

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electronique

Option : Microélectronique et Hyper fréquence

Réf: ...

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

**Etude et conception d'un Robot
marchant**

Présenté par :
HEDDOUCHE Kamel
Soutenu le : 03 Juin 2014

Devant le jury composé de :

<i>Mr KAHOUL Nadhir</i>	<i>M.A.A</i>	<i>Président</i>
<i>Mr HEZABRA Adel</i>	<i>M.A.A</i>	<i>Examineur</i>
<i>Mr RAHMANI Nacer Eddine</i>	<i>M.A.A</i>	<i>Rapporteur</i>

Année universitaire : 2013 / 2014

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electronique

Option : Microélectronique et Hyper fréquence

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :**

MASTER

Thème

**Etude et conception d'un Robot
marchant**

Présenté par :

- HEDDOUCHE Kamel

Avis favorable de l'encadreur :

- RAHMANI Nacer Eddine

Avis favorable du Président du Jury

-KAHOUL Nadhir

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electronique
Option : Microélectronique et Hyper fréquence

Thème

Etude et conception d'un Robot marchant

Proposé par : RAHMANI Nacer Eddine

Dirigé par : RAHMANI Nacer Eddine

Dédicaces

C'est avec une grande émotion, Je dédier ce modeste travail de fin d'étude aux êtres les plus chères;

La prunelle de mes yeux mes parents : Alkhamza et Khalifa

À mes chers grands parents : Messaouda et Mebarek.

À mes chers frères : Hamza et Walid.

À mes oncles maternels : Saïd, Tahar, Farouk, et petit oncle Kada.

À mes tantes ; Hadda ; Rachida, Djamila et Hamida.

Ainsi à mon cousin et frère : Lakhdar et sa famille.

Je dédie aussi à toute la famille Heddouche.

Sans oublier mes chères amies :

Aboud Bekhochâ et Tlyes Barbari.

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

Remerciements

Au terme de ce modeste travail, nous tenons à remercier et glorifier en premier lieu, notre Allah le tout puissant et miséricordieuses pour nous avoir donné la patience et la volonté durant le cursus universitaire.

Mes vifs remerciements vont également à mon promoteur : Rahmani Nacer Eddine ; Qui m'a encadré d'une manière exemplaire, pour son aide, sa patience, son appui et ses conseils tout à la file de cette tâche, qu'il soit assuré de ma reconnaissance et de mes sentiments les plus respectueux.

Mes vifs remerciements vont également à tous les enseignants du département de Génie Electrique.

Nous remercions vivement aussi :

- Mokrani Faisel ingénieur de travaux hydrauliques
- Bekhocha Hamza étudiant à l'université de Blida
- Barbari Ilyes étudiant génie civil à l'université de Biskra
- Wafi Heddouche étudiant gestion d'économie à l'université de Biskra

En fin, je remercie tous ceux qui m'ont apporté de l'aide dans la réalisation de ce modeste travail.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LA ROBOTIQUE

1. INTRODUCTION	2
2. HISTORIQUE.....	3
3. DEFINITION.....	5
3.1 Origine des termes	5
3.2 Définition d'un robot	5
4. TYPES DES ROBOTS	5
4.1 Robots manipulateurs	6
4.1.1 La structure mécanique et la motricité.....	7
4.1.1.1 Les robots sériels.....	7
4.1.1.2 Les robots parallèles	8
4.1.1.3 Deux générations de robots parallèles.....	7
4.1.2 Domaines d'application	9
4.2 Robots mobiles	10
4.2.1 Classification	10
4.2.2 Applications.....	11
4.2.3 Architecture des robots mobiles.....	12
4.2.3.1 La structure mécanique et la motricité	12
4.2.3.1.1 Les mobiles à roués.....	12
4.2.3.1.2 Les mobiles à chenilles	12
4.2.3.1.3 Les mobiles marcheurs	13
4.2.3.1.4 Les robots rampants	13
4.2.3.2 La motricité et l'énergie.....	13
4.2.3.3 Les organes de sécurité	14
4.2.3.4 Traitement des informations et gestion des taches	15
4.2.3.5 La navigation.....	15
4.2.3.6 La modélisation de l'environnement	16
4.2.3.7 La planification de trajectoire	16
5. CONCLUSION	17

CHAPITRE 2

LES ROBOTS MARCHEURS BIPEDES

1. INTRODUCTION	18
2. LA MARCHE BIPEDE HUMAINE.....	18
2.1 Concepts et facteurs de la marche humaine.....	19
2.2 Paramètres de la marche humaine.....	19
2.3 Polygone de sustentation.....	22
2.4 Anthropométrie.....	22
3. LA MARCHE BIPEDE ROBOTIQUE.....	13
3.1 Principes de la marche robotique bipède.....	24
3.2 Degrés de liberté nécessaires à la marche.....	25
4. LES MODES DE LA MARCHE ROBOTIQUE.....	26
4.1 La marche statique	26
4.2 La marche dynamique.....	27
5. QUELQUES EXEMPLES DE CINEMATIQUES DES ARTICULATIONS.....	33
5.1 Cinématique du genou en robotique humanoïde.....	33
5.2 Autres cinématiques intéressantes.....	37
6. Conclusion.....	38

CHAPITRE 3

LA CONCEPTION MECANIQUE DU ROBOT

1. INTRODUCTION	39
2. ÉLÉMENTS DE CONCEPTION DU ROBOT	39
2.1 Éléments de choix de la motorisation.....	39
2.2 Éléments de choix des transmissions.....	40
3. ETUDE DE LA CONCEPTION DU ROBOT.....	41
3.1 Présentation la cinématique du robot bipède	41
3.2 Observations cinématiques.....	42
3.3 Le cycle de marche du robot.....	44
4. LA CONCEPTION 3D DU ROBOT.....	49
4.1 Présentation d'Autodesk 123D Design.....	49
4.2 Conception des pièces.....	50
4.3 L'assemblage.....	51

5. CONCLUSION.....	52
--------------------	----

CHAPITRE 4

LA CONCEPTION ELECTRONIQUE ET INFORMATIQUE DU ROBOT

1. INTRODUCTION	53
2. STRUCTURE GENERALE DU ROBOT.....	53
3. LES ELEMENTS ELECTRONIQUES	54
3.1 Carte alimentation	54
3.1.1 Les régulateurs.....	55
3.2 Commutateur de puissance ULN2803	55
3.3 Les Moteurs pas à pas unipolaire.....	57
3.3.1 Fonctionnement d'un moteur pas à pas	57
3.4 Les capteurs	58
3.4.1 Capteur ultrason FESTO177469	58
3.4.2Capteur Micro Switch	60
3.5 Microcontrôleur :.....	60
3.5.1 L'horloge.....	62
4. STRUCTURE GENERALE DE LA CARTE DE COMMANDE.....	64
4.1 Électronique de commande motrice	64
4.2 Caractéristique et brochage des capteurs.....	67
4.2.1 Brochage de capteur ultrason FESTO177469	67
4.2.2 Brochage de Capteur Micro Switch.....	68
4.2.3 Perspective d'utilisation des capteurs sous le robot.....	69
5. PROGRAMMATION DU PIC16F877	69
5.1 Présentation de l'environnement de travail sous MikroC.....	69
5.1.1 Editeur de code	69
5.1.2 Outils intégrés.....	70
5.2 Les étapes de l'assistant de projet.....	71
5.3 Ecriture du programme.....	73
5.3.1 Choix de l'architecture.....	73
5.4 Affectation des entrées/sorties du robot aux broches du PIC 16F877.....	74
5.5 Description du programme et des fonctions	75
5.5.1 Programme pour commander les moteurs.....	75
5.5.2 Programme de convertisseur analogique/numérique	76
6. CONCLUSION	78

CHAPITRE 5

SIMULATION DE CIRCUIT DE COMMANDE

1. INTRODUCTION.....	79
2. PRESENTATION GENERALE DE PROTEUS ISIS.....	79
2.1 Lancement du module ISIS	79
3. ETAPES DE DEVELOPPEMENT D'UN PROGRAMM.....	81
4 SIMULATION DU PROGRAMME:.....	82
4.1 Teste des périphériques qui entoure le PIC	84
4.1.1 Simulation du capteur ultrason FESTO177469.....	84
4.1.2 Pilotage du moteur pas à pas	85
4.1.3 Visualisation des signaux de commande	86
5. CONCEPTION DE CIRCUITS IMPRIMES.....	89
5.1 Connexion des composants :.....	89
5.2 Circuit imprimée	91
6. L'OUTIL DE VISUALISATION EN 3D	93
7. Conclusion	94
CONCLUSION GENERALE.....	95

Bibliographie

Annexe A : Dessins mécaniques

Annexe B : Feuilles de spécifications des pièces

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : Applications des robots mobiles.....	11
Tableau 3-1 : Correspondance Moteur et Articulation.....	39
Tableau 3-2: Caractéristique des moteurs.....	39
Tableau 3-3: Masse de chaque corps du robot.....	42
Tableau 3-4: la position d'éléments du robot.....	46
Tableau 3-5: Couple nécessaire des moteurs.....	49
Tableau 4-1: l'état de fonctionnement du circuit ULN2803.....	56
Tableau 4-2 : Cycle de rotation du moteur pas à pas.....	64
Tableau 5-1 : les états successifs des différentes étapes d'un cycle.....	87

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Structure générale d'un robot industriel.....	6
Figure 1-2 : Le robot IRB 7600-150 (ABB, photo et graphe d'agencement).....	7
Figure 1-3 : Le robot Hexamove-System.....	8
Figure 1-4 : Le robot FlexPicker (ABB).....	9
Figure 1-5 : Architecture d'un robot mobile.....	12
Figure 1-6 : Synoptique de la sécurité.....	14
Figure 1-7 : Navigation de robot mobile en environnement encombré.....	16
Figure 2-1 : Décomposition d'un cycle de marche humain.....	20
Figure. 2-2 : Plans principaux dans lesquels les mouvements prennent lieu.....	21
Figure. 2-3 : Débattement du centre de gravité pendant la marche.....	22
Figure 2-4 : Polygone de sustentation.....	22
Figure 2-5 : Longueurs des segments du corps exprimées en fraction de la hauteur H.....	23
Figure 2-6 : Structure simple d'un robot bipède.....	23
Figure 2-7 : Séquence des phases dans la marche.....	25
Figure 2-8 : Séquence des phases dans la course.....	25
Figure 2-9 : Marche statique quadrupède.....	26
Figure 2-10: Marche statique bipède, vue de dessus	27
Figure 2-11 : Marche statique bipède (vue dans le plan sagittal).....	27
Figure 2-12 : Marche dynamique bipède.....	28
Figure 2-13 : Présentation du robot construit par Collins et Ruina. citeRuina2005.....	29
Figure 2-14: Robot Asiatique :	30
Figure 2-15 : Robot Américain	31
Figure 2-16 : Robot Européen.....	32
Figure 2-17 : Mouvement de roulement combiné avec du glissement du fémur sur le tibia.....	33
Figure 2-18 : Présentation de la cinématique du genou de Dribbel.....	34
Figure 2-19 : Présentation du robot ECCEROBOT.....	35
Figure 2-20 : Présentation la partie locomotrice du robot ECCEROBOT.....	35
Figure 2-21 : Présentation du robot conçu par Gini et a.....	36
Figure 2-22 : Cinématique du genou développé par Hamon et al.....	36
Figure 2-23 : Cinématique des chevilles du robot BIP	37
Figure 2-24 : Cinématique des chevilles du robot LOLA	38
Figure 2-25 : Cinématique des hanches du robot ROBIAN.....	38
Figure 3-1 : Photo de la conception de la liaison des chevilles du robot	40

Figure 3-2: Système de transmission des genoux du robot	40
Figure 3-3 : Degrés de liberté et degrés de liaison du robot.....	41
Figure 3-4: dimensions générales du robot.....	41
Figure 3-5: conception de la patte du robot.....	42
Figure 3-6 : schéma des pattes.....	43
Figure 3-7 : rotation de moteur E2.....	43
Figure 3-8 : rotation de moteur E3.....	44
Figure 3-9 : Séquence des phases du cycle de marche.....	44
Figure 3-10 : Le cycle de marche.....	45
Figure 3-11 : Position initiale ou repos du robot.....	45
Figure 3-12 : Articulations de la cheville.....	47
Figure 3-13 : Articulations du genou et le hanche.....	48
Figure 3-14 : Interface d'Autodesk 123D Design.....	50
Figure 3-15 : Aperçu de la conception des articulations	51
Figure 3-16 : Aperçu définitif du robot.....	52
Figure 4-1 : Structure électrique et électronique du robot.....	54
Figure 4-2 : Schéma de la carte d'alimentation.....	55
Figure 4-3 : Schéma de l'ULN2803	56
Figure 4-4 : Brochage interne du circuit ULN283	56
Figure 4-5 : Présentation d'un Moteur pas à pas.....	57
Figure 4-6 : Schéma électromécanique d'un moteur pas à pas bipolaire.....	58
Figure 4-7 : Schéma interne de capteur FESTO177469	59
Figure 4-8 : Présentation de capteur ultrason FESTO177469	59
Figure 4-9 : Fonctionnement du capteur ultrason.....	59
Figure 4-10 : Présentation de capteur Micro Switch	60
Figure 4-11 : Présentation de PIC16F877.....	61
Figure 4-12 : Brochage du PIC16F877	62
Figure 4-13 : Types d'horloges.....	63
Figure 4-14: brochage de l'horloge de PIC16F877.....	63
Figure 4-15 : Command un moteur pas à pas par ULN2803.....	64
Figure 4-16 : Brochage l'ULN2803 avec 2 moteurs pas à pas.....	65
Figure 4-17 : brochage de la carte mère.....	66
Figure 4-18 : Variation de tension de sortie en fonction de la distance de l'obstacle.....	67

Figure 4-19 : Brochage du module à ultrasons.....	68
Figure 4-20 : Brochage de Capteur Micro Switch.....	68
Figure 4-21 : L'environnement IDE du compilateur MikroC PRO.....	70
Figure 4-22 : étape de l'assistant de projet à MikroC	71
Figure 4-23 : paramètres de l'assistant de projet à MikroC	71
Figure 4-24 : La dernière étape de l'assistant de projet à MikroC.....	72
Figure 4-25 : Fenêtre de command de MikroC.....	72
Figure 4-26 : Algorithme Du programme.....	73
Figure 4-27 : programme de command un moteur pas à pas.....	75
Figure 4-28 : code source C pour détection l'obstacle.....	77
Figure 5-1: Fenêtre d'éditeur de schéma ISIS.....	80
Figure 5-2 : Cheminement de la programmation.....	82
Figure 5-3: Fenêtre de simulation de la carte de commande par ISIS.....	83
Figure 5-4 : Fenêtre de simulation du capteur FESTO177469 par ISIS	84
Figure 5-5 : converti le signal analogique de 0.4Vvers un code numérique par ISIS.....	85
Figure 5-6 : Fenêtre de simulation de moteur 6 par « ISIS ».....	86
Figure 5-7 : chronogrammes des signaux de sorties qui commande le moteur 6.....	86
Figure 5-8: Fenêtre de simulation des signaux de commande « ISIS ».....	87
Figure 5-9 : Chronogrammes des signaux de sorties qui commande les moteur.....	88
Figure 5-10 : fenêtre schématique de ARES.....	89
Figure 5-11 : fenêtre schématique de circuit imprimé sous ARES.....	90
Figure 5-12 : fenêtre d'édit trace.....	90
Figure 5-13: Côté piste miroité de la carte mère.....	91
Figure 5-14 : Côté composants de la carte mère.....	91
Figure 5-15 : Côté piste normal de la carte mère.....	92
Figure 5-16 : Côté piste normal de la carte d'alimentation.....	92
Figure 5-17 : Côté composants de la carte d'alimentation.....	92
Figure 5-18 : Fenêtre SCHEMATIC sur ARES avec visualisation 3D.....	93

LISTE DES ABREVIATIONS

R.U.R : Rossums Universal Robots

UGV : Usinage grande vitesse

DDL : Degré de liberté.

CdM : Centre de masse ;

SS : Simple support

DS : Double support

ZMP : Zéro Moment Point (ZMP) ;

RAM : Random Access Memory

RISC : Reduced instruction set computer

EEProm : Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory

CLK : Clock

PWM : Pulse Width Modulation

USART : Universal Synchronous/Asynchronous Receiver Transmitter

I2C : Inter Integrated Circuit

CAN : Convertisseur Analogique Numérique

RESUME

Ce travail traite de différentes techniques pour la conception, la synthèse de la marche et la commande de robots marcheurs bipèdes. Des données générales sur la marche humaine sont accompagnées d'une brève présentation des réalisations actuelles de robots bipèdes et de leurs applications. L'étude est centrée sur la décomposition d'un cycle de marche en différentes phases et le traitement des interactions pieds-sol. La conception d'un robot marcheur est vue à travers sa répartition de masse et le choix de ses composants technologiques.

ملخص

يتناول هذا العمل مختلف تقنيات التصميم والتركيب والتحكم في مشي الروبوتات ذوات القدمين بالإضافة إلى معلومات عامة عن طريقة مشي الإنسان وأمثلة حول بعض الروبوتات ذوات القدمين المصنعة حالياً وتطبيقاتها. ويتركز هذا العمل على تحليل طريقة المشي في مراحل مختلفة وردود الفعل للقدم فوق سطح الأرض. و يتم تصميم الروبوت من خلال هندسته الميكانيكية و توزيع الثقل عبر هيكله و الاختيار الأمثل لمكوناته الميكانيكية والالكترونية والبرمجية اللازمة للتحكم فيه.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La locomotion est l'une des caractéristiques principales de l'activité humaine. Le type de locomotion utilisé pour un système robotique conditionne fortement les différentes tâches qu'il peut accomplir.

Parmi l'ensemble des robots mobiles, deux grandes classes de systèmes sont à distinguer : les systèmes à roues ou à chenilles, qui possèdent un contact permanent ou quasi-permanent avec le sol, la deuxième catégorie de robot, dites marcheurs, qui possèdent la caractéristique de pouvoir choisir la position des appuis et de rejeter des points de sustentation impropres à la locomotion.

De plus, l'utilisation de pattes permet une régulation active de la position et de l'orientation de la plate-forme et cela quelles que soient les irrégularités du sol. C'est pour ces raisons que de nombreux chercheurs s'intéressent depuis plusieurs années à la locomotion au moyen de pattes.

Afin de concevoir un robot marcheur, on doit faire appel à une grande diversité de compétences. Les quatre grandes disciplines présentes dans l'élaboration d'une structure robotique sont la mécanique, l'automatique, l'informatique et l'électronique.

En comparaison avec les robots quadrupèdes, hexapodes ou octopodes, les robots bipèdes présentent l'intérêt de pouvoir être impliqués dans des recherches en biomécanique. Les expérimentations sur les robots anthropomorphes peuvent participer activement à une meilleure compréhension de la locomotion humaine et de ses pathologies, dans le but à terme, d'aider au diagnostic et à la conception de prothèses et d'orthèses.

Donc notre mémoire est subdivisé en cinq chapitres, nous intéressons dans le premier à la définition de la robotique, avec une présentation générale d'histoire des robots, et le deuxième chapitre s'attache à donner les principes de base du fonctionnement des robots à pattes et plus spécialement les robots bipèdes. Le troisième, s'intéresse à la conception du robot bipède par une approche mécatronique. Nous proposons dans le troisième chapitre la conception électronique des différents éléments de contrôle, la partie software que nous avons développé à l'aide du langage Micro C dédié au microcontrôleur fait l'objet du quatrième chapitre. Nous avons finalisé notre travail par la simulation et le test des différentes composantes de notre système (Hard Software) avec le logiciel de simulation ISIS PROTEUS.

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LA ROBOTIQUE

1.INTRODUCTION

Sans remonter aux premiers concepts de machine remplaçant l'homme dès le XVII^e siècle, la robotique est née dans les années 1950, du croisement des besoins et des disponibilités de nouvelles technologies développées durant la seconde guerre mondiale : l'électronique, l'automatique, l'informatique... Les deux premières orientations de ces machines étaient de répondre aux besoins de l'industrie manufacturière et aux besoins de l'industrie en milieux hostiles à l'homme.

La robotique industrielle a répondu dans un premier temps au besoin de manipuler de manière répétitive et automatique des objets entre les machines de fabrication proprement dite. Ce robot devait donc avoir au minimum un organe de saisie des pièces pouvant suivre des trajectoires programmables. Le robot industriel est maintenant un produit majeur et répandu à plus d'un million d'exemplaires, utilisé dans de nombreuses étapes de fabrication (manipulation, peinture, soudure) ; il est complété maintenant dans le domaine manufacturier par des robots mobiles de transport ou d'assistance (AGV, *picking*, assistance au montage) qui ont beaucoup de points communs avec les robots de service. La robotique est par ailleurs considérée comme un élément clé de la compétitivité des entreprises industrielles, au point de susciter des soutiens publics massifs.

