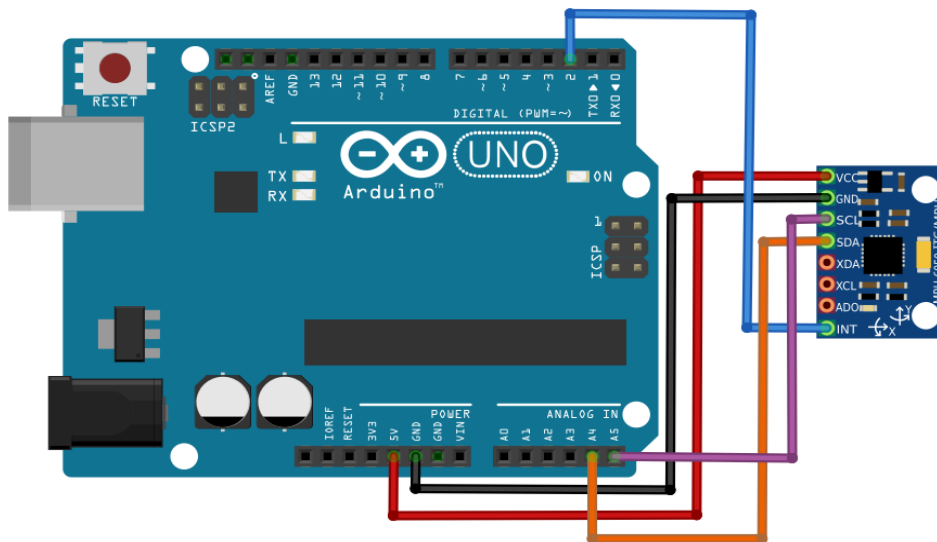


Figure 3 : connexion Arduino MPU 6050

Annexes

f) schéma de simulation avec MATLAB/SIMULINK

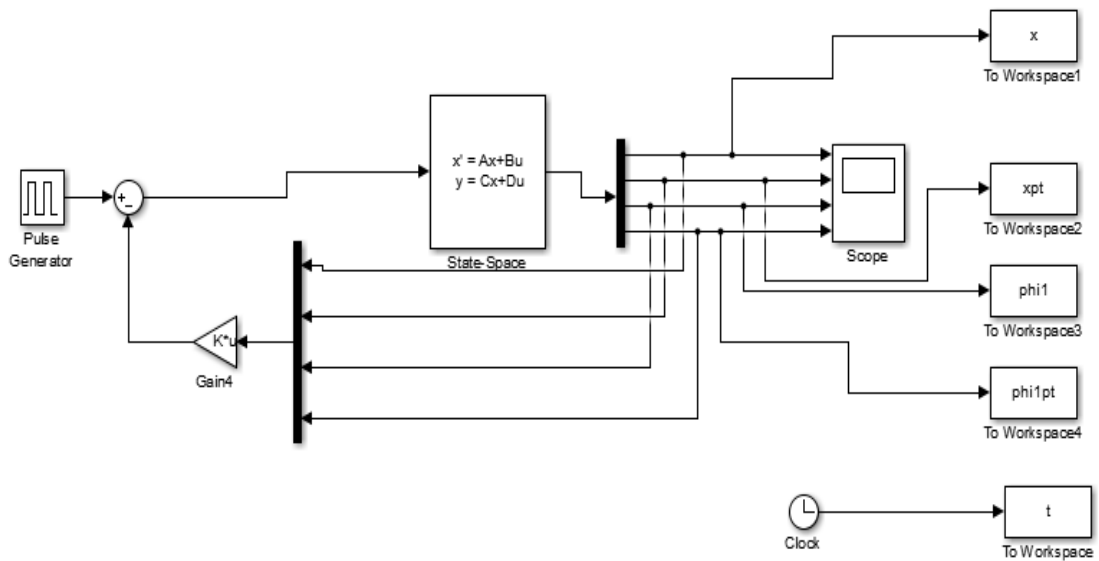


Figure 4: Schéma de simulation de la commande par placement des pôles et la commande LQR