La robotique en milieu hostile répond aux besoins de manipulation d'objets à distance du fait de leur dangerosité (chimie, explosif), de la nocivité du milieu pour l'homme (nucléaire) ou de la difficulté à s'y rendre (espace). Les premières réalisations ont été justifiées et financées par l'industrie nucléaire dans les années 1950 [1]. Ces robots sont des systèmes électromécaniques, téléopérés. Les développements de l'électronique et de l'informatique ont permis d'introduire dans ces équipements l'assistance à l'opérateur sous diverses modalités (retour d'effort, mouvement automatique sur commande de haut niveau) afin d'améliorer la précision, la vitesse d'exécution et d'enrichir les domaines d'application (déminage, lutte contre le terrorisme, intervention post-accident). Depuis une vingtaine d'années, des moyens importants ont été mis en place pour étendre les applications robotiques sur les théâtres d'opérations militaires.

Après la robotique industrielle et la robotique d'intervention, une troisième orientation est apparue avec les progrès en miniaturisation, microélectronique et micromécanique et les nouvelles capacités des systèmes de traitement de l'information et de communication qui ont créé les conditions technologiques favorables au développement de robots mobiles

autonomes ou semi-autonomes pour réaliser des applications de service professionnel et de service personnel à des coûts et tailles raisonnables à moyen terme.

Les progrès en sciences cognitives et ceux réalisés dans la compréhension du vivant, ouvrent également la porte à de nouvelles avancées sur les capacités d'apprentissage et d'intelligence d'entités artificielles, matérielles et à leur introduction dans des environnements en forte interaction avec l'homme. Ces applications de la robotique de service sont très larges car elles peuvent couvrir des domaines très variés du monde professionnel (agriculture, médical, nettoyage...) et du monde grand public (jeux, éducation, tâches domestiques...).

2. HISTORIQUE [2]

La notion de robot, ou d'automate, remonte à l'époque médiévale. Même s'il n'existait pas de terme pour décrire ce que nous appelons aujourd'hui des robots, les gens de cette époque ont tout de même imaginé des mécanismes capables d'exécuter des tâches humaines.

Les automates, ces machines aux formes humaines animées par un mécanisme intérieur, ont été créés pour impressionner les paysans qui fréquentaient les églises et leur inculquer la notion d'« être » suprême.

Le jacquemart illustré ici crée l'illusion du mouvement automatique (non assisté). Les jacquemarts étaient des personnages mécaniques capables de marquer le temps en frappant sur une cloche avec leur hache. Cette technologie étant à peu près inconnue au XIII^e siècle, on imagine facilement l'émerveillement des gens face à de tels automates.

Au XVIII^e siècle, les automates miniatures sont devenus des jouets populaires chez les gens très riches. Ces figurines étaient à l'image d'humains ou de petits animaux et imitaient leurs mouvements.

La jolie musicienne que voici a été fabriquée vers 1890. Elle peut tourner la tête d'un côté puis de l'autre, jouer de son instrument tout en battant la mesure avec le pied.

Une multitude de récits littéraires témoignent de la fascination qu'exerce sur nous la création d'une forme de vie artificielle.

En 1818, Mary Shelly a écrit Frankenstein, un récit qui relate la fabrication d'une créature d'apparence humaine. Le robot imaginé par cette auteure ressemblait à un homme,

mais fonctionnait comme une machine. Il était composé d'éléments aux formes humaines maintenus ensemble à l'aide de boulons et d'écrous. On remarquera qu'il y a même des pinces pour retenir ensemble les parties de sa tête. Selon Shelly, un robot devait être plus costaud que la moyenne d'entre nous et être doté d'une force surhumaine.

En 1921, Karel Capek, un dramaturge tchèque, a imaginé un personnage créé artificiellement et doté d'intelligence, auquel il a donné le nom de « robot ». Ce mot, qui signifie « travail forcé » en tchèque, est graduellement entré tel quel dans la langue française. Même s'il a été créé cent ans après la publication du roman Frankenstein de Shelly, le robot de Capek a lui aussi des formes humaines. Le robot illustré ci-contre semble beaucoup plus rigide et mécanique que la dame lui faisant face.

Même si le concept de robot trouve son origine dans une époque très lointaine, il a fallu attendre les années 1940 et l'arrivée des ordinateurs pour que les robots des temps modernes fassent leur apparition.

Le terme « robotique » se rapporte à l'étude et à l'utilisation des robots. Il remonte à 1941. Il a tout d'abord été utilisé par le chercheur et écrivain Isaac Asimov. C'est dans un chapitre intitulé Cycle fermé qu'il a proposé les « lois de la robotique » suivantes :

- **Première loi** : Un robot ne peut porter atteinte à un être humain ni, restant passif, laisser cet être humain exposé au danger.
- **Deuxième loi** : Un robot doit obéir aux ordres donnés par les êtres humains, sauf si de tels ordres sont en contradiction avec la première loi.
- **Troisième loi** : Un robot doit protéger son existence dans la mesure où cette protection n'est pas en contradiction avec la première ou la deuxième loi.

3. DEFINITION**3.1 Origine des termes [3]**

Robot a été utilisé pour la première fois en 1921 par Karel Capek dans sa pièce R.U.R. (Rossums Universal Robots).

Il provient du tchèque "robota" qui signifie corvée, travail obligatoire

Le terme robotique a été employé pour la première fois par Asimov en 1941.

3.2 Définition d'un robot [4]

Le Petit Larousse définit un robot comme étant un appareil automatique capable de manipuler des objets, ou d'exécuter des opérations selon un programme fixe ou modifiable. En fait, l'image que chacun se fait d'un robot est généralement vague, souvent un robot est défini comme un manipulateur automatique à cycles programmables.

Pour « mériter » le nom de robot, un système doit posséder une certaine flexibilité, caractérisée par les propriétés suivantes :

- La versatilité : Un robot doit avoir la capacité de pouvoir exécuter une variété de tâches, ou la même tâche de différente manière ;
- L'auto-adaptativité : Un robot doit pouvoir s'adapter à un environnement changeant au cours de l'exécution de ses tâches.

L'Association Française de Normalisation (A.F.N.O.R.) définit un robot comme étant un système mécanique de type manipulateur commandé en position, reprogrammable, polyvalent (i.e., à usages multiples), à plusieurs degrés de liberté, capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils et des dispositifs spécialisés, au cours de mouvements variables et programmés pour l'exécution d'une variété de tâches. Il a souvent l'apparence d'un, ou plusieurs, bras se terminant par un poignet. Son unité de commande utilise, notamment, un dispositif de mémoire et éventuellement de perception et d'adaptation à l'environnement et aux circonstances. Ces machines polyvalentes sont généralement étudiées pour effectuer la même fonction de façon cyclique et peuvent être adaptées à d'autres fonctions sans modification permanente du matériel.

4. TYPES DES ROBOTS

Au cours de l'histoire, 2 types différents de robots sont apparus attestant chacun de nouvelles évolutions : Robots manipulateurs et Robots mobiles.

4.1 Robots manipulateurs [18]

Un robot manipulateur, quelle que soit la fonction qui lui est attribuée (transfert d'objet, soudage, assemblage), est un mécanisme capable de déplacer et de situer un objet appelé « organe terminal » ou « point outil » dans une partie de l'espace appelé « volume de travail ».

Un robot industriel est un manipulateur à plusieurs degrés de liberté contrôlé automatiquement, reprogrammable et multitâche qui peut être fixe ou mobile pour une application en automatisation industrielle.

Le robot industriel se compose d'une structure mécanique animée par des actionneurs, à partir d'ordres élaborés par un ordinateur. Ces ordres dépendent des informations délivrées par les capteurs. L'utilisation de capteurs externes, capteurs " extéroceptifs", pour évaluer et mesurer l'interaction du robot avec l'environnement directement depuis son organe terminal devient une pratique de plus en plus courante dans les applications robotiques de haute précision.

Nous pouvons déjà distinguer d'après la figure 1-1, les deux types de coordonnées que l'on rencontre au niveau d'un robot. Il s'agit des coordonnées articulaires ou coordonnées généralisées qui décrivent la configuration du robot (position des articulations motrices) et des coordonnées opérationnelles ou coordonnées de la tâche, qui définissent la position et l'orientation de l'effecteur dans le repère de la tâche propre à l'homme. Les modèles géométriques direct et inverse permettent de passer d'un système de coordonnées à l'autre.

L'architecture mécanique est la structure qui relie la base du robot à son effecteur. Elle est constituée de segments connectés entre eux par des articulations passives ou actives, selon qu'elles sont motorisées ou non.

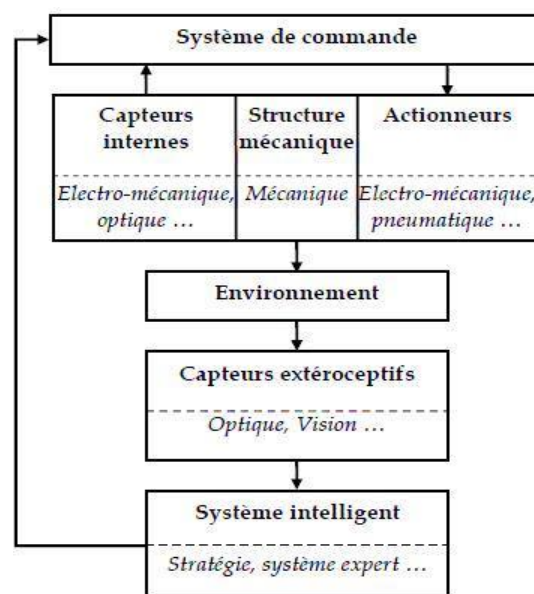


Figure 1-1 : Structure générale d'un robot industriel. [18]

4.1.1 La structure mécanique et la motricité

On peut dénombrer deux types de structures mécaniques assurant la motricité :

4.1.1.1 Les robots sériels**Définition :**

La plupart des robots industriels construits à ce jour est de type sériel, c'est-à-dire que leur structure mobile est une chaîne ouverte formée d'une succession de segments reliés entre eux par des liaisons à un degré de liberté. Chaque articulation est commandée par un actionneur situé à l'endroit de l'articulation ou sur un des segments précédents. (Figure 1-2).



Figure 1-2 : *Le robot IRB 7600-150).*

Les robots séries possèdent l'avantage de disposer d'un grand volume de travail et d'être relativement simples sur le plan des calculs liés à leur commande. Leurs principaux inconvénients sont les suivants :

- ✓ Inertie élevée à cause de la répartition des masses sur toute la chaîne cinématique (actionneurs, organes de transmission),
- ✓ Manque de rigidité par la mise en série d'éléments élastiques, fatigue et usure des liaisons de puissance assurant l'alimentation des actionneurs (câbles, tuyaux flexibles),
- ✓ Fatigue et usure des liaisons assurant la circulation des informations entre les capteurs et la commande, ce point est très important lorsqu'il s'agit de sûreté de fonctionnement, puisqu'une erreur de transmission peut avoir des conséquences néfastes sur les mouvements du robot.

4.1.1.2 Les robots parallèles

Pour certaines applications industrielles telles que l'usinage grand vitesse (UGV) ou la manutention est rapide, les manipulateurs à cinématique sérielle ne semblent plus être les mieux adaptés. En effet, ce type d'architecture implique que chaque axe motorisé supporte le suivant. Les masses en mouvement sont donc élevées, ce qui pénalise les performances dynamiques.

C'est pourquoi, les manipulateurs à cinématique parallèle sont aujourd'hui de plus en plus utilisés. Leurs performances dynamiques élevées ainsi que leurs capacités de charge importantes sont avantageusement mises à profit dans le monde industriel, ce qui fait des robots parallèles des robots industriels par excellence.

Définition : Un manipulateur parallèle est un mécanisme en chaîne cinématique fermée, dont l'organe terminal est relié à la base par plusieurs chaînes cinématiques indépendantes, par exemple la figure I-3.



Figure 1-3 : *Le robot Hexamove-System [18].*

Les robots parallèles seront présentés comme étant une solution aux limitations des robots sériels.

4.1.1.3 Deux générations de robots parallèles

Il existe de nombreux historiques concernant les robots parallèles tels ceux de Bonevou Merlet qui précisent leurs véritables origines. Nous souhaitons seulement insister sur l'existence de deux générations essentielles de robot parallèle :

- ✓ La première génération incarnée par les plates-formes de Goughet Stewart. On parle aujourd'hui de robots hexapodes : 6 vérins relient le bâti à une plate-forme mobile, rendant possible l'exécution de mouvements complexes par la mise en parallèle des chaînes cinématiques,

- ✓ La deuxième génération incarnée par la structure Delta de Clavel: les robots de cette famille sont capables de performances exceptionnelles (vitesses jusqu'à 10 m/s et accélération jusqu'à 20 G). On parle dès lors de robots parallèles légers avec pour principales caractéristiques :

- des actionneurs fixes sur le bâti,
- des composants mobiles légers (Figure 1-4).



Figure 1-4 : Le robot FlexPicker (ABB).

4.1.2 Domaines d'application [5]

La robotique est un domaine en plein essor depuis quelques années. Les évolutions technologiques, dépassant sans cesse nos espérances, permettent maintenant de réaliser des solutions technologiques s'adaptant au moindre problème.

Par conséquent, la robotique est utilisée dans des domaines extrêmement rigoureux et exigeants. Nous allons explorer ces différents domaines.

✓ **L'industrie.**

Le but premier des robots est de remplacer l'homme dans des activités fastidieuses ou onéreuses pour l'employeur. Les robots ont donc commencé à être utilisés dans les chaînes d'assemblage industrielles. Dans ces chaînes d'assemblage, on retrouve des robots soudeurs, manipulateurs, peintres ...

✓ **Le domaine militaire.**

Les robots sont de plus en plus utilisés dans le domaine militaire. En effet, la miniaturisation permet aujourd'hui de créer des robots discrets mais dotés de nombreux capteurs, ce qui est idéal pour des missions d'espionnage ou d'éclairage.

✓ La santé.

Les robots commencent à être de plus en plus utilisés dans le domaine médical, qu'il s'agisse de « simples » échographies ou d'opérations chirurgicales plus délicates. En fait ces robots ne sont pas complètement autonomes mais ils assistent les médecins ou chirurgiens, jusqu'à permettre des opérations médicales à distance (télémédecine). On parle de chirurgie (mot né de l'anglais « surgery » : chirurgie) c'est-à-dire tout ce qui consiste à introduire les derniers outils des technologies informatiques et robotiques dans la pratique médico-chirurgicale. Cette pratique de « chirurgie assistée » est émergente donc bien que peu répandue, elle est en phase de devenir la chirurgie du futur.

4.2 Robots mobiles [6]

Les robots mobiles ont une place particulière en robotique. Leur intérêt réside dans leur mobilité qui ouvre des applications dans de nombreux domaines. Comme les robots manipulateurs, ils sont destinés à assister l'homme dans les tâches pénibles (transport de charges lourdes), monotones ou en ambiance hostile (nucléaire, marine, spatiale, lutte contre l'incendie, surveillance...).

L'aspect particulier de la mobilité impose une complexité technologique et méthodologique qui s'ajoute en général aux problèmes rencontrés par les robots manipulateurs. La résolution de ces problèmes passe par l'emploi de toutes les ressources disponibles tant au niveau technologique (capteurs, motricité, énergie) qu'à celui du traitement des informations par l'utilisation des techniques de l'intelligence artificielle ou de processeurs particuliers (vectoriel, cellulaires).

L'autonomie du robot mobile est une faculté qui lui permet de s'adapter ou de prendre une décision dans le but de réaliser une tâche malgré un manque d'informations préliminaires ou éventuellement erronées. Dans d'autres cas d'utilisation, comme celui des véhicules d'exploration de planètes, l'autonomie est un point fondamental puisque la télécommande est alors impossible par le fait de la durée du temps de transmission des informations.

4.2.1 Classification

Une classification est proposée dans la littérature qui définit le degré d'autonomie du robot mobile.

- Véhicule télécommandé par un opérateur qui lui impose chaque tâche élémentaire à réaliser.

- Véhicule télécommandé au sens de la tâche à réaliser. Le véhicule contrôle automatiquement ses actions.
- Véhicule semi-autonome réalisant sans l'aide de l'opérateur des tâches prédéfinies.
- Véhicule autonome qui réalise des tâches semi-définies. Ce type de véhicule pose des problèmes d'un niveau de complexité élevé de représentation des connaissances, de capacité décisionnelle et de génération de plans qui sont résolus à bord dans la mesure du possible.

L'ensemble des problèmes particuliers liés à la conception de tels robots sont :

- La conception mécanique liée à la mobilité
- La détermination de la position et de la latitude (orientation)
- La détermination du chemin optimal pour atteindre le lieu de la tâche.

4.2.2 Applications

Le tableau 1-1 résume de manière non exhaustive les diverses applications des robots mobiles.

Industrie nucléaire	surveillance de sites, manipulation de matériaux radio-actifs, démantèlement de centrales
Sécurité civile	neutralisation d'activité terroriste, déminage, pose d'explosif, surveillance de munitions
Militaire	surveillance, patrouille, pose d'explosifs, manipulation de munitions
Chimique	surveillance de site, manipulation de matériaux toxiques
Médecine	assistance d'urgence, aide aux handicapés physiques, aux aveugles
Lutte contre l'incendie	localisation d'une source d'incendie, détection de fumée, suppression de flammes
Sous-marine	pose de câbles, recherche de nodules, recherche de navires immergés, inspection des fonds marins
Agricole	cueillette de fruits, traite, moisson, traitement des vignes...
Construction BTP	projection mortier, lissage du béton
Nettoyage	coque de navire, nettoyage industriel
Espace	exploration
Industriel	convoyage, surveillance

Tableau 1-1 : Applications des robots mobiles.

4.2.3 Architecture des robots mobiles

L'architecture des robots mobiles se structure en quatre éléments :

- La structure mécanique et la motricité
- Les organes de sécurité
- Le système de traitement des informations et gestion des tâches.
- Le système de localisation

L'architecture des robots mobiles est représentée sur la figure 1-5.

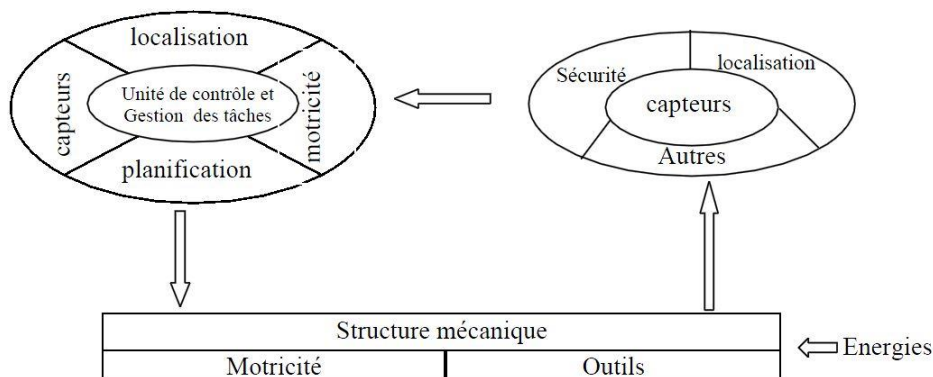


Figure 1-5 : Architecture d'un robot mobile.

4.2.3.1 La structure mécanique et la motricité

On peut dénombrer quatre types de structures mécaniques assurant la motricité.

4.2.3.1.1 Les mobiles à roues

La mobilité par roues est la structure mécanique la plus communément appliquée. Cette technique assure selon l'agencement et les dimensions des roues un déplacement dans toutes les directions avec une accélération et une vitesse importante. Le franchissement d'obstacles ou l'escalade de marches d'escalier est possible dans une certaine mesure. Toutes les configurations (nombre, agencement, fonction) des roues sont appliquées.

4.2.3.1.2 Les mobiles à chenilles

L'utilisation des chenilles présente l'avantage d'une bonne adhérence au sol et d'une faculté de franchissement d'obstacles. L'utilisation est orientée vers l'emploi sur sol accidenté ou de mauvaise qualité au niveau de l'adhérence (présence de boue, herbe...).

4.2.3.1.3 Les mobiles marcheurs

Les robots mobiles marcheurs sont destinés à réaliser des tâches variées dont l'accès au site est difficile, dangereux ou impossible à l'homme. Leur anatomie à nombreux degrés de liberté permet un rapprochement avec les robots manipulateurs. La locomotion est commandée en termes de coordonnées articulaires. Les méthodes de commande des articulations définissent le concept d'allure qui assure le déplacement stable de l'ensemble. Les différentes techniques étudiées se rapprochent de la marche des animaux et notamment de celle des insectes.

L'adaptation au support est un problème spécifique aux marcheurs. Il consiste à choisir le meilleur emplacement de contact en alliant l'avance et la stabilité avec l'aide de capteurs de proximité, de contact ou de vision.

4.2.3.1.4 Les robots rampants

La reptation est une solution de locomotion pour un environnement de type tunnel qui conduit à réaliser des structures filiformes.

Le système est composé d'un ensemble de modules ayant chacun plusieurs mobilités. Les techniques utilisées découlent des méthodes de locomotion des animaux.

- Le type scolopendre constitue une structure inextensible articulée selon deux axes orthogonaux.
- Le type lombric comprend trois articulations, deux rotations orthogonales et une translation dans le sens du mouvement principal.
- Le type péristaltique consiste à réaliser un déplacement relatif d'un module par rapport aux voisins.

4.2.3.2 La motricité et l'énergie

Les déplacements des robots sont réalisés par des moteurs de types électrique, thermique ou hydraulique.

L'énergie électrique la plus fréquemment employée offre l'avantage d'une commande aisée. Par contre le transport et la génération présentent des difficultés. Plusieurs méthodes sont employées :

- Par batteries qui sont soit rechargées périodiquement de manière automatique ou manuelle, soit par un échange avec d'autres lorsqu'elles sont déchargées.

- Par groupe électrogène embarqué dont l'inconvénient constitue la masse élevée. L'énergie de base est alors thermique.
- Par cordon ombilical qui réduit l'autonomie du robot.

L'énergie thermique est essentiellement employée par des véhicules de forte puissance comme énergie de base pour la traction ou pour activer un compresseur hydraulique.

4.2.3.3 Les organes de sécurité

Un robot, selon la tâche qui lui est confiée, peut être amené à travailler au voisinage du personnel. A ce titre, il est obligatoire qu'il soit doté d'organes garantissant la sécurité. Des capteurs sont disponibles tout autour du mobile afin de détecter un obstacle sur un domaine le plus étendu possible. Deux types de capteurs sont employés : les capteurs proximétriques assurant la détection avant collision (ultra-son, hyper fréquence, infrarouge...) et les capteurs de contact détectant une collision ou un choc avec l'environnement (contact électrique sur pare-chocs, résistance variable, fibre optique...). Ce sont des dispositifs redondants par rapport aux capteurs précédents. L'organisation de la sécurité est représentée sur le schéma de la figure 1-6.

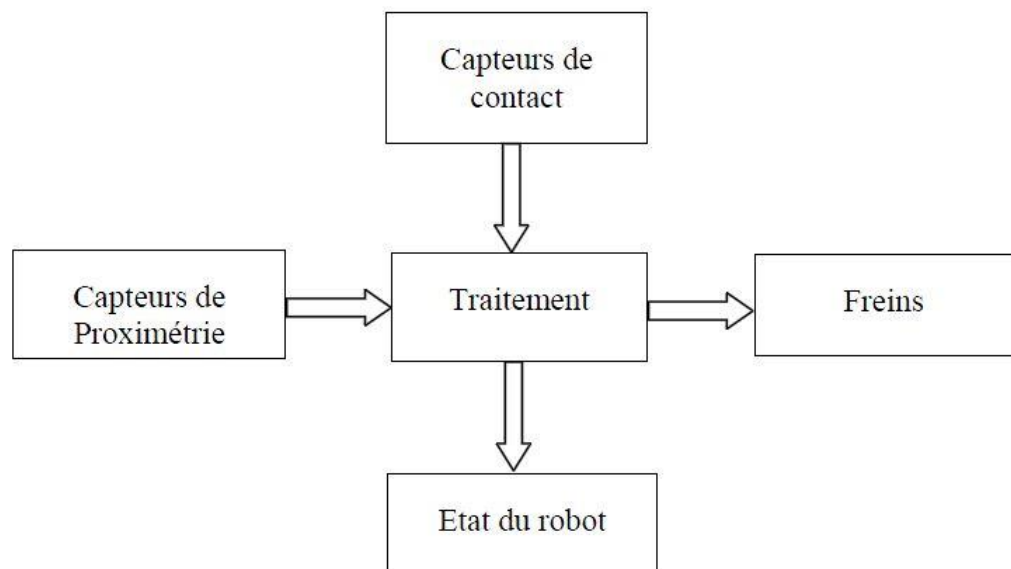


Figure 1-6: *Synoptique de la sécurité.*

Il comporte également un système de vérification permanent de l'état de fonctionnement des autres organes.

Le traitement de la détection s'effectue selon plusieurs cas. Si le capteur à contact est sollicité, le robot s'immobilise soit définitivement soit tant que le contact persiste, ou il effectue un mouvement opposé au contact. Par contre si un proximètre détecte une présence, la stratégie consiste soit à immobiliser le robot en attendant que la personne s'éloigne, soit à ralentir le mouvement si la personne n'est pas trop proche, soit à choisir un autre chemin qui l'éloigne de la personne.

4.2.3.4 Traitement des informations et gestion des taches

L'ensemble de traitement des informations et gestion des tâches constitue le module information central qui établit les commandes permettant au mobile de réaliser un déplacement et d'activer les divers organes en accord avec l'objectif. Nous nous limiterons au problème de génération de plan qui consiste à établir la manière dont le robot se déplace par rapport à des connaissances à priori (statiques) ou obtenues en cours d'évolution (dynamiques).

La génération de plus repose sur trois concepts :

- La stratégie de navigation
- La modélisation de l'espace
- La planification.

4.2.3.5. La navigation

La navigation est une étape très importante en robotique mobile. Bien entreprise, elle permet une large autonomie à un robot mobile. Le système de navigation comporte plusieurs modules qui peuvent être traités différemment et parmi lesquels on distingue celui de la localisation et celui de l'évitement d'obstacles. La détection et l'évitement des obstacles est l'étape fondamentale de l'évolution d'un robot en territoire inconnu. On dispose à cet effet de plusieurs types de capteurs : caméras; un programme d'analyse des images étant alors nécessaire, capteurs laser, capteurs infrarouge et capteurs à ultrasons.

On utilise en général un capteur à ultrasons qui permet de renseigner sur la présence d'un obstacle sur le chemin d'évolution. Une fois les obstacles repérés, le robot peut effectuer plusieurs actions, par exemple : cartographier le site sur lequel il évolue, vérifier si sa distance à l'obstacle est supérieure ou non à une distance limite, et dans le cas contraire, éviter l'obstacle. Un exemple d'évitement d'obstacles est présenté sur la figure 1-7.

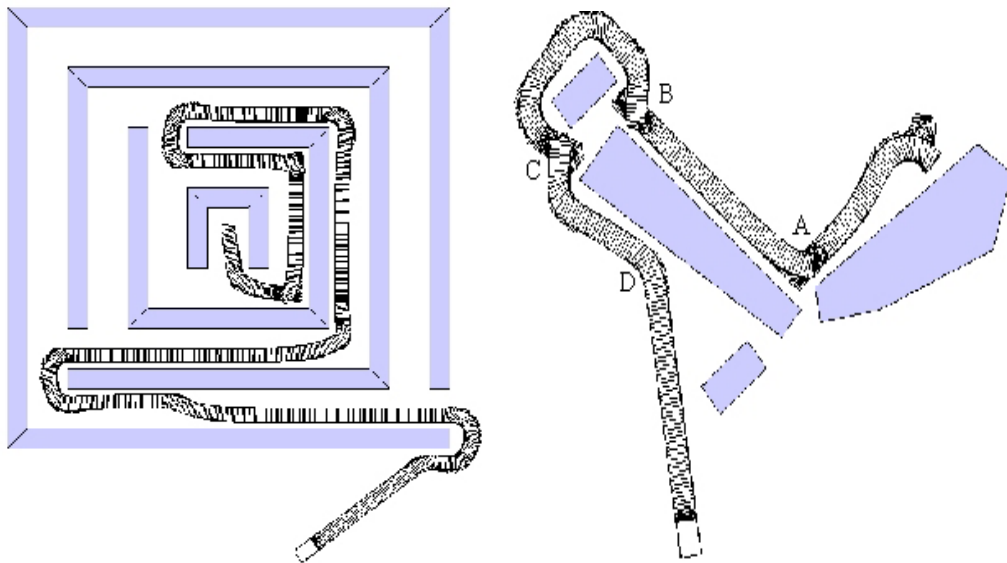


Figure 1-7 : *Navigation de robot mobile en environnement encombré.*

4.2.3.6 La modélisation de l'environnement

La connaissance du milieu dans lequel évolue le robot mobile n'est établie en général qu'après avoir effectué une campagne de mesure de l'ensemble des éléments constituant l'environnement. Cette procédure fastidieuse peut être évitée si le robot construit lui-même son modèle d'environnement de manière dynamique. Par contre, la planification de trajectoire n'est pas utilisable tant que le robot ne dispose pas d'un modèle de l'espace d'évolution ce qui handicape très fortement l'utilisation du robot. A partir de cette base d'informations et d'une loi évaluant les erreurs de représentation, le planificateur peut générer des sous-trajectoires faisables dans certaines parties et modifier les sous-trajectoires dans d'autres parties à l'aide des informations locales issues de la mesure des capteurs d'environnement. Lors de l'exécution d'une trajectoire, le robot acquiert des informations qui vont permettre de reconstituer le plus fidèlement possible le modèle de l'environnement de manière récursive à l'aide d'un algorithme approprié.

4.2.3.7 La planification de trajectoire

On voit ainsi au travers de cette première approche assez théorique apparaître un problème essentiel : la planification de la trajectoire. Différentes approches sont envisageables selon que le robot évolue en milieu connu ou inconnu :

- L'évolution en territoire cartographié simplifie évidemment la tâche des concepteurs : une fois la carte de la zone d'évolution rentrée dans la mémoire d'un ordinateur

communiquant avec le robot ou bien dans une mémoire intégrée au robot lui-même, des algorithmes de routage permettent de diriger le robot.

- Il en va tout autrement dans le cas de l'évolution en territoire inconnu. Le robot doit alors analyser son environnement au moyen de différents capteurs, détecter sa position par rapport à son but, et décider de sa trajectoire. Cette localisation peut s'effectuer par différentes méthodes : triangulation de signaux émis par des balises déposées au cours du déplacement ou/et repérage d'obstacles à distance et construction d'une carte du site, mesures odométriques et estimation de la position.

On applique ensuite des algorithmes complexes pour diriger le robot. Ceux-ci peuvent amener des résultats plus ou moins heureux, le principal problème étant la non-convergence de certaines boucles de déplacement. Si aucun algorithme de secours n'a été prévu, l'intervention humaine est alors nécessaire.

5. CONCLUSION

Les robots d'aujourd'hui ne sont quasiment que des prototypes, mais comme toute avancée technologique, ils se perfectionnent avec le temps et leurs capacités vont certainement être au-dessus de nos espérances.

Nous constatons que les robots auront une place importante dans un futur proche et que les liens entre Homme-Machine se tisseront de plus en plus facilement, mais jusqu'à quelles limites ?

Les robots possèdent de nombreux avantages, ils améliorent réellement la vie de l'Homme. Tout devient réalisable avec un robot.

Il est bien de montrer que la robotique transformera nos vies, mais il faut bien prendre en compte que de telles avancées devront être contrôlées, car il existe toujours des abus, en particulier dans le domaine militaire. On nous le montre trop souvent dans les films de science-fiction où les robots prennent une place trop importante dans le monde humain, et deviennent incontrôlables. Ce n'est bien sûr que l'imagination des réalisateurs mais il ne faut pas négliger la sécurité des êtres humains. Nous devons prendre garde à toujours rester maître de nos inventions.

CHAPITRE 2

LES ROBOTS MARCHEURS BIPÈDES

1. INTRODUCTION

Depuis longtemps l'homme cherche à imiter des fonctions spécifiques aux êtres vivants. Par exemple les réseaux de neurones artificiels imitent le cerveau humain dans sa structure et son fonctionnement. Les algorithmes génétiques imitent l'évolution d'une population d'individus vivant dans un milieu biologique. Ils sont souvent utilisés dans la résolution de problèmes d'optimisation numériquement difficiles.

La marche est le mode de locomotion employé par l'être humain et plusieurs animaux. Nous marchons quotidiennement sans nous poser de questions sur la prouesse réalisée. Et pourtant, regardons les mois d'apprentissage nécessaires à un jeune enfant pour qu'il maîtrise ce processus finalement si complexe.

Outre le fait de copier l'animal, la marche robotique permet d'évoluer sur une plus grande variété de terrains. Le sol peut être irrégulier voir parsemé de petits obstacles. Une approche consiste à penser que le robot doit être le plus proche de l'homme afin de pouvoir être utilisé là où va l'homme. Des chercheurs de plusieurs communautés scientifiques, telles que la médecine, la biomécanique, la robotique, et l'automatique travaillent déjà sur ce sujet.

L'objectif principal de l'étude de la marche en robotique réside dans la conception et la réalisation de prototypes de robots marcheurs (bipèdes, quadrupèdes, hexapodes, . . . etc.). Ces prototypes sont censés être capables de reproduire ou d'imiter certains mécanismes de la marche humaine ou animale et d'aider ou de remplacer l'être humain dans des tâches plus ou moins difficiles.

2. LA MARCHÉ BIPÉDE HUMAINE

L'objectif de cette section est de clarifier les principaux mécanismes physiologiques et biomécaniques mis en jeu lors de la marche humaine [1].

La marche humaine est une activité d'une extrême complexité, c'est une acquisition motrice précoce. Progressivement et rapidement affinée chez l'enfant, elle devient une fonction complexe intégrée à de multiples niveaux du système nerveux central à tel point qu'il n'est pas possible de lui reconnaître un centre spécial. Elle met en jeu plusieurs automatismes, bouclés de la moelle au tronc cérébral, au cervelet, aux noyaux gris centraux. Ces derniers permettent la reproduction cyclique de la séquence active des membres

inférieurs, tout en autorisant l'adaptativité nécessaire aux variations du relief, aux changements d'allure ou aux modifications de trajectoire.

2.1 Concepts et facteurs de la marche humaine

On trouve la marche bipède chez l'être humain et plusieurs animaux (les oiseaux par exemple), cependant la marche la plus sophistiquée est celle de l'être humain. C'est la raison pour laquelle, dans l'étude de la locomotion artificielle bipède, l'homme est une référence indiscutable. Ce dernier dispose d'un corps caractérisé par un extraordinaire système de coordination [7]. Il met en jeu, entre autres:

- 29 degrés de liberté et 48 muscles pour chaque membre inférieur (jambe);
- un moteur pelvien pour la marche en terrain horizontal et la poussée du triceps sural et des extenseurs de hanche pour les changements de pente et les reliefs accidentés;
- un organe de contact avec le sol spécifiquement adaptatif grâce à ses grandes capacités de déformation induites par ses nombreux degrés de liberté, par sa semelle plantaire épaisse et fixée, ainsi que par le jeu vertical et transversal des métatarses;
- des capteurs d'accélération 2 angulaire et linéaire permettant le contrôle des trajectoires en l'absence de contrôle visuel.

D'après ce qui précède, on constate d'une part la grande complexité de la marche humaine et d'autre part sa perfection et sa sophistication.

2.2 Paramètres de la marche humaine

Quelques terminologies souvent utilisées en biomécanique et reprises en robotique bipède sont présentées ici :

- **la marche** : mode de locomotion bipède avec activité alternée des membres inférieurs et maintien de l'équilibre dynamique;
- **la locomotion** : activité de l'appareil moteur en relation avec le déplacement des segments du corps humain;
- **le pas** : activité séquentielle des deux membres inférieurs au cours de la marche;

- **le cycle de marche** : activité d'un seul membre inférieur, depuis le contact du talon au sol jusqu'au prochain contact au sol. Sa décomposition donne lieu aux phases de marche, cette décomposition est illustrée sur la figure 2-1 pour un être humain;
- **phase de simple appui** : appelée aussi phase de simple support, elle commence avec l'appui total d'un pied au sol jusqu'au lever du talon de ce même pied. Cette phase constitue entre 70% et 80% du cycle de marche, pendant laquelle le poids du marcheur repose sur ce support unique. La jambe qui supporte le marcheur est appelée jambe d'appui, ou jambe de support, tandis que l'autre jambe est appelée jambe de balancement ou jambe de vol;
- **phase de double appui** : appelée souvent phase de double support, elle constitue entre 20% et 30% d'un cycle de marche. Elle est caractérisée par le fait que le marcheur s'appuie sur le sol par ses deux pieds, d'où le nom phase de double support;

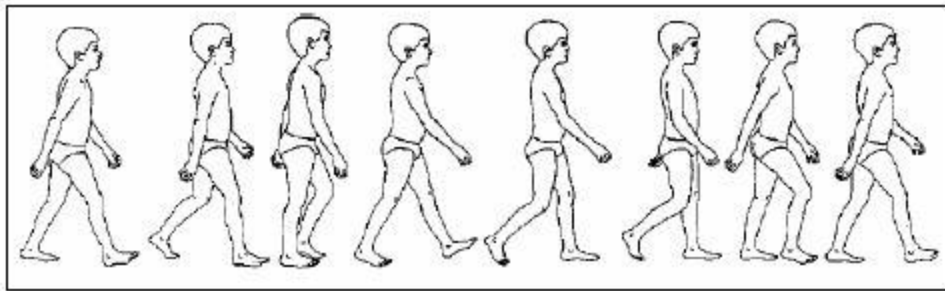


Figure 2-1 : *Décomposition d'un cycle de marche humaine.*

- **phase de passage (du membre inférieur)**: période pendant laquelle le membre inférieur considéré ne supporte aucun poids, mais il avance en se pliant puis en s'étendant. Cette phase est souvent appelée phase de balancement et elle se déroule simultanément à la phase de simple support mais sur l'autre membre, i.e. lorsqu'une jambe est en phase de simple support l'autre est en phase de balancement.
- **membre oscillant** : membre inférieur qui passe le pas, par opposition à celui qui est ancré au sol. Ce membre est souvent appelé jambe de balancement, jambe libre, ou encore jambe de vol.

Le mouvement relatif à la marche humaine met en jeu divers déplacements, qui se déroulent dans différents plans illustrés dans la figure 2-2 Ces déplacements constituent

des facteurs biomécaniques intervenant principalement dans le plan sagittal et dans le plan frontal (ou coronal). Ils garantissent la stabilité de l'unité locomotrice et lui permettent le synchronisme mobilité/stabilité.

Dans le plan sagittal interviennent :

- une rotation du bassin autour de l'axe vertical avec un basculement du coté non porteur;
- une flexion du genou pendant l'appui;
- des mouvements bien coordonnés du pied et de la cheville.

Dans le plan frontal intervient le déplacement latéral du bassin.

A noter que ces mouvements jouent un rôle primordial dans la minimisation du débattement du centre de gravité. Ce dernier a un mouvement périodique et il est illustré sur la figure 2-3.

Si nos membres inférieurs étaient rigides le débattement du centre de gravité aurait été de 75 mm .Mais ceci est diminué jusqu'à 45 mm grâce aux mouvements sagittaux et frontaux ainsi qu'à leur coordination. A titre d'exemple, la rotation axiale du bassin contribue par une diminution de 10 mm, et la flexion du genou par une diminution de 11 mm, du débattement du centre de gravité.

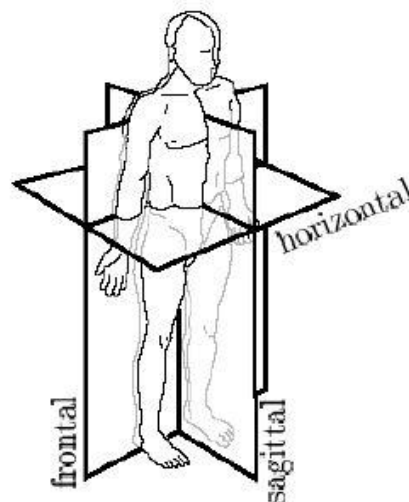


Figure 2-2 : Plans principaux dans lesquels les mouvements prennent lieu.

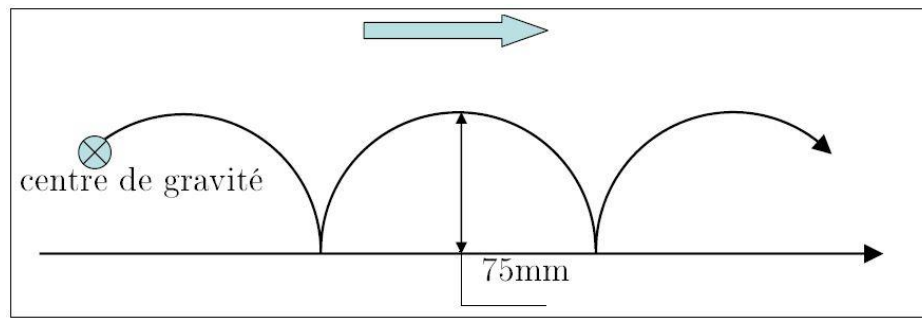


Figure 2-3 : Débattement du centre de gravité pendant la marche.

2.3 Polygone de sustentation

Le polygone de sustentation est le contour extérieur des points d'appui au sol. La figure 2-4 présente un exemple de polygone de sustentation pour les phases de simple et double support. Le polygone de sustentation est un concept qui permet de caractériser la marche au niveau de la stabilité.

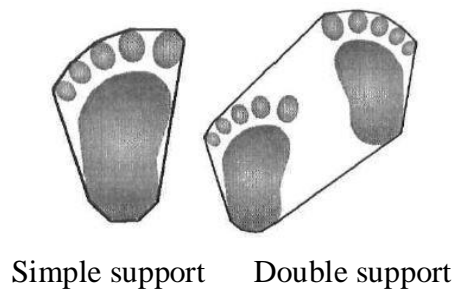


Figure 2-4 : Polygone de sustentation.