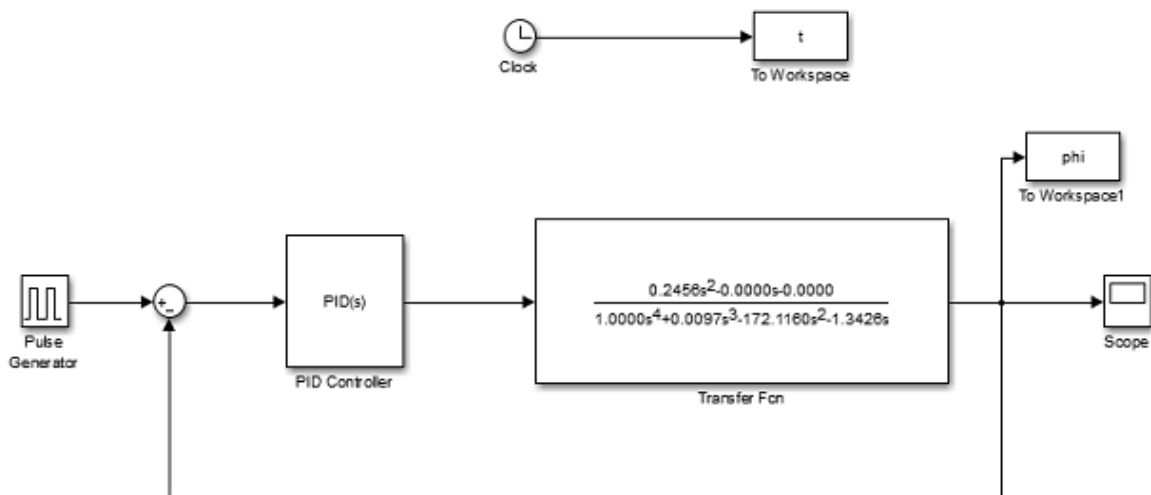


Figure 5 : Régulation du lange d'inclinaison par un PID

Bibliographie

- [1] J-L. BOIMOND, « *Cours robotique* ». ISTIA, Université Angers.
- [2] Découvrir & Comprendre L'espace de culture scientifique du CEA.
- [3] GO TRONIC Robotique et composants électroniques.
- [4] Ph. BIDAUD, « *Cours de Modélisation des Systèmes Robotiques* ». Université Pierre et Marie Curie, 2014
- [5] Slide share, classification des robots « JIRA »
- [6] H. R. MEMARBASHI, « *Design and parametric control of co-axes driven two-wheeled balancing robot* ». Mémoire de master en mécatronique, Université de Massey, 2010.
- [7] Z Li - C Yang - L Fan « *Advanced Control of Wheeled Inverted Pendulum Systems* »
- [8] School of Mechanical Engineering Final Year Thesis 2003
«*Balancing a Two-Wheeled Autonomous Robot*» The University of Western Australia
- [9] R. C. Ooi, « Balancing a two-wheeled autonomous robot » University of Western Australia, vol. 3, 2003.
- [10] F. Mudry, « *Ajustage des Paramètres d'un Régulateur PID* ». Ecole d'ingénieurs de Canton de Vaud, 2006.
- [11] H. Merab et Boulouiha, « *notes de cours : techniques de commande avancée* ». Centre universitaire de Rélizane, 2015.
- [12] K. Ogata, « *Modern control engineering* » FIFTH EDITION Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.
- [13] E. Laroche « *Master Images, Robotique et Ingénierie pour le Vivant Parcours Automatique et Robotique* ». Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg 3^{ème} année.

- [14] A. R. Hambley «*Electrical Engineering Principles and Applications*»
SIXTH EDITION Department of Electrical and Computer Engineering
Michigan Technological University.
- [15] https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_%C3%A0_courant_continu
- [16] <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11530>
- [17] M. Lozeau, « *Commande par supervision de systems mécatroniques via internet* »,
Thèse de magister, ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL, 2009.
- [18] <https://fr.wikipedia.org/wiki/gyromètre>
- [19] F.Ferrero les accéléromètres « *électronique pour Arduino* »
- [20] E. Bartmann « *grand livre d'Arduino* » amazon.fr.
- [21] Jean Philippe Muller « *Bleutooth* » Physique appliquée.
- [22] F. LAHOUAZI, mise on œuvre d'une stratégie de commande neuro floue
« Application à un pendule inversé ». Thèse de magister, MOULOUDE MAMMERI, TIZI-
OUZOU, 2011.