2.4 Anthropométrie

Afin de faire des machines qui ressemblent ou qui s'adaptent aux humains, il est intéressant de mieux connaître certaines données anthropométriques sur l'homme. Des mesures de longueur ou de volume sont habituellement utilisées pour décrire l'anatomie humaine, mais pour l'analyse du mouvement, des mesures comme la masse, les moments d'inertie et leurs positions sont nécessaires.

D'abord, la figure 2-5 présente les dimensions moyennes du corps humain par rapport à la hauteur de la personne. Ces données peuvent être utilisées pour dimensionner un modèle correctement. À l'aide de ces données, il est possible de calculer les variables reliées à la cinématique et à la dynamique.

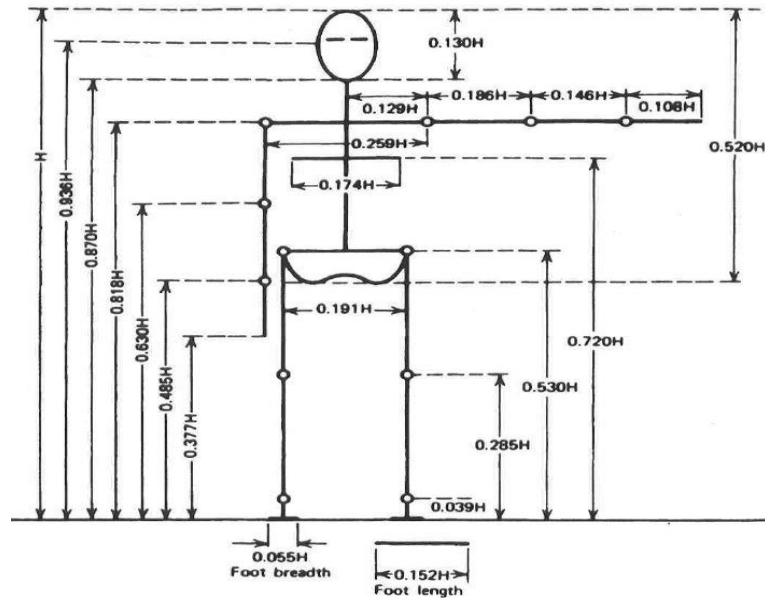


Figure 2-5 : Longueurs des segments du corps exprimées en fraction de la hauteur H [11].

3. LA MARCHE BIPÈDE ROBOTIQUE

Les robots marcheurs bipèdes font partie des robots marcheurs à pattes. Ils possèdent des spécificités qui les distinguent des autres robots à pattes. Un robot marcheur bipède peut être défini comme étant une chaîne cinématique qui comporte deux sous-chaînes appelées jambes et une troisième appelée tronc. Les trois sous-chaînes sont interconnectées au moyen d'une articulation commune, qui forme ce qu'on appelle la hanche. Les jambes peuvent être articulées en plusieurs points comportant ainsi une cuisse (ou fémur), un tibia, une cheville, un orteil . . . etc. Un schéma synoptique illustratif d'une structure simple d'un robot bipède, est celui de la figure 2-6.

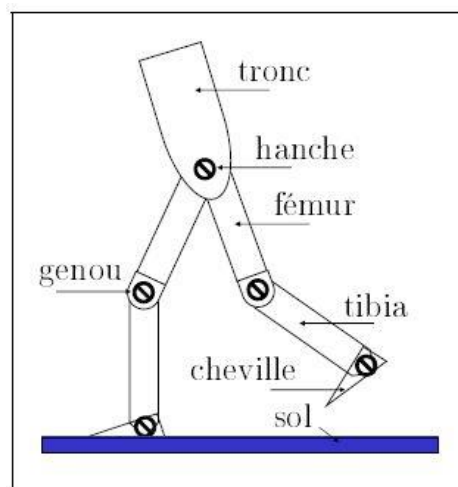


Figure 2-6: Structure simple d'un robot bipède.

Les deux jambes du robot ont la possibilité de décoller alternativement de la surface de marche, et la cadence de décollement définit la vitesse et le type de déplacement. Dans le cas de la marche, le robot est toujours en contact avec le sol au moins avec une jambe. La course, quant à elle, est caractérisée par des périodes où les deux jambes sont en l'air.

La marche bipède robotique est inspirée de la marche humaine, bien qu'une marche si efficace et si élégante que la marche humaine soit loin d'être reproduite.

Malgré leurs capacités à danser, descendre ou monter les marches d'escaliers et même taper sur une balle, les robots bipèdes manquent encore d'aisance et d'autonomie.

L'équilibre du marcheur est partiellement déterminé par la position du centre de gravité.

C'est le point d'application de la résultante des actions de la pesanteur sur toutes les parties d'un corps. A l'arrêt, celui-ci doit se situer sur une verticale passant à l'intérieur de la surface délimitée par les points d'appui (*Polygone de sustentation*) sinon le robot est en déséquilibre.

Il est important de noter qu'un corps gardera plus facilement son équilibre si :

- son centre de gravité est bas. Dans ce cas l'inclinaison du corps devra être importante pour que la projection du centre de gravité soit en dehors de la surface délimitée par les points d'appuis,
- le corps est large, car sa stabilité sera plus aisée à maintenir.

3.1 Principes de la marche robotique bipède

Durant la marche, le robot bipède alterne les rôles de ses deux jambes, ce qui lui permet de se déplacer sur la surface de marche. La manière d'interaction du robot marcheur avec le sol définit les différentes phases de marche, elles peuvent être classées comme suit :

- **phase de simple support** : durant laquelle le robot est en contact avec le sol à travers une seule jambe, d'où le nom simple support ou simple appui. La jambe de contact est appelée jambe de support, tandis que l'autre jambe est appelée jambe de vol, ou jambe de balancement;
- **phase de double support** : c'est la période au cours de laquelle les deux jambes sont simultanément en contact avec le sol, d'où le nom double support ou double appui;
- phase de vol : pendant cette phase, le robot bipède n'a aucun contact avec la surface de marche. En effet, les deux pieds sont en l'air, cette phase intervient dans les scénarios de course;

- **phase d'impact** : elle caractérise le phénomène de choc, entre le pied de balancement et le sol. Elle intervient à la fin de la phase de simple support dans le cas de la marche, et à la fin de la phase de vol dans le cas de la course.

Par conséquent un cycle de marche consiste en un enchaînement de phases de simple support, d'impact, et de double support (figure 2-7). Un cycle de course, quant à lui, est une succession de phases de simple support, de vol, et d'impact (figure 2-8).

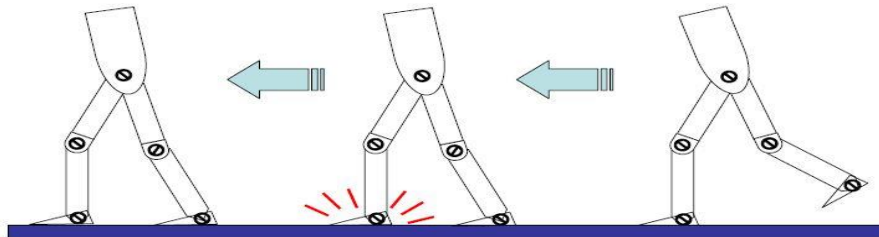


Figure 2-7 : Séquence des phases dans la marche

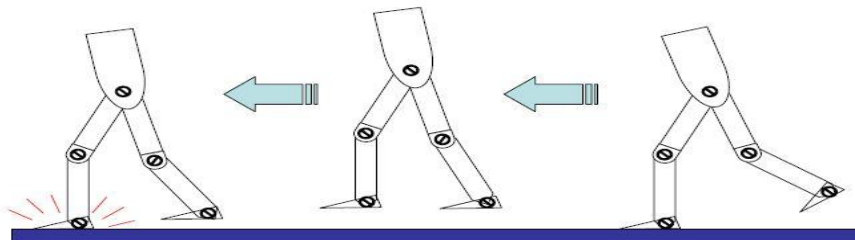


Figure 2-8 : Séquence des phases dans la course.

3.2 Degrés de liberté nécessaires à la marche

Une notion importante dans l'analyse d'un système mécanique est celle du degré de liberté (DDL). Les DDL d'un système sont les paramètres indépendants qui permettent de définir complètement la position et l'orientation de chacun de ses corps dans l'espace. Ainsi, pour un système à n DDL, il faudra n coordonnées pour définir sa position. La marche humaine comporte naturellement des dizaines de DDL répartis dans les membres inférieurs et supérieurs du corps. Cependant, lors de l'étude de la marche, le nombre de DDL de la représentation schématique du bipède doit être diminué pour en simplifier l'analyse. Plus le nombre de DDL est élevé, plus le modèle sera complexe et difficile à analyser, mais plus il aura de possibilités de mouvement.

4. LES MODES DE LA MARCHÉ ROBOTIQUE

Dans le contexte de la marche robotique, on distingue deux types de marches qui sont étroitement liés à la stabilité du corps du robot pendant le déplacement. Il s'agit de la marche statique et la marche dynamique qui seront brièvement décrites par la suite.

4.1 La marche statique

La marche statique est caractérisée par le fait que le robot marcheur garde toujours son centre de masse (c.d.m) projeté verticalement à l'intérieur du polygone de sustentation, formé par les points de contact avec le sol. Cela signifie qu'à n'importe quel instant, si les mouvements du robot sont arrêtés, il reste indéfiniment en position stable. Une marche statique pour un robot quadrupède est illustrée par la figure 2-9. Cette solution est la plus simple, elle consiste à déplacer les pattes une par une.

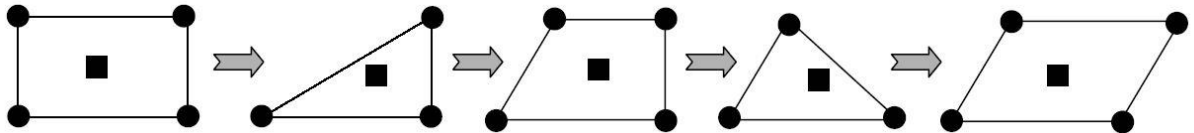


Figure 2-9 : Marche statique quadrupède (■ : c.d.m, ● : pattes), la flèche indique le sens de la marche, les pattes forment les sommets du polygone de sustentation.

L'équilibre est facilement maintenu grâce à la projection du centre de gravité toujours très bien placée par rapport au polygone de sustentation. Le problème majeur de cette solution réside dans sa lenteur. En effet, le robot doit faire quatre déplacements pour avancer d'un pas. Cependant, pour augmenter la vitesse du déplacement, une autre solution peut être envisagée, elle consiste à déplacer les deux pattes opposées en même temps.

Il semble évident que moins le robot a de pattes, plus il est difficile de le faire marcher.

En effet, une marche statique pour un robot bipède est celle illustrée sur la figure 2-10. La solution consiste à amener la projection du centre de gravité au polygone de sustentation.

Il faut déplacer avant chaque mouvement une partie de la masse du robot au-dessus du pied restant en appui en basculant une partie du robot à chaque déplacement. Une autre illustration d'une telle marche statique bipède est celle de la figure 2-11 dans le plan sagittal.

Ce qu'il faut retenir, pour la marche statique c'est que pendant le déplacement du robot (quel qu'il soit), la projection du c.d.m devra toujours rester à l'intérieur du polygone

de sustentation. Cette restriction doit être vérifiée même si ce dernier change durant la marche.

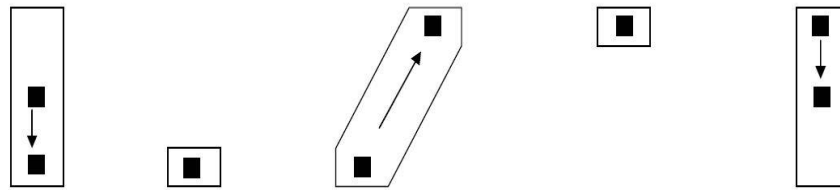


Figure 2-10 : *Marche statique bipède, vue de dessus, (■: c.d.m) projeté sur le polygone de sustentation, la flèche indique le sens de déplacement du c.d.m.*

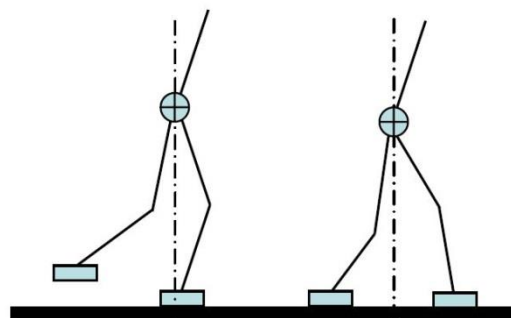


Figure 2-11 : *Marche statique bipède (vue dans le plan sagittal).*

4.2 La marche dynamique

Contrairement à la marche statique, dans une marche dynamique, il n'y a pas une telle contrainte sur la position du c.d.m. Pour ce mode de locomotion, le robot se trouve en déséquilibre pendant le pas. Il récupère son équilibre au moment où il repose ses pattes situées en l'air. Puis il se place à nouveau en déséquilibre en soulevant d'autres pattes. Ce mécanisme se traduit par le fait que le c.d.m du robot quitte le polygone de sustentation pour des périodes de temps durant la marche. Ceci engendre une accélération horizontale chez le robot marcheur.

Cependant, de telles périodes de temps doivent, d'une part, être courtes et d'autre part, elles doivent être contrôlées afin d'éviter une éventuelle chute du robot.

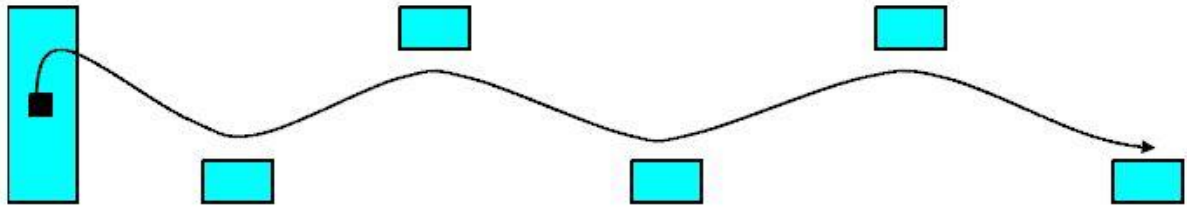


Figure 2-12 : Marche dynamique bipède (■ : c.d.m), la flèche indique l'excursion de la projection du c.d.m.

Dans la figure 2-12 la marche dynamique est illustrée à travers le polygone de sustentation et le déplacement de la projection du c.d.m pour un robot marcheur bipède. Si on compare les deux modes de marche, on constate bien évidemment que la marche statique est très restrictive et caractérisée par des mouvements lents. Ceci empêchera le robot marcheur d'atteindre de grandes vitesses de déplacement. En revanche, la marche dynamique le permet. Ceci est obtenu en supprimant la contrainte sur le déplacement du centre de masse, ce qui augmente la mobilité du système par une plus grande flexibilité des mouvements des jambes et des pieds.

Du point de vu contrôle, la marche dynamique est la plus difficile à obtenir, étant donné que le robot marcheur est très instable dans le cas de ce mode de locomotion.

Il reste à noter, dans ce contexte, que l'être humain, qui est le modèle de locomotion le plus élégant à imiter, applique des allures de marche dynamique pour se déplacer. [8] De plus, on peut distinguer deux classes de robots marcheurs : les robots passifs et les robots actifs. Les robots passifs ne disposent pas de source d'énergie, ni d'actionneurs pour se déplacer sur sol incliné. C'est l'action de la gravité qui permet au robot d'avancer. Les travaux de McGeer concernent un robot compas capable de marcher sur un plan incliné. Les travaux de Wisse et al ont permis la construction d'un robot bipède plan autonome pouvant marcher. Ce robot possède des caractéristiques énergétiques similaires à un être humain. Collins et al ont construit un robot passif en 3-dimensions ayant une démarche et une efficacité énergétique identique à celle de l'homme. La figure 2-13 présente ce robot. Les auteurs définissent deux coûts afin de comparer les robots entre eux et aux performances de l'humain : le coût d'énergie mécanique c_{mt} et le coût estimé spécifique de transport cet . Les différents robots passifs permettent d'étudier les propriétés de la marche telles que la stabilité, les cycles limites. Pour la catégorie des robots actifs, les articulations ont des actionneurs et le robot est muni d'une source d'énergie pour avancer sur tous types

de sol. Les travaux sur cette catégorie de robots concernent en particulier la commande de la marche.



Figure 2-13 : Présentation du robot construit par Collins et Ruina. citeRuina2005.

Dans le monde, beaucoup de robots marcheurs actifs ont été développés et on peut les détailler en balayant les travaux des chercheurs sur trois continents:

En Asie : les projets des robots marcheurs ont commencé dans les années 60 avec l'apparition du robot WL-1 au Japon. Ce robot était capable de marcher et de s'asseoir. S'en suivi une série de robots composés uniquement de pieds, de jambes et d'un tronc (WL-3, . . . WL-16). En 1995, une nouvelle série de robot apparait appelé WABIAN (pour WAseda BIpedal humANoid). L'objectif de cette série de robots est de pouvoir interagir avec l'homme. Ces robots comportent en plus d'un moyen locomoteur, un tronc muni de bras et au niveau de la tête se trouve un système de vision. L'évolution de la conception de ces robots a permis de faire diminuer leur masse totale et ainsi d'augmenter leurs capacités d'autonomie. L'évolution de ces robots a permis de diminuer la taille en passant de 1m66 pour un poids de 107 kg à un robot de 1m47 pour une masse totale de 67.5 kg. L'entreprise Honda a aussi développé des robots marcheurs, le premier se nommant E0. Depuis, Asimo a fait son apparition. Celui-ci peut marcher, courir et sauter à cloche pied. HRP pour Humanoid Robot Project est une série de robots développée par Kawada Industries. Par exemple, HRP-2 est un robot ayant environ 30 degrés de liberté (ddl) capable de marcher, de porter des objets en aidant une personne. La version HRP-3 apporte une innovation au

niveau des mains et passe de 30 ddl à 42 ddl pour le même poids que HRP-2. La figure 2-14 présente différentes plates-formes conçues au Japon

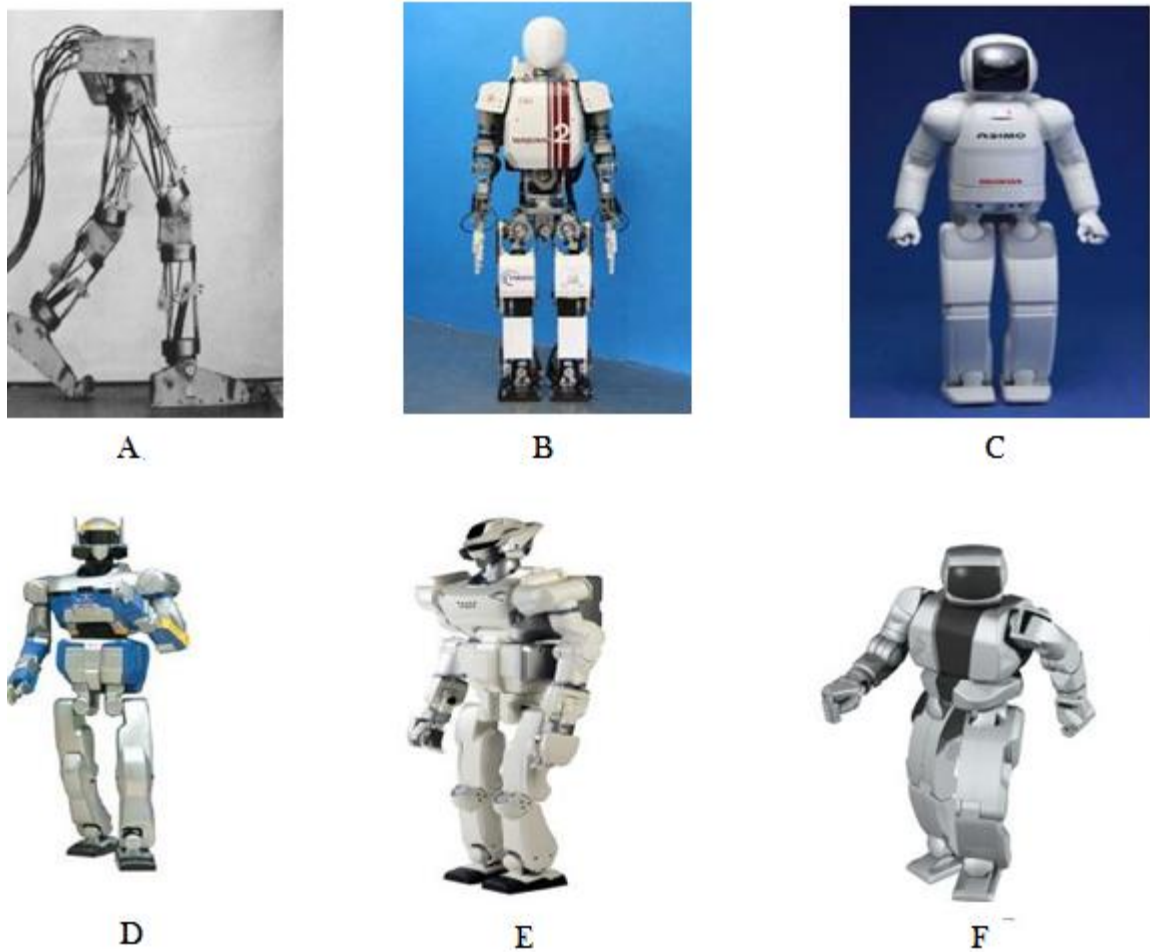


Figure 2-14: Robots Asiatiques : (A) WL-1, (B) WABIAN-2R, (C) Asimo, (D) HRP-2, (E) HRP-3, (F) Hubo. [8]

En Corée, une série de robot a été mise au point par l'Institut de Sciences et Technologies Avancées Coréen nommé KHR. Des stratégies de marche basées sur le ZMP développées KHR-2 utilisée sur le robot par Park et al ont été intégrées au robot KHR-3 renommé Hubo.

Aux États-Unis : on recense plusieurs projets de robotique humanoïde dont des robots planaires. Au MIT, Pratt et son équipe ont développé un robot bipède planaire appelé Spring Flamingo. Ce robot est composé de sept corps et sa démarche se rapproche du pas des oiseaux avec les genoux pliés vers l'arrière. Grizzle et son équipe ont réalisé un robot à cinq corps capable d'avancer avec une démarche humaine. Ce robot est conçu avec des liaisons séries compliantes ce qui lui permet d'absorber les chocs lorsque le pied entre en contact

avec le sol. Les expériences faites en 2009 montrent qu'il peut marcher à une vitesse de 1.5 m/s.

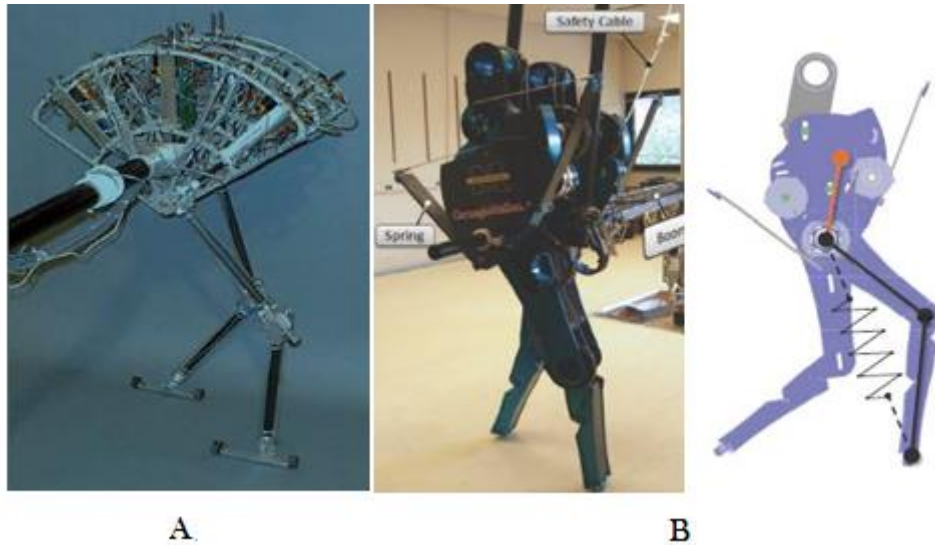


Figure 2-15 : Robots Américains : (A) *Spring Flamingo*, (B) *MABEL*.

En Europe : beaucoup de projets ont été réalisés. En Allemagne, Pfeiffer et son équipe ont conçu le robot Johnnie qui mesure 1m80 pour un poids de 40 kg. Une extension de ce robot a été réalisée par Ulbrich et al et s'appelle LOLA. Ces deux plates-formes ont été conçues pour réaliser une marche rapide et ressemblante à celle de l'homme. Sur le robot LOLA, des actionneurs linéaires ont été utilisés pour les genoux ce qui a permis une meilleure répartition des masses du robot. En France, le robot plan nommé Rabbit a été réalisé pour étudier la marche et la course en partant du principe que la marche est une succession de phases de déséquilibre. Le robot BIP a été conçu pour reproduire différentes allures de marche avec des solutions innovante d'actionnements.

Le robot ROBIAN a été développé pour étudier le système locomoteur de l'être humain. Les hanches et les chevilles sont réalisées avec des systèmes de liaisons parallèles ce qui a permis d'augmenter la rigidité et d'économiser de l'énergie. Au Pays-Bas, l'Université de Twente présente un robot passif nommé Dribbel [8] avec une stratégie de commande du genou permettant de le bloquer pendant la marche. Cette innovation montre que le robot a une marche dynamique stable. En Belgique, Lucy est un robot marcheur 3 dimensions évoluant dans le plan sagittal. La particularité de ce robot est qu'il est actionné par des actionneurs pneumatiques. Ces actionneurs permettent de diminuer le poids du robot et de

réduire la consommation énergétique. Leur raideur peut être contrôlée en fonction des angles pendant la marche.

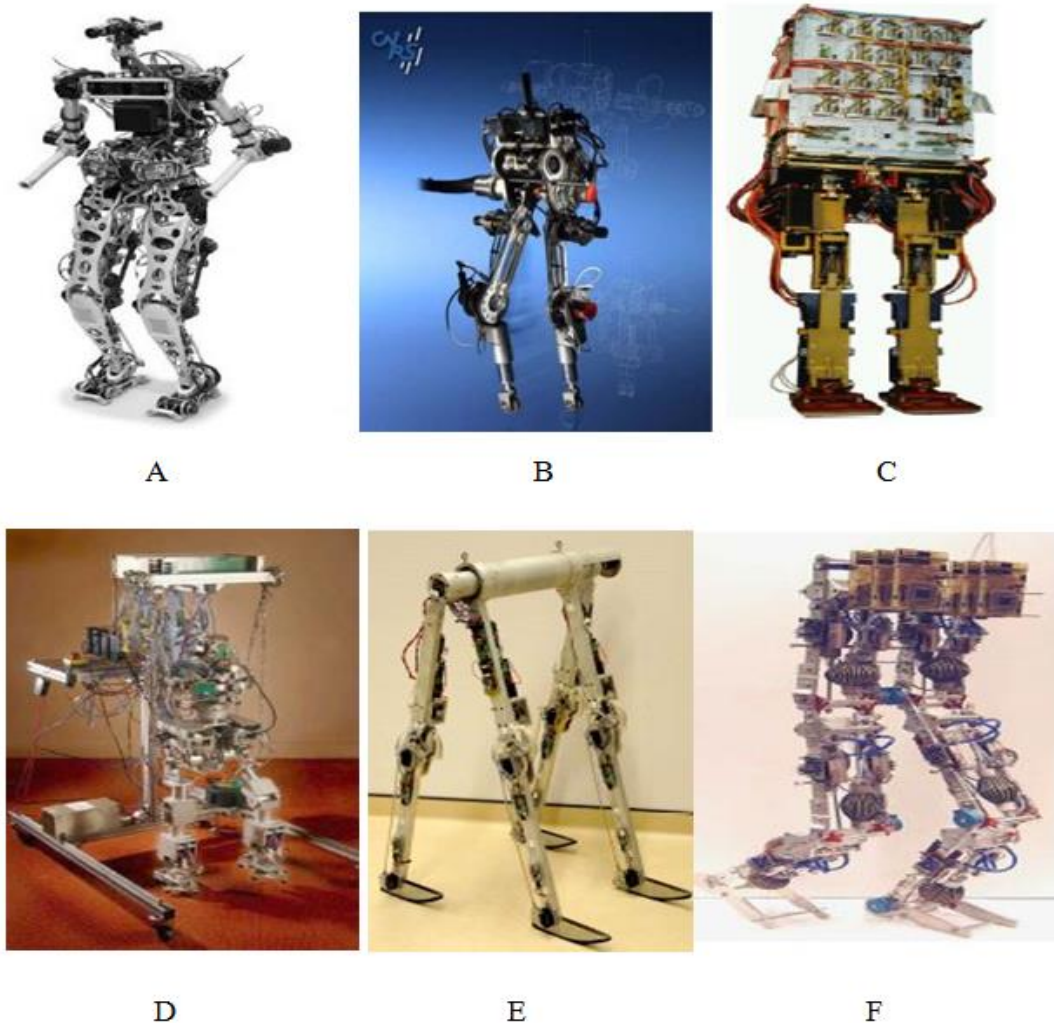


Figure 2-16 : *Robots Européens : (A) LOLA, (B) Rabbit, (C) BIP 2000, (D) ROBIAN, (E) Dribbel, (F) Lucy.*

L'évolution des prototypes montrent une augmentation du nombre de degrés de liberté et une diminution de la masse totale du robot. La cinématique des robots reste tout de même simple avec des chaînes cinématiques simples en arborescence composées d'un corps et d'une articulation. Toutefois, nous allons voir dans le paragraphe suivant que d'autres cinématiques ont été étudiées pour améliorer les articulations d'un robot bipède et ainsi tenter de reproduire aux mieux les capacités d'endurance et de fluidité de mouvement de l'homme.

5. QUELQUES EXEMPLES DE CINEMATQUES DES ARTICULATIONS

Dans notre étude, l'articulation du genou est le principal sujet d'intérêt. Nous allons détailler dans ce paragraphe les différentes cinématiques qui ont été étudiées pour améliorer cette liaison. Nous analysons la particularité du genou humain puis les différentes solutions abordées par les chercheurs en robotique. Nous ferons aussi un point sur différentes cinématiques intéressantes qui se situent sur d'autres articulations locomotrices.

5.1 Cinématique du genou en robotique humanoïde

La cinématique du genou humain doit d'abord être présentée afin de comprendre le mouvement que l'on cherche à reproduire en robotique. Le genou humain n'est pas une simple liaison rotoïde. Le principal mouvement qu'effectue le genou est dans le plan sagittal. Ce mouvement est une combinaison de mouvements de roulement et de glissement simultanés. La figure 2-17 présente le mouvement de roulement-glissement du fémur sur le tibia. Les distances de roulement du fémur (l_F) et du tibia (l_T) ne sont pas identiques. En tridimensionnel, le genou effectue aussi de faibles rotations et translations dans le plan frontal et le plan transversal qui permettent de verrouiller le genou en fin de flexion. Ces rotations sont limitées par les ligaments du genou.

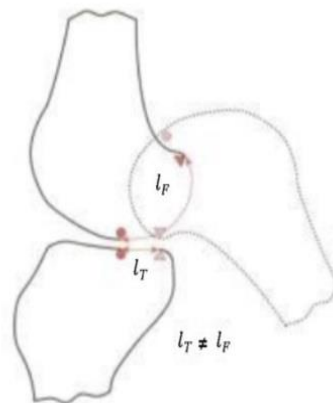


Figure 2-17 : *Mouvement de roulement combiné avec du glissement du fémur sur le tibia.*

Dans la littérature, on retrouve plusieurs cinématiques conduisant à une nouvelle approche du genou en robotique. Van Oort et al ont repris les travaux effectués sur le robot passif Dribbel. Ce robot est composé de genoux qui se verrouillent lorsqu'ils sont tendus grâce à un système à électroaimant. Ce système pose quelques problèmes lorsque la jambe mobile revient trop rapidement car il existe des décollements de l'aimant dès que la jambe arrive en position tendue. Cette équipe a proposé un nouveau système appelé "Beugel". Ce

système est composé de quatre barres et la singularité de celui-ci permet de verrouiller le genou automatiquement lorsque la jambe est tendue. La figure 2-18 montre les deux systèmes utilisés sur le robot Dribbel. Ce système ne coûte pas d'énergie car il utilise sa propre énergie cinétique pour se fermer. La vitesse moyenne de marche obtenue avec ce robot est de 0.29 m/s .

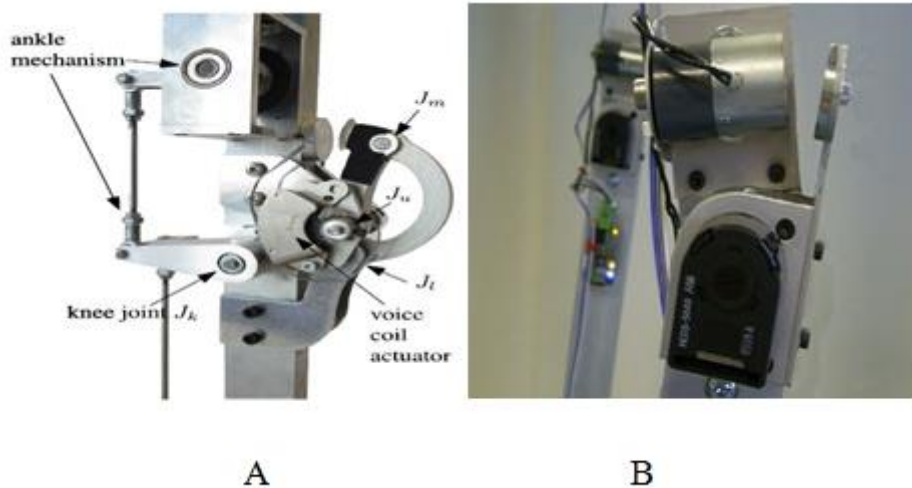


Figure 2-18 : *Présentation de la cinématique du genou de Dribbel. (A) Ancien genou avec électroaimant, (B) Nouveau mécanisme de genou verrouillant.*

Le projet suivant concerne la conception d'un robot humanoïde, basé sur l'anthropomimétique soit l'imitation de l'homme. Ce robot est composé de 206 corps et d'actionneurs munis de liaisons filaires et de liaisons élastiques représentant les muscles. Les os sont modelés à la main avec un polymère appelé polymorphe thermoplastique composé de polycaprolactone (PCL) ayant la particularité d'être très léger. Le robot nommé ECCEROBOT est présenté sur la figure 2-19. Pour l'instant, la partie supérieure du robot est la plus étudiée avec des stratégies de contrôle des bras pour la manipulation. Les auteurs proposent pour la partie inférieure une structure locomotrice toujours basée sur l'imitation des os de l'homme (figure 2-20A). Le genou (figure 2-20B) réalisé sur cette structure permet de se rapprocher du mouvement humain car le phénomène de roulement et glissement est respecté. Pour l'instant, il n'y a pas d'études effectuées de mouvement de marche sur ce robot mais l'approche de cette nouvelle structure reste très intéressante pour l'étude du roulement-glissement pendant la marche.



Figure 2-19 : *Présentation du robot ECCEROBOT.*

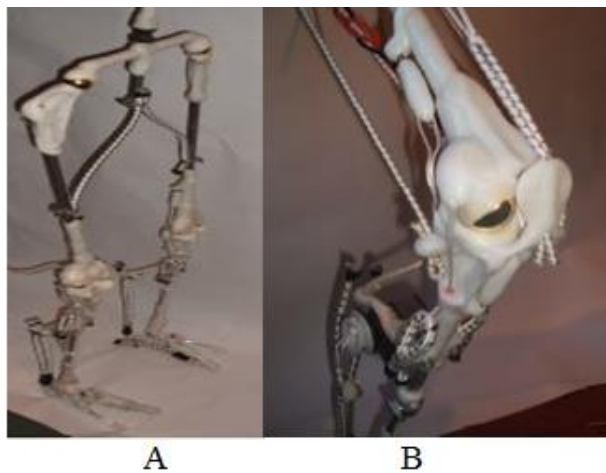


Figure 2-20 : *Présentation la partie locomotrice du robot ECCEROBOT.*

Dans le cadre du projet LARP, l'équipe de Scarfogliero a conçu un robot de 90 cm pour 5 kg dont la démarche se rapproche au mieux du modèle locomoteur humain. Ce robot a été réalisé en polycarbonate ce qui le rend très léger. La cinématique du genou, étudiée par Gini et al se rapproche de celle des prothèses de genou. La principale caractéristique de ces mécanismes est que le centre de rotation instantané n'est pas fixe comme avec une liaison rotoïde, mais varie pendant le mouvement suivant une trajectoire qui dépend du mécanisme de la structure. Le choix de ces chercheurs est de réaliser un genou avec un contact roulant entre le fémur et le tibia. Le centre de rotation instantanée évolue donc au point de contact des surfaces de deux cercles. Les deux corps sont maintenus en contact à l'aide de deux ressorts de traction, puis pour éviter les rotations internes, de trois ressorts.

Une butée est ajoutée sur la surface supérieure au milieu (visible sur la figure 2-21), ce qui fait en sorte que le genou ne se plie pas dans l'autre sens. Les résultats pour ce robot montrent que l'énergie globale utilisée pour un pas de marche statique est équivalente à 6

Joules. Par contre, on ne trouve pas d'informations permettant de conclure si ce genou roulant avantage le mouvement ou l'économie d'énergie.

Enfin, une autre structure de genou a été étudiée par Hamon et al.

Ce système est un mécanisme de 4-barres croisées reliant le fémur au tibia. Ce type de structure parallèle fermée présente des phénomènes de singularités. L'étude montre que la position du centre de rotation instantané se rapproche de celui de l'homme pendant le mouvement de flexion. La figure 2-22 présente la structure de genou 4- barres croisées ainsi que le modèle CAO de ce type de cinématique. Dans la thèse de Hamon, le comparatif entre un robot possédant une structure de genoux de type rotoïde et un robot muni de cette cinématique a été effectué en utilisant un critère énergétique. L'étude montre que pour différentes allures de marche, la structure croisée permet d'économiser de l'énergie.



Figure 2-21 : Présentation du robot conçu par Gini et al.

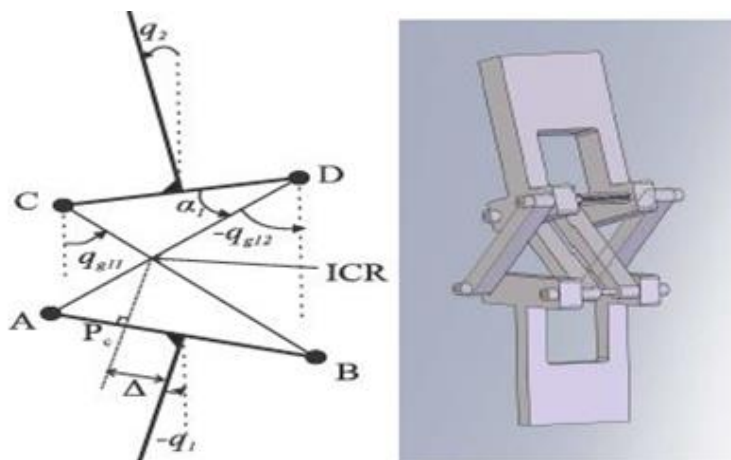


Figure 2-22 : Cinématique du genou développé par Hamon et al.

5.2 Autres cinématiques intéressantes

D'autres articulations ont été étudiées et les choix technologiques sont très pertinents.

Prenons la cinématique de l'articulation de la cheville du robot BIP. Développée par Sardain et al, l'articulation de la cheville propose un mouvement de flexion-extension et un mouvement d'abduction-adduction (frontal latérale gauche/droite). La figure 2-23 présente l'articulation en détail. Technologiquement, l'articulation reliant le pied et le tibia est donc réalisée comme un joint de cardan à l'aide d'actionneurs linéaires parallèles. Les deux actionneurs sont placés sur le tibia permettant une meilleure répartition massique. Le robot humanoïde LOLA reprend la même idée pour l'articulation de la cheville. Pour une réduction et une meilleure répartition des masses, l'actionneur de la cheville a été élevé et se retrouve derrière la cuisse.



Figure 2-23 : Cinématique des chevilles du robot BIP [9].

La cinématique de la hanche humaine est difficile à reproduire. Différentes stratégies ont été adoptées pour reproduire la liaison rotule en mettant en série trois liaisons pivot de telle sorte à obtenir les trois rotations suivant les trois axes orthogonaux comme sur Hubo ou sur Johnnie. D'autres projets ont incliné la liaison pivot sur l'axe de "Lacet" comme sur le robot Nao où l'axe est incliné à 45. Zorjan et al. font l'étude de différentes rotations de l'inclinaison de la hanche d'un robot 3D. Les inclinaisons des hanches observées sont suivant les axes \vec{x} ou \vec{z} et d'angles 15 ou 30. Ils observent l'influence de ces rotations sur la puissance consommée lors de mouvement de flexion/extension des genoux du robot. Ils en concluent qu'il n'y a pas d'influence sur la puissance consommée pour de faibles amplitudes de flexion. Si les amplitudes d'inclinaison augmentent, la consommation augmente proportionnellement.

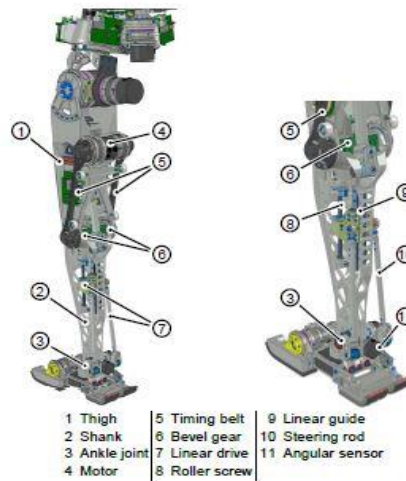


Figure 2-24 : Cinématique des chevilles du robot LOLA [10].

L'équipe de Sellaouti [8] a conçu une hanche sur un mécanisme parallèle composé de liaison rotoïde et prismatique. La hanche est représentée sur la figure 2-25. Cette nouvelle cinématique a deux avantages qui sont une meilleure rigidité de la structure comparée aux hanches composées de liaison série et une économie d'énergie pendant la marche

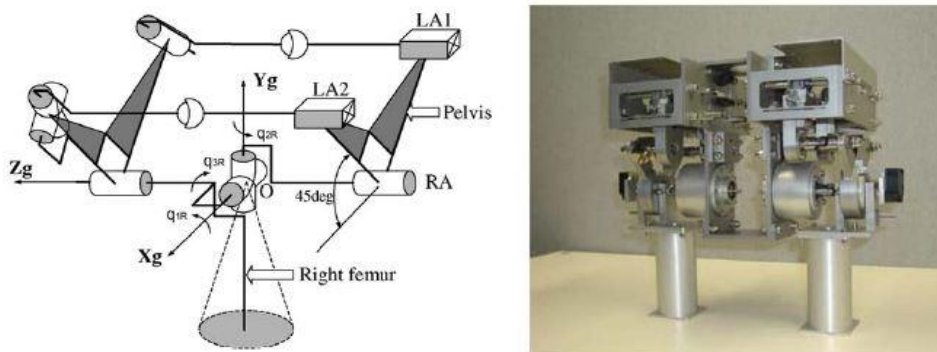


Figure 2-25 : Cinématique des hanches du robot ROBIAN.

6. CONCLUSION

Pour conclure ce chapitre, nous avons les structures et les performances de différents prototypes de robot marcheur de par le monde. Ces robots ne cessent d'évoluer et de proposer de nouveaux challenges conceptuels tant au niveau de la cinématique qu'au niveau des stratégies de commande. La recherche de nouvelles cinématiques du genou pour les robots bipèdes a été présentée. Chaque exemple a été analysé pour comprendre l'apport du nouveau mécanisme sur le fonctionnement du robot.

CHAPITRE 3

LA CONCEPTION MECANIQUE DU ROBOT

1. INTRODUCTION

Ce chapitre s'intéresse à la conception d'un robot bipède par une approche mécatronique et cinématiques. La structure mécanique des membres inférieurs des robots marcheurs se rapproche de celle de l'homme comme les longueurs des segments du corps. Dans notre Robot, Le genou, la hanche et la cheville possèdent un seul degré de liberté qui est une simple liaison rotoïde.

2. ÉLÉMENTS DE CONCEPTION DU ROBOT

D'abord, plusieurs architectures différentes de robot ont été choisies. Le nombre de liens, de DDL et de plans de mouvement varie en fonction des capacités recherchées, des objectifs de construction du robot bipède et de l'avancement du projet. Plus les objectifs de mouvement sont grands, plus le robot aura besoin de liens et de DDL supplémentaires.

2.1 Éléments de choix de la motorisation

Le choix des moteurs est une étape capitale de la conception d'un robot à pattes. L'augmentation de la charge du robot passe par une diminution des masses des éléments mécaniques, des transmissions et des moteurs. Les travaux de dimensionnement des moteurs électriques montrent que l'élément déterminant pour le choix d'un moteur de robot bipède est son coefficient d'efficacité. Ce coefficient est défini par référence au moteur pas à pas, mais un coefficient similaire peut être obtenu pour tous les moteurs électriques.

Notre robot possède 6 articulations entraînées par 6 moteurs à pas à pas de 3 types différents. La correspondante articulation versus types de moteur est donnée dans le tableau 3-1, et le tableau 3-2 donne ces caractéristiques.

Types	Nb	Articulation
RS230C	2	Chevilles subduction /abduction
RS220F	2	Hanche flexion /extension
RS210L	2	Genou flexion /extension

Tableau 3-1 : *Correspondance Moteur et Articulation.*

Types	Couple en rotation lent Nm	Courant permanent en rotation lent I ₀ (A)	Tension D'alimentation de définition U (V)	Vitesse de définition N (tr/min)
RS230C	0.31	1	12	3000
RS220F	0.225	0.5	12	3000
RS210L	0.11	0.5	12	3000

Tableau 3-2: *Caractéristique des moteurs.*

2.2 Éléments de choix des transmissions

La conception des chevilles et des pieds est l'un des problèmes les plus difficiles. Il est nécessaire dans un espace réduit de mettre en place deux articulations motorisées et éventuellement des articulations passives. Le pied contient également un capteur (détection de contact). Les moteurs doivent être placés le long du tibia afin de mieux utiliser l'espace disponible, de diminuer la taille du pied et de rapprocher la masse du robot. La transmission par vis à billes est donc à privilégier. La conception des liaisons de la cheville est représentée sur la Figure 3-1.

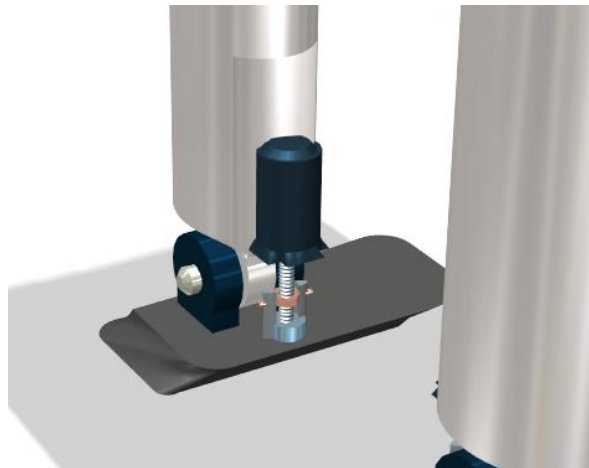


Figure 3-1 : Photo de la conception de la liaison des chevilles du robot.

Pour l'articulation des genoux, l'utilisation d'un réducteur de type "Harmonic Drive" est à privilégier, car il possède un bon coefficient de qualité, il permet de réaliser également directement la fonction de guidage et une transmission par vis à billes comme la liaison des chevilles, cette structure est donc à privilégier. Détails de la conception de l'articulation du genou du robot est représentée Figure 3-2.

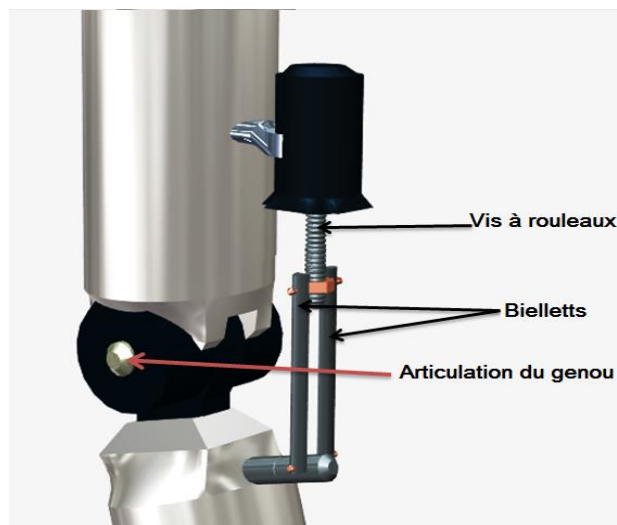


Figure 3-2: Système de transmission des genoux du robot.

3 ETUDE DE LA CONCEPTION DU ROBOT

3.1 Présentation la cinématique du robot bipède

Le gabarit de notre robot est basé sur les dimensions du corps humain comme on a vu précédemment (chapitre 2). La partie inférieure du robot comporte deux branches, qui ont 2 degrés de liberté au niveau du bassin, les genoux et les chevilles, respectivement. Ça permet au robot de soulever et répandre ses jambes, et se pencher en avant. Par cette structure, il est possible pour le robot de marcher comme les humains à pied. La forme et la disposition du robot sont représentées sur la Figure 3-3, les dimensions sont détaillées sur la figures 3-4, et la masse de référence du corps du robot sur leTableau3-3.

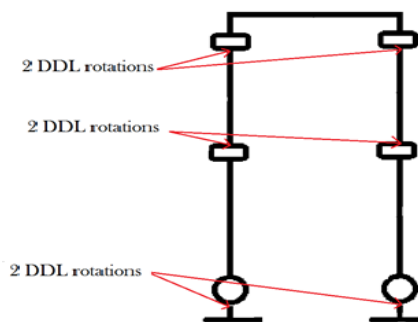


Figure 3-3 : Degrés de liberté et degrés de liaison du robot.

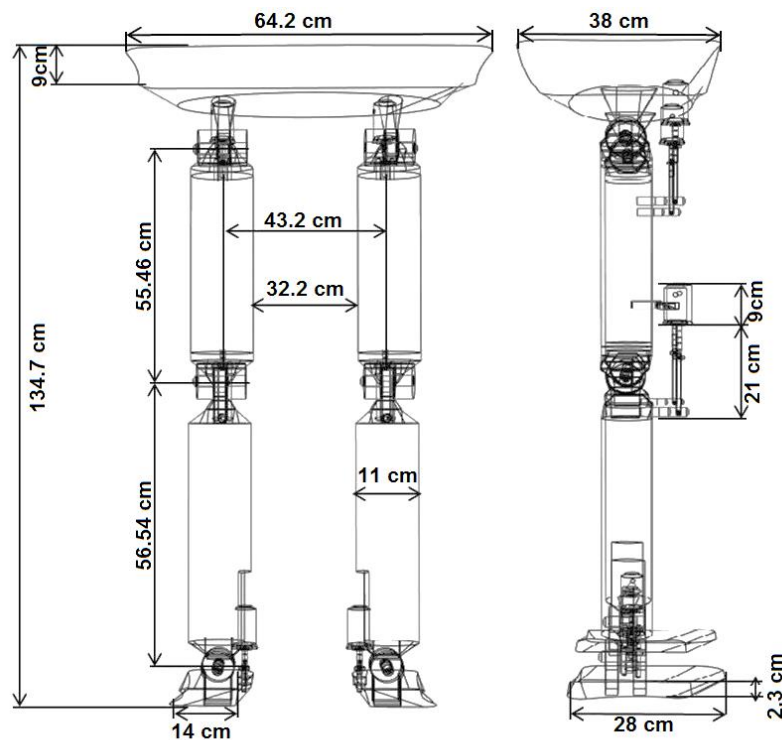


Figure 3-4: dimensions générales du robot.

L'élément		Masse (Kg)
Pied		0.35
Jambe		0.80
Cuisse		0.75
Bassin		1.5
Moteur pas à pas	RS210	0.54
	RS220	0.7
	RS230	0.86

Tableau 3-3 : *Masse de chaque corps du robot.*

3.2 Observations cinématiques

La conception de la patte adopte une forme adéquate pour l'appui sur le sol et qui permet l'équilibre et une rotation du robot en x et z, figure 3-5.

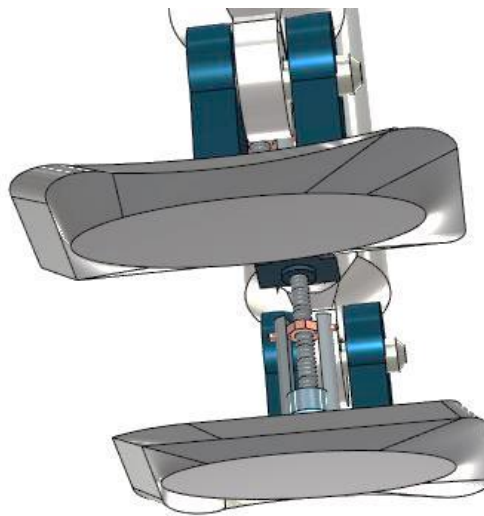


Figure 3-5 : *conception de la patte du robot.*

Les pattes ont 2 DDL chacune comme représenté à la figure 3-6, chaque DDL est commandé par un moteur indépendant.

L'articulation A1 permet une rotation du robot autour de l'axe x. Le moteur E1 qui donne ce mouvement s'installe entre 0 et 1. Il doit permettre une amplitude de $\theta_1 = 15.68^\circ$ de l'articulation A1 comme représenté à la figure 3-6. La vitesse de rotation estimée est inférieure à 5 tr/s.

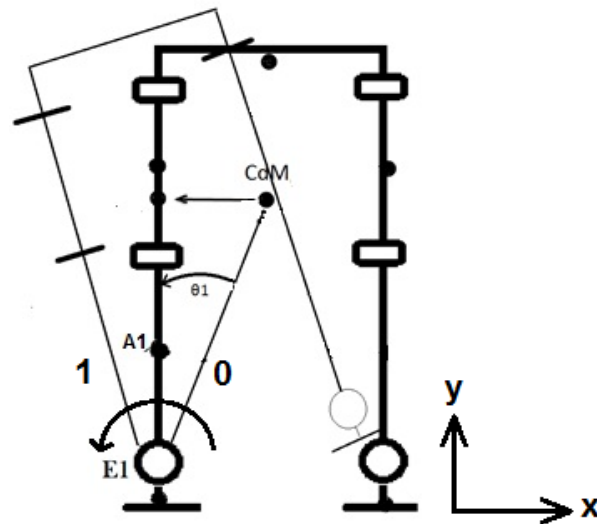


Figure 3-6 : schéma des pattes.

L'articulation A1 de genou donne à la patte le mouvement autour de z. Le moteur E2 doit permettre une amplitude de $\theta_2=15.68^\circ$ de l'articulation A1 autour de z comme représenté à la figure 3-7. La vitesse de rotation estimée est inférieure à 3 tr/s.

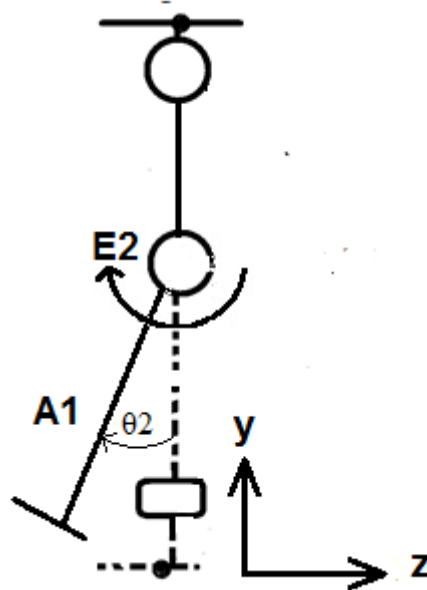


Figure 3-7 : rotation de moteur E2.

L'articulation A2 donne à la patte entière le mouvement autour de z. Le moteur E3 s'installe sur le bassin du robot et permet une rotation de $\theta_3=15.13^\circ$ comme représenté à la figure 3-8. La vitesse de rotation estimée est inférieure à 3 tr/s.

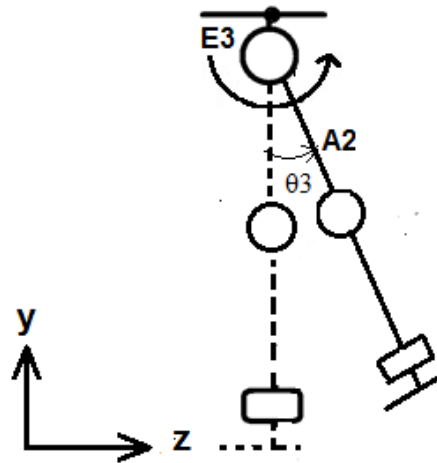


Figure 3-8 : rotation de moteur E3.

3.3 Le cycle de marche du robot

La marche du robot consiste en une alternance des jambes. La manière d'interaction du robot bipède avec le sol définit ce qu'on appelle les phases de marche. Autrement dit le simple contact donne lieu à la phase de simple support (SS), le double contact induit la phase de double support (DS), et la collision du pied de vol avec le sol engendre la phase d'impact. De cet effet un cycle de marche comporte trois phases consécutives. Deux phases principales (simple support et double support) séparées par une phase instantanée dite d'impact. Cette séquence est illustrée sur la figure 3-9.

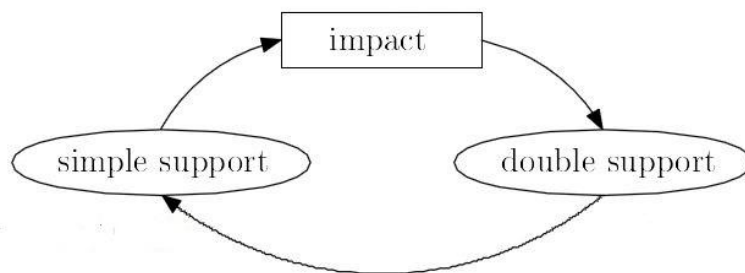


Figure 3-9 : Séquence des phases du cycle de marche.

Durant son cycle de marche, le bipède passe par trois phases. Pendant la première, il ressemble à une chaîne cinématique ouverte, caractérisé par un contact persistant avec la surface de marche. Alors que pendant la deuxième phase, le phénomène engendré illustre le passage de la chaîne ouverte à une chaîne fermée (impact avec le sol). Enfin, pendant la troisième phase de marche, il ressemble à une chaîne cinématique fermée, avec deux points de contact avec le sol. Les phases de marche se montrent à la figure 3-10.

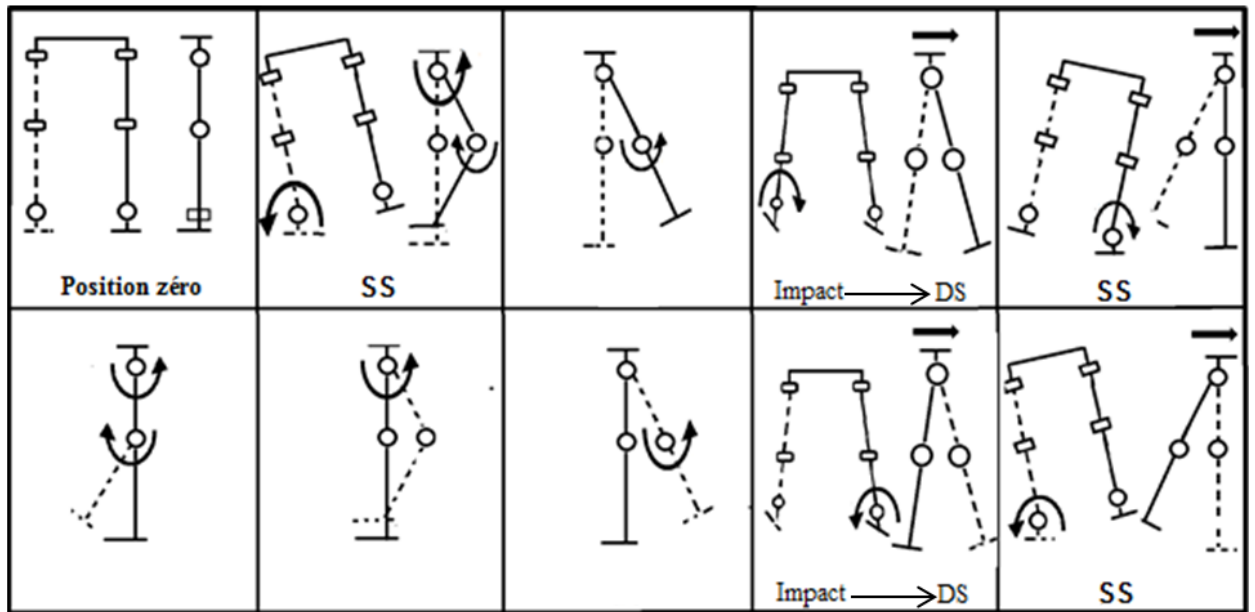


Figure 3-10 : Le cycle de marche.

La position zéro est la position du robot dans laquelle les 6 valeurs des positions articulation sont nulles. Il s'agit de la position où le corps est tendu au vertical, dans cette position on peut retrouver les coordonnées du centre de masse du robot $CdM(x,y)$, comme représenté à la figure 3-11. Avec C_i les centres de gravité d'éléments du robot. Les positions d'éléments du robot sont détaillées sur le tableau 3-4.

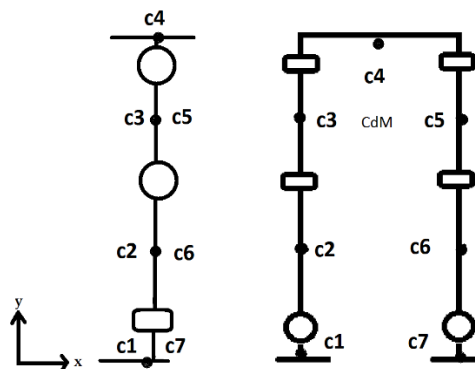


Figure 3-11 : Position initiale ou repos du robot.

L'élément	Position dans l'axe x X(m)	Position dans l'axe y Y(m)
Pied droit c1	0	0.04
Pied gauche c7	0.432	0.04
Jambe droit c2	0	0.3627
Jambe gauche c6	0.432	0.3627
Cuisse droit c3	0	0.9227
Cuisse gauche c5	0.432	0.9227
Bassin	0.216	1.275

Tableau 3-4 : La position d'éléments du robot

Le CdM du robot est composé de plusieurs segments est le barycentre des centres de masse des différents éléments, il peut être calculé avec la formule suivante :

$$CdMx = \frac{M1 \times X1 + M2 \times X2 + M3 \times X3 + M4 \times X4 + M5 \times X5 + M6 \times X6 + M7 \times X7}{M1 + M2 + M3 + M4 + M5 + M6 + M7}$$

$$CdMy = \frac{M1 \times Y1 + M2 \times Y2 + M3 \times Y3 + M4 \times Y4 + M5 \times Y5 + M6 \times Y6 + M7 \times Y7}{M1 + M2 + M3 + M4 + M5 + M6 + M7}$$

Où

Mi : la masse d'élément du robot (Kg) voir Tableau 3-3 ;

Xi : la position d'élément du robot selon l'axe x ;

Yi : la position d'élément du robot selon l'axe y.

On a:

$$CdMx = \frac{0.35 \times 0.432 + 1.66 \times 0.432 + 1.29 \times 0.432 + 2.9 \times 0.216}{2 \times 0.35 + 2 \times 1.66 + 2 \times 1.29 + 2.9} = 0.216 \text{ m}$$

$$CdMy = \frac{2 \times (0.04 \times 0.35) + 2 \times (0.3627 \times 1.66) + 2 \times (0.9227 \times 1.29) + 1.275 \times 2.9}{2 \times 0.35 + 2 \times 1.66 + 2 \times 1.29 + 2.9} = 0.769 \text{ m}$$

Donc la position du center de masse du robot est 0.216m selon l'axe x et 0.77selon l'axe y. Maintenant on peut déterminer les angles des articulations durant un cycle de marche et les couple des moteurs.

Le robot basculé sur la droite par angle θ_1 jusqu'à la position d'équilibre choisie, et fait une rotation sur le genou droit et la cuisse droit du même angle de rotation θ_2 et θ_3 , figure 3-12 et figure 3-13.

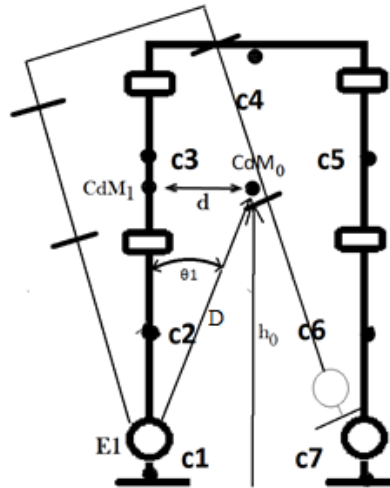


Figure 3-12 : Articulations de la cheville.

Pour déterminer θ_1 en utilise la fonction définie comme suit :

$$\tan \theta_1 = \frac{d}{h_0}$$

On a: $\tan \theta_1 = \frac{0.216}{0.769} = 0.28$

Soit $\tan \theta_1 = 0.28$, alors $\theta_1 = \tan^{-1} 0.28 = 15.68^\circ$

Calculer le couple nécessaire pour le moteur E1 :

On donne l'équation du couple par :

$$C = F_g \times D \text{ avec } F_g = M \times g$$

Où C : couple moteur (Nm) ;

F_g : force gravitationnelle (N) ;

D : longueur du bras de levier (m)

M : la masse (kg) ;

g : la gravité 9,8 N/kg

On a:

$$F_g = \text{masse des éléments du robot mobile} \times 9.81$$

$$F_g = 8.29 \times 9.81 = 81.32 \text{ N}$$

Pour CE1 : couple de moteur E1.

On donne la longueur du bras de levier : $D= 0.79 \text{ m}$

Soit $\sin \theta_1 = \frac{d}{D}$, alors $D= \frac{d}{\sin \theta_1} = 0.79 \text{ m}$

On a: $CE1 = 81.32 \times 0.79 = 64.24 \text{ Nm}$

Le couple des moteurs E4, E5 est déterminer de la même manière, on donne $\theta_2 = \theta_3$.

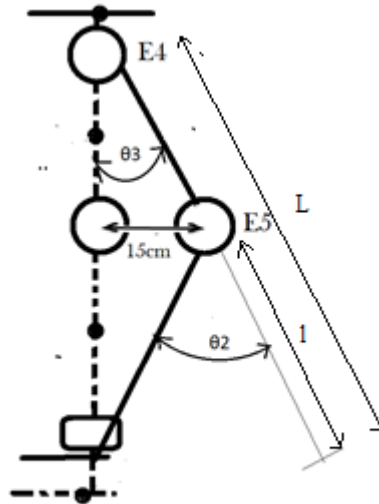


Figure 3-13 : Articulations du genou et le hanche.

On a: $\tan \theta_3 = \frac{0.15}{\text{longueur de cuisse}} = \frac{0.15}{0.5546} = 0.27$

Donc : $\theta_2 = \theta_3 = 15.13^\circ$

Calculer le couple nécessaire pour le moteur E4 :

$F_g = \text{masse}(\text{pied} + \text{jambe} + \text{cuisse} + \text{masse}(E5, E6)) \times 9.81$

On a: $F_g = 3.3 \times 9.81 = 32.37 \text{ N}$

On a: $CE4 = F_g \times L$

Où : $L = 0.08 + 0.5654 + 0.5546 = 1.2 \text{ m}$

Donc : $CE4 = 32.37 \times 1.2 = 38.84 \text{ Nm}$

Calcul du couple nécessaire pour le moteur E5

$F_g = \text{masse}(\text{pied} + \text{jambe} + E6) \times 9.81$

En déduire : $F_g = 2.01 \times 9.81 = 19.71 \text{ Nm}$

On donne : $CE_4 = F_g \times l$

Où : $l = 0.08 + 0.5654 = 0.6454 \text{ m}$

On a : $CE_5 = F_g \times l$

En déduire : $CE_5 = 19.71 \times 0.6454 = 12.72 \text{ Nm}$

Une fois le couple des moteurs E1, E4 et E5, déterminés on peut déduire le couple des moteur E6, E3 et E2 comme suit.

Moteur (module)	L'emplacement sur le robot	Le couple nécessaire(Nm)
E1 (RS230C)	Cheville droit	64.24
E2 (RS210L)	Genou droit	12.72
E3 (RS220F)	Hanche droit	38.84
E4 (RS220F)	Hanche gauche	38.84
E5 (RS210L)	Genou gauche	12.72
E6 (RS230C)	Cheville gauche	64.24

Tableau 3-5: Couple nécessaire des moteurs.

4. LA CONCEPTION 3D DU ROBOT

La conception du robot bipède se fait à l'aide du logiciel Autodesk 123D Design .Ce logiciel offre des outils très puissants à ceux qui veulent réaliser une conception mécanique intégrale. Le transfert du dessin sur un logiciel d'éléments finis donne l'opportunité au dessinateur de vérifier la résistance de sa conception et de la valider.

4.1 Présentation d'Autodesk 123D Design

Autodesk 123D est une application qui vous permettra de créer des modèles en 3D à partir de photos numériques. Précédemment connu en tant que Photo, son avantage principal est que c'est un service qui fonctionne en ligne, libérant votre ordinateur pour réaliser d'autres tâches.

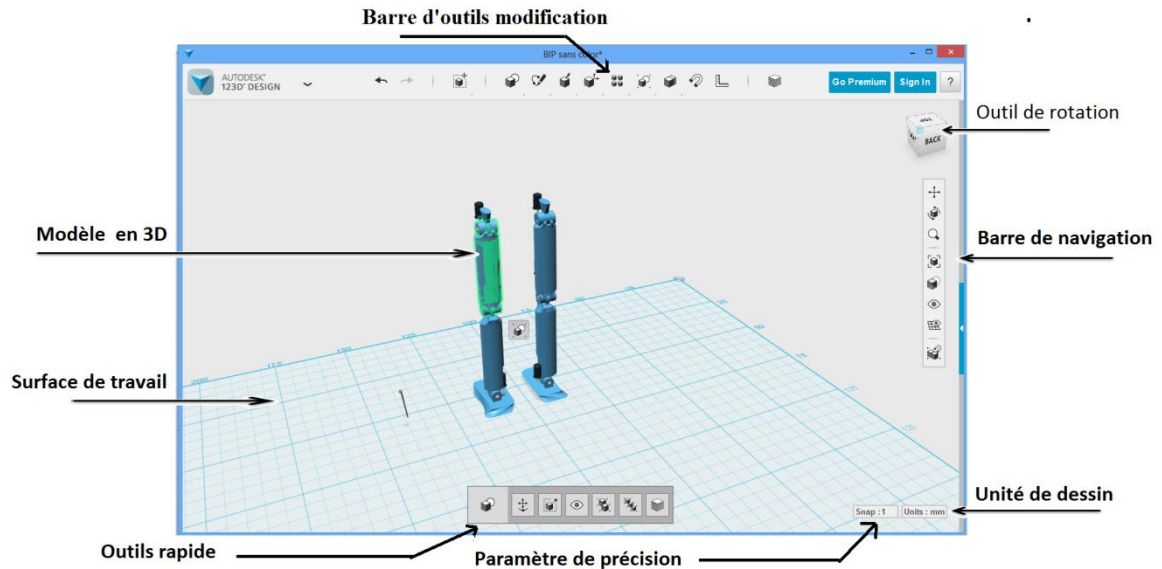


Figure 3-14 : Interface d'Autodesk 123D Design.

4.2 Conception des pièces

Les pièces se conforment à partir d'une esquisse dessinée sur un plan. Cette esquisse 2D est obtenue par des formes géométriques simples comme lignes et cercles. Une fois l'esquisse prête, le logiciel offre plusieurs fonctions à exécuter. On peut la prolonger vers une direction (extrusion), la faire tourner autour d'un axe ou réaliser plusieurs autres opérations. Comme cela, on obtient une pièce qui prend une troisième dimension. Cette pièce peut être modifiée à posteriori en changeant les paramètres de la fonction ou l'esquisse objet de la fonction. Chaque opération réalisée sur la pièce requière une esquisse.

Le dessin est paramétré, c'est-à-dire qu'on peut modéliser la forme souhaitée sans se préoccuper des dimensions exactes. Les dimensions des différentes pièces peuvent être liées de façon que lorsqu'une change, les autres changent aussi. Comme cela une petite variation d'une pièce n'entraîne pas la modification manuelle et laborieuse des autres pièces de l'ensemble.

Dans cette conception le premier choix à faire est celui de la motorisation. Les moteurs conditionnent la taille des pattes car ils seront logés dans la patte inférieure et la cuisse. Les dimensions obtenues permettent de faire un calcul des couples nécessaires et ainsi de vérifier si les moteurs choisis sont aptes pour l'application.

Un critère non technique lors du choix des moteurs est l'abondance et la qualité de l'information disponible sur Internet dont on peut disposer. Dans notre robot, les moteurs RS sont montés avec un réducteur de type "Harmonic Drive" pour les articulations de la cheville, le genou et la hanche comme montré ci-dessous à la figure 3-15.

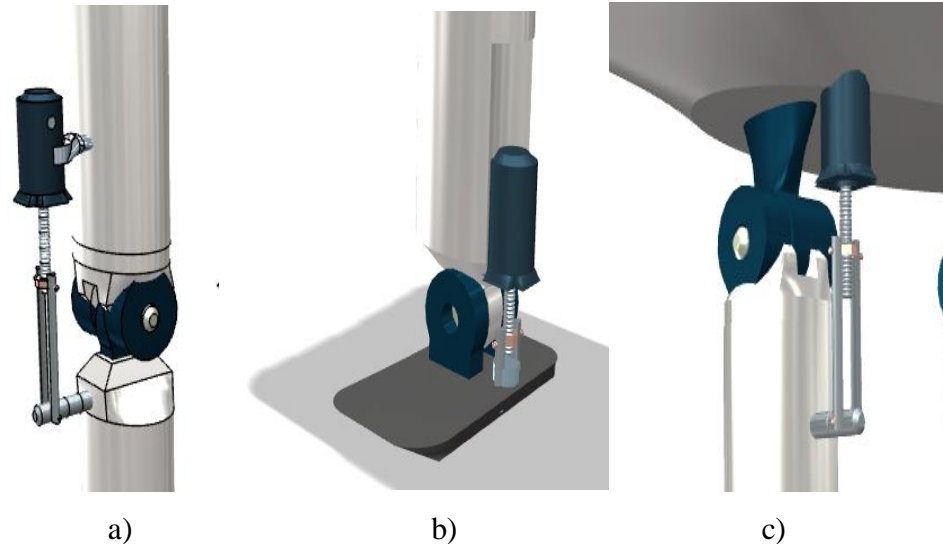


Figure 3-15 : *Aperçu de la conception des articulations a) genou, b) cheville, c) hanche.*

4.3L'assemblage

A mesure qu'on réalise les pièces, on peut les assembler dans un nouveau fichier qui contiendra seulement les contraintes et rapports qu'on a imposé aux pièces. Les contraintes définissent la position des pièces dans l'ensemble et les liaisons entre elles. On peut donc imposer que deux pièces soient concentriques, que deux surfaces soient coplanaires ou par exemple que la distance entre deux surfaces soit déterminée.

On peut créer un assemblage d'assemblages et ainsi construire des grands ensembles de façon structurée et ordonnée. La structure qu'on obtient est celle d'un arbre où des pièces font partie d'ensembles qui à la fois appartiennent à un ensemble plus grand. Si un changement est effectué sur une pièce individuelle, celle-ci va changer automatiquement dans l'assemblage de façon que l'on puisse voir l'effet de la modification dans l'ensemble.

Les différentes pièces ou ensembles peuvent avoir un mouvement relatif entre elles quand les contraintes leur permettent. Ceci est une aide à la conception car on peut prendre des mesures exactes de différentes positions et cela optimiser le design, comme à la figure 3-16 la mécanique est assemblée pour obtenir un aperçu définitif du robot.



Figure 3-16 : *Aperçu définitif du robot.*

5. CONCLUSION

Plusieurs exemples de dimensionnement permettent d'introduire la notion nouvelle d'articulations fonctionnellement équivalentes et de faire le lien entre le dimensionnement des articulations et le reste de la démarche de conception.

Le concept des articulations fonctionnellement équivalentes permet de mettre en évidence l'importance des choix du concepteur. Il est possible de concevoir un robot qui peut se déplacer dans le plan grâce à la rotation de ses genoux et hanches qui permettent la flexion/extension dans le plan sagittal. La rotation des chevilles permettant l'abduction/adduction dans le plan frontal et ainsi le maintien de l'équilibre latéral.

La conception de la patte adopte une forme qui permet au robot le déplacement et l'équilibre indépendant.

CHAPITRE 4

LA CONCEPTION ELECTRONIQUE ET INFORMATIQUE DU ROBOT

1. INTRODUCTION

La conception électrique et électronique doit débiter avec le choix de l'architecture. Le choix de l'architecture du système électrique et électronique constitue en fait l'identification de toutes les composantes qui formeront le système.

L'électronique de contrôle correspond en quelque sorte au système nerveux du robot. Elle doit être constituée dans un premier temps d'une unité de traitement informatique (microcontrôleur) qui permet d'implanter les différents algorithmes désirés. Ensuite, un système permettant l'asservissement des moteurs doit être utilisé. Ce système est généralement constitué d'un contrôleur de moteurs effectuant l'asservissement (ce contrôleur pourrait aussi être implanté dans le logiciel), de circuits électroniques permettant l'acquisition des encodeurs des moteurs (ou autres capteurs permettant de fermer la boucle de contrôle) et de générer les signaux de commande appropriés et finalement de circuits amplificateurs permettant de transmettre la commande désirée aux moteurs. Ensuite, il est nécessaire d'incorporer un système sensoriel au robot : les capteurs.

Généralement, des cartes d'entrées/sorties analogiques et/ou numériques peuvent être utilisées. Il est alors possible d'incorporer au robot une multitude de capteurs utiles.

On doit choisir les éléments de base qui permettent d'obtenir un système électronique modulaire pour le robot.

2. STRUCTURE GENERALE DE LA COMMANDE

La figure 4-1 présente la structure du système électrique et électronique du robot. Les prochaines pages décrivent chacun des éléments de cette structure, ainsi que les entrées/sorties entre chaque élément.

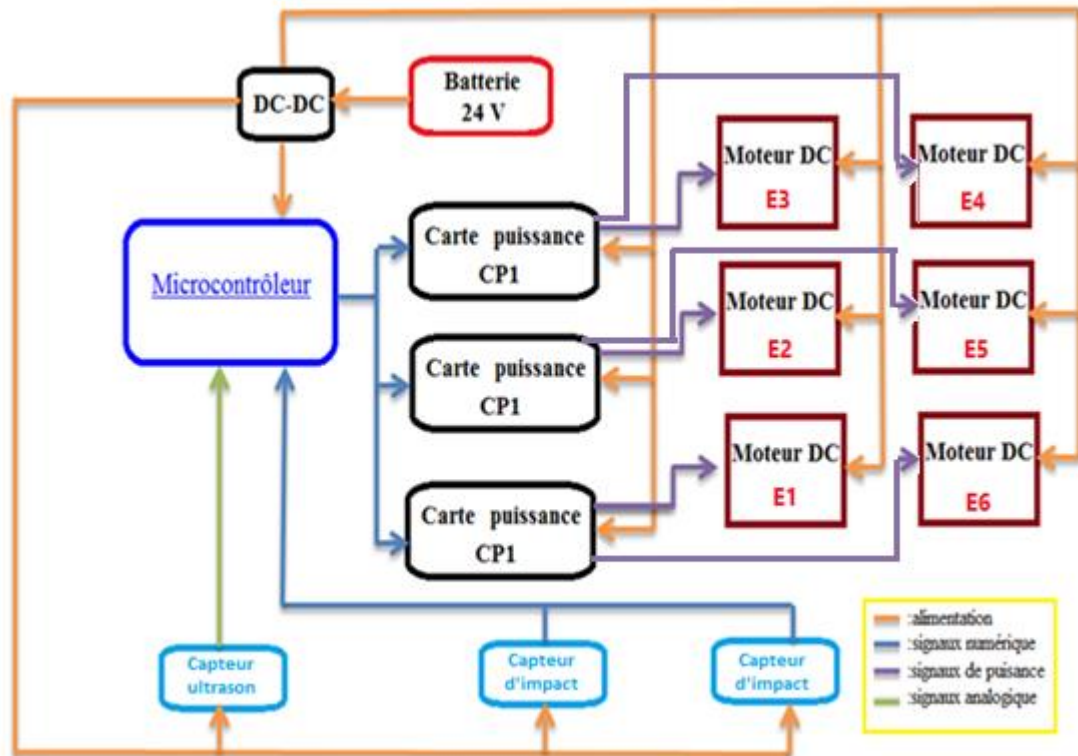


Figure 4-1 : Structure électrique et électronique du robot.

3. LES ELEMENTS ELECTRONIQUES

3.1 Carte alimentation

Nos besoins sont les suivants : pouvoir fournir une tension d'alimentation à tous les composants et qu'elle soit suffisamment puissante, donc adaptée.

Les différentes tensions nécessaires sont ainsi définies :

- Microcontrôleur : 5 Volts ;
- Carte de puissance : 12 Volts
- Moteurs : 12 Volts ;
- Capteur Ultrason : 12 Volts ;
- Capteur d'impact : 5 Volts

La figure 4-2 montre le schéma structurel de la carte d'alimentation.

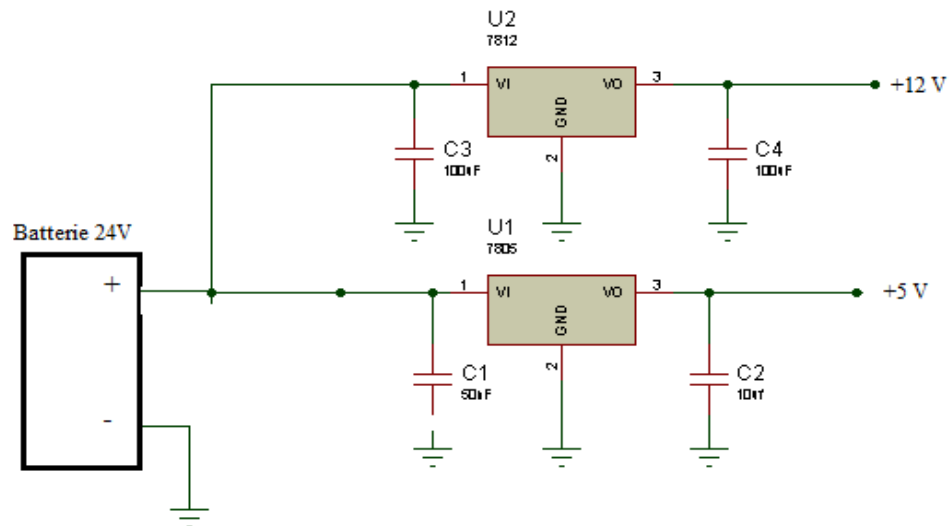


Figure 4-2 : Schéma de la carte d'alimentation.

3.1.1 Les régulateurs

Le premier régulateur est un 7805, il permet la régulation d'une tension environ égale à 24V en une tension de sortie égale à 5V.

Le second régulateur est un 7812, il permet la régulation d'une tension environ égale à 24V en une tension de sortie égale à 12V.

3.2 Commutateur de puissance ULN2803

Ce circuit très répandu et bon marché est au format DIL 18 est constitué de 8 étages d'amplification inverseur : chaque étage peut-être commandé par une entrée numérique et peut fournir 500mA en sortie, sous une tension pouvant aller jusque à 50V [21].

Le brochage de ce CI est très simple et très pratique :

- 2 broches d'alimentation : 0V (broche 9) et V+ (broche 10).
- 8 broches d'entrées de commande numérique (1 à 8) face chacune à une broche de sortie de puissance (10 à 18)

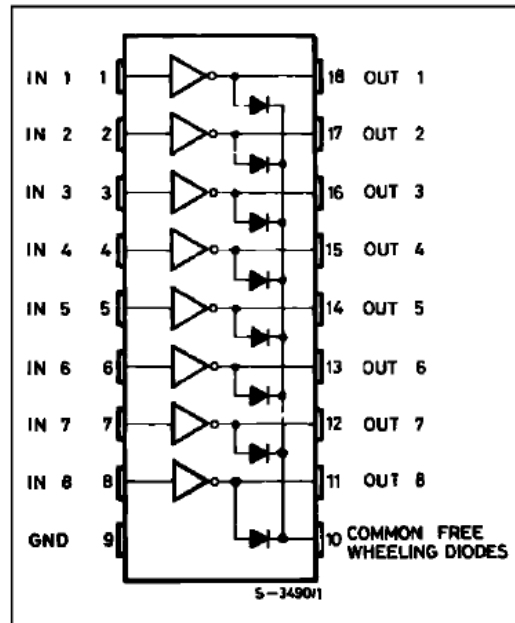


Figure 4-3 : Schéma del'ULN2803 [13].

Pour chaque étage d'amplification :

- l'entrée est compatible avec les niveaux des circuits numériques TTL/CMOS
- la sortie peut fournir une intensité de 500mA par étage, sous une tension de 5V pouvant aller jusqu'à 50V.

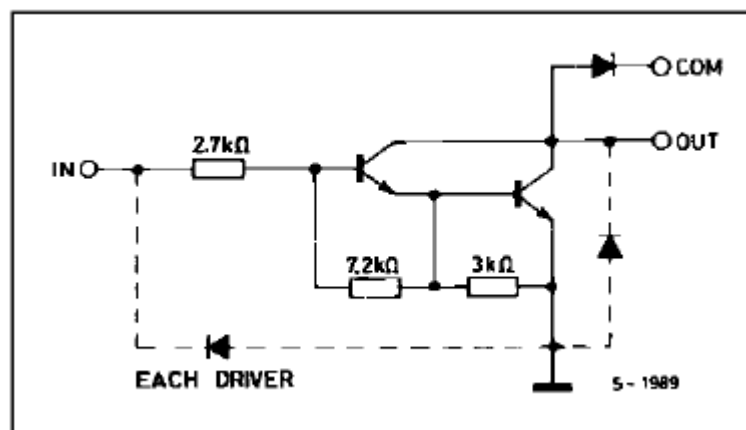


Figure 4-4 : Brochage interne du circuit ULN2803 [13].

Le fonctionnement est très simple. Pour chaque étage, on a:

Entrée numérique	Sortie	Etat
HAUT	0 V	MARCHE
BAS	V+	ARRET

Tableau 4-1 : l'état de fonctionnement du circuit ULN2803.

Ainsi, la sortie de puissance est le reflet inversé de l'entrée de commande et l'élément électrique commandé est en MARCHE sur le niveau BAS. Il n'est pas possible de commander l'élément électrique par un niveau HAUT, en connectant l'élément entre la sortie et le 0V. Ceci limite le fonctionnement de l'ULN2803 à un fonctionnement ON/OFF

3.3 Les Moteurs pas à pas unipolaire

Les moteurs pas à pas sont des moteurs dont l'axe tourne d'un angle $\Delta\phi = 2.\pi/p$ pour une impulsion de commande. p est le nombre de pas de valeurs courantes 48, 100, **200** (jusqu'à 1000 pas/tr) [19]. Le nombre de pas indique que le rotor fera 1 tour pour p impulsions de commande.

Ce moteur apparaît comme une interface numérique-mécanique idéale car il est commandé par des impulsions ou des états logiques. Contrairement aux autres moteurs, où la rotation est continue, la rotation est discrète et saccadée. Ils sont constitués d'un rotor et d'un stator composé d'une multitude de bobines alimentées par une tension continue. Comme représenté à la figure 4-5.

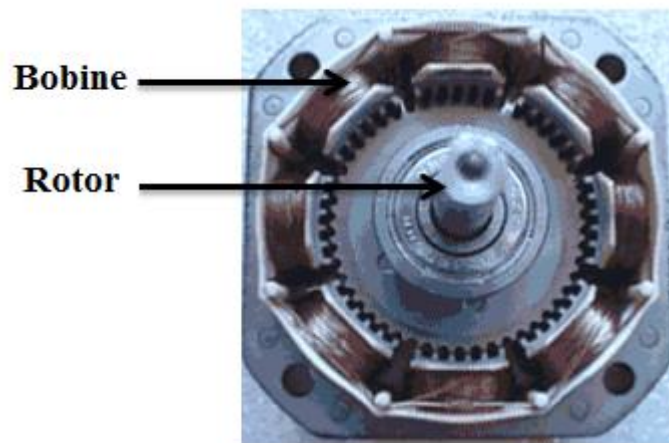


Figure 4-5 : *Présentation d'un Moteur pas à pas.*

3.3.1 Fonctionnement d'un moteur pas à pas [22]

La figure 4-6 montre le schéma électromécanique d'un moteur pas à pas bipolaire à 4 pas par tours. A, B, C et D, sont des électro-aimants qui constituent le stator. Le rotor est un simple dipôle magnétique (aimant permanent). Si A est soumis à une tension positive, la position stable sera l'alignement Nord-Sud indiqué. Si maintenant la bobine B est soumise à une tension positive (et A à une tension nulle), la position stable du rotor aura tourné de 90° . Le rotor a avancé d'un pas.

Pour le prochain pas on alimentera C puis D à une tension positive, avec une tension nulle aux bornes de A, B et une tension nulle pour C si on alimenté la bobine D, et ainsi de suite. Le rotor tourne dans le sens horaire. Si on veut le faire tourner dans le sens trigonométrique, il suffit d'inverser la séquence précédente. Notons aussi que tant qu'une bobine est alimentée, le stator est fixé dans une position : le stator est bloqué, il faut un couple important extérieur pour l'en déplacer.

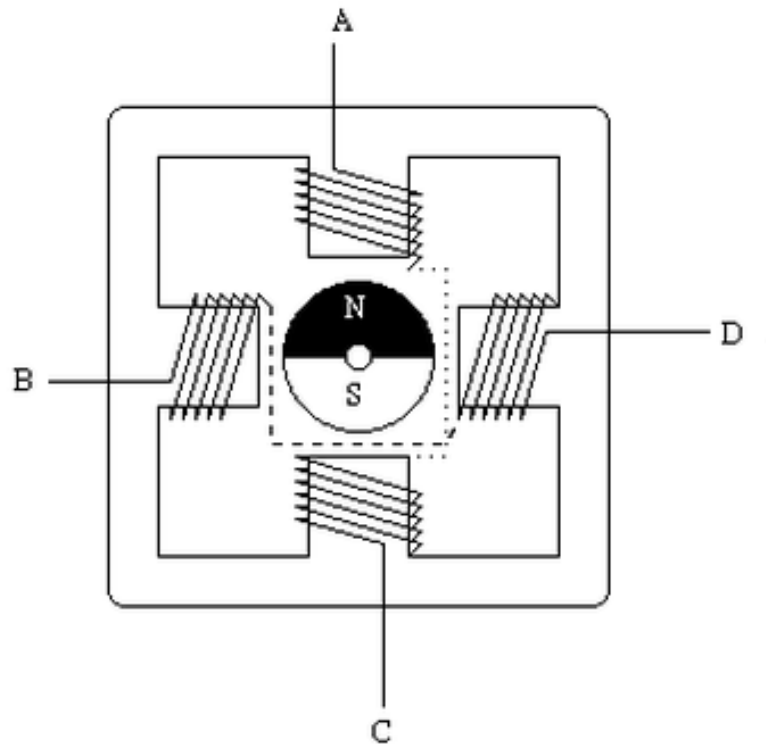


Figure 4-6 : Schéma électromécanique d'un moteur pas à pas bipolaire.

3.4 Les capteurs

3.4.1 Capteur ultrason FESTO177469

Les capteurs ultrasons fonctionnent en mesurant le temps de retour d'une onde sonore inaudible par l'homme émise par le capteur. La vitesse du son étant à peu près stable, on en déduit la distance à l'obstacle.

L'émetteur et le récepteur sont situés dans le même boîtier.

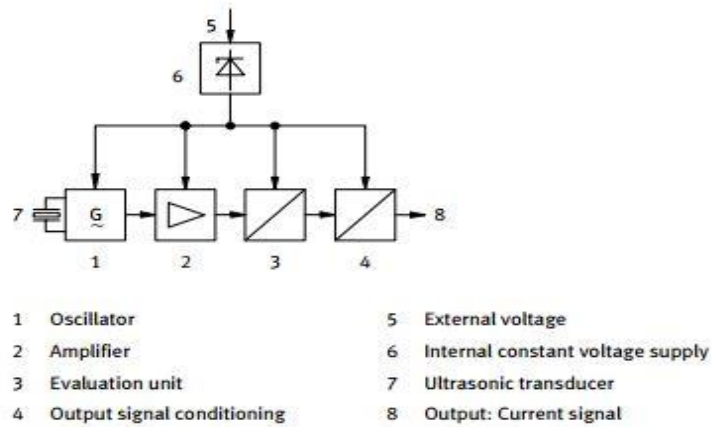


Figure 4-7 : Schéma interne de capteur FESTO177469 [14].



Figure 4-8 : Présentation de capteur ultrason FESTO177469 [14]

L'émetteur envoie un train d'ondes qui va se réfléchir sur l'objet à détecter et ensuite revenir à la source. Le temps mis pour parcourir un aller-retour permet de déterminer la distance de l'objet par rapport à la source. Plus l'objet sera loin plus il faudra longtemps pour que le signal revienne (voir figure 4-9).

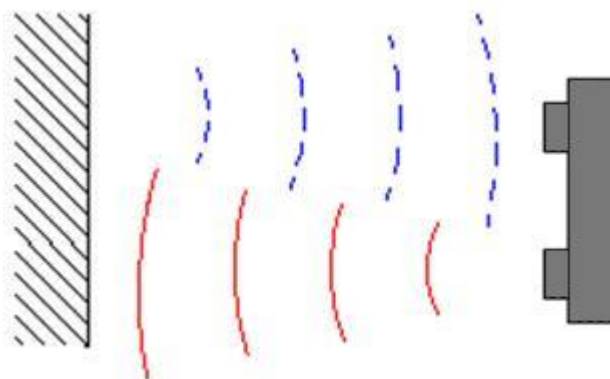


Figure 4-9 : Fonctionnement du capteur ultrason.

3.4.2 Capteur Micro Switch

Un micro rupteur type "Micro Switch" ou "fin de course" est un interrupteur miniature utilisé comme capteurs de contact, pour les fins de courses et autres ouvertures de portes.

D'un point de vue électronique, il est équivalent à un interrupteur à trois positions ou "Toggle Switch" dans les logiciels d'électroniques en anglais.

On trouve généralement 3 dimensions [15] :

- standard (30x20x10 mm)
- miniatures (20x10x6 mm)
- subminiature (13x6x6 mm)

Et de 3 sortes :

- avec levier (languette)
- sans levier (juste le poussoir)
- avec levier et roulette



Figure 4-10 : *Présentation de capteur Micro Switch [15].*

3.5 Microcontrôleur :

Le PIC16F877 est un microcontrôleur de Microchip. Ce contrôleur est largement utilisé pour des applications expérimentales et modernes en raison de son faible prix, une large gamme d'applications, de haute qualité et facilité d'accès. Il est idéal pour la conception électronique du robot. Le PIC 16F877 dispose de tous les éléments que les microcontrôleurs modernes ont normalement. Figure 4-11.

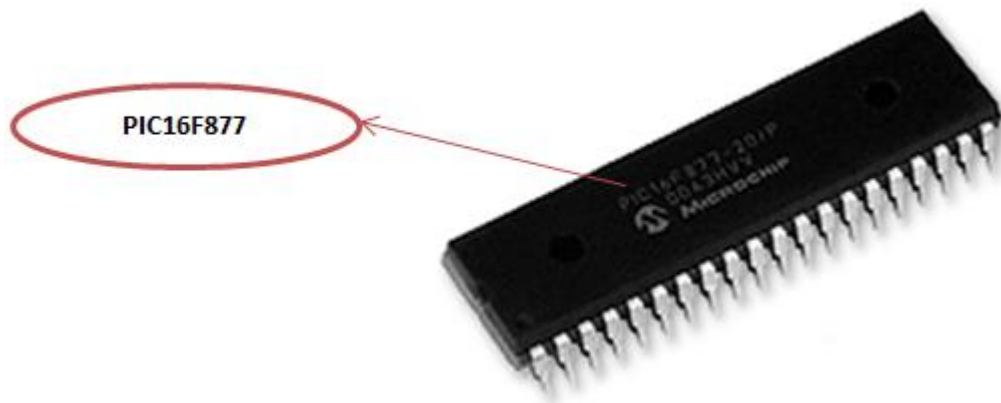


Figure 4-11 : *Présentation de PIC16F877.*

Le numéro 16 signifie qu'il fait partie de la famille "MID-RANGE". C'est un microcontrôleur de la famille 8 bits. Cela veut dire que l'ALU (Arithmetic and Logic Unit ou Unit Arithmétique et Logique en français) traite naturellement des mots de 8 bits maximum. La lettre F indique que la mémoire programme de ce PIC est de type "Flash". Chaque ligne de mémoire est un mot de 14 bits. Les trois derniers chiffres permettent d'identifier précisément le PIC, ici c'est un PIC de type 877.

La référence 16F877 peut avoir un suffixe du type "-XX" dans lequel XX représente la fréquence d'horloge maximale que le PIC peut recevoir.

La série PIC16FXX dispose de fonctionnalités plus avancées et développées par rapport à la série précédente. Les caractéristiques importantes de la série PIC16F877 est donnée ci-dessous.

- fréquence de fonctionnement maximale est de 20MHz.
- 35 instructions (composant RISC),
- 8Ko de mémoire Flash interne pour le programme,
- 368 octets de RAM,
- 256 octets de d'EEPROM,
- 2 compteur/ timer de 8 bits,
- 1 compteur/ timer de 16 bits.
- 15 sources d'interruption,
- 8 entrées configurables en entrées analogiques,
- Une tension d'alimentation entre 2 et 5.5 V.
- un mode SLEEP.

- 33 entrées/sorties numériques configurables individuellement, disposés en 5 ports nommés de A à E,
- **PORTA** : 6 entrées -sorties. 5 entrées du CAN. Entrée CLK du Timer 0.
 - **PORTB** : 8 entrées-sorties. 1 entrée interruption extérieure. CLK et Data pour programmation.
 - **PORTC** : 8 entrées-sorties. CLK Timer1 et PWM1. USART. I2C.
 - **PORTD** : 8 entrées-sorties. Port interface microprocesseur (8 bits data).
 - **PORTE** : 3 entrées-sorties. 3 bits de contrôle interface microprocesseur. 3 entrées du CAN.

La puce du PIC16F877 est disponible en différents types de forfaits. Selon le type d'application et d'utilisation, ces forfaits sont différenciés. Le brochage d'une puce PIC16F877 est présenté dans la figure 4-12. Il existe différents PIC selon leur fréquence maximale de fonctionnement (4 MHz ou 20 MHz). Le PIC fonctionne à n'importe quelle fréquence en dessous de cette fréquence maximale (DC à Fmax). Un cycle instruction du PIC fonctionne sur le quart de l'horloge externe.

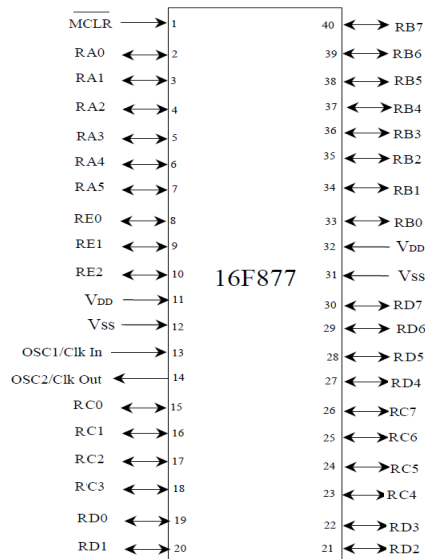


Figure 4-12 : Brochage du PIC16F877 [16].

3.5.1 L'horloge

Les pins OSC1/CLOCKIN et OSC2/CLOCKOUT sont les pattes d'horloges. Plusieurs types d'horloges peuvent être utilisés : horloge externe, à quartz ou à circuit RC. La figure 4-13 (a, b et c) montre les schémas de câblage en version RC et quartz. L'oscillateur à quartz présente une meilleure précision que l'oscillateur RC.

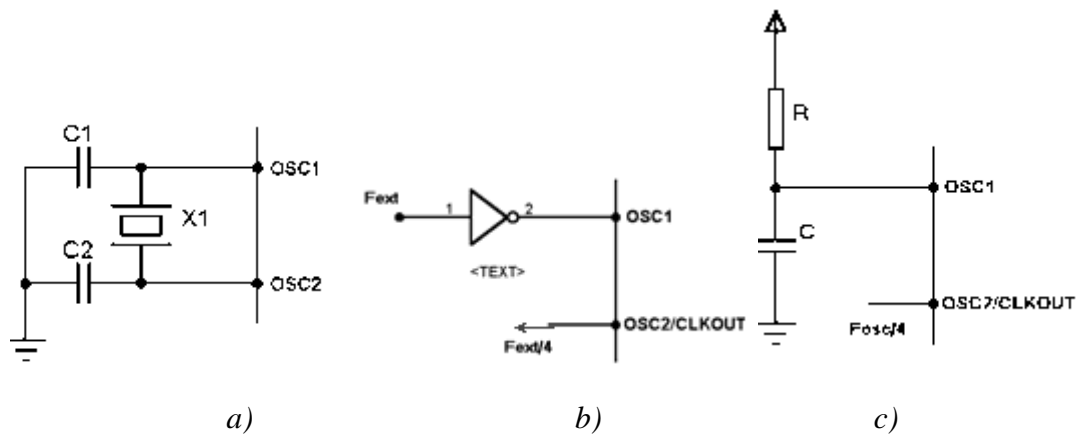


Figure 4-13 : Types d'horloges a) Oscillateur à Quartz .b) Horloge externe.
d) Oscillateur RC.

Le schéma est très simple, un 16F877, un quartz de 20 Mhz et deux condensateurs (voir figure4-14).

La valeur recommandée pour les deux condensateurs C1 et C2 dépend du PIC16F877 et du quartz de 20Mhz se situent entre 15 pF et 33 pF. Une valeur plus élevée assure une plus grande stabilité mais conduit à un temps de démarrage un poil plus long. Les deux broches OSC1 et OSC2 étant monopolisées pour la fonction d'oscillateur avec quartz externe, elles ne peuvent pas être utilisées en tant qu'entrées ou sorties logiques.

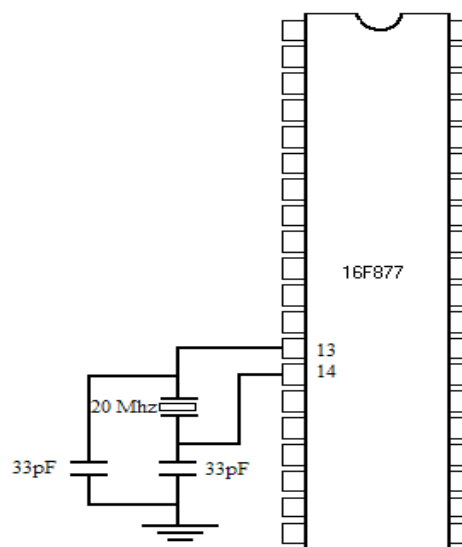


Figure 4-14: brochage de l'horloge de PIC16F877.

4. STRUCTURE GENERALE DE LA CARTE DE COMMANDE

4.1 Électronique de commande motrice

Pour faire tourner le moteur bipolaire donc il faut connecter au circuit de puissance ULN2803 par 4 fils (A, B, C, D), et 2 points communs sont reliés à la masse. Si on code l'alimentation des fils A, B, C, D par un bit (1 pour +Vpp et 0 pour la masse), on peut résumer un cycle de rotation par le tableau 4-2.

	ABCD	ABCD	ABCD	ABCD
Rotation droit	1000	0100	0010	0001
Rotation gauche	0001	0010	0100	1000

Tableau 4-2 : Cycle de rotation du moteur pas à pas.

Il est assez aisé de produire la séquence de bits nécessaire au fonctionnement du moteur. Dans la plupart des cas, c'est en effet le microcontrôleur PIC16F877 qui la produira, par simple rotation de bits dans un octet par des instructions.

La figure 4-15 présente une solution simple pour command un moteurs par ULN2803.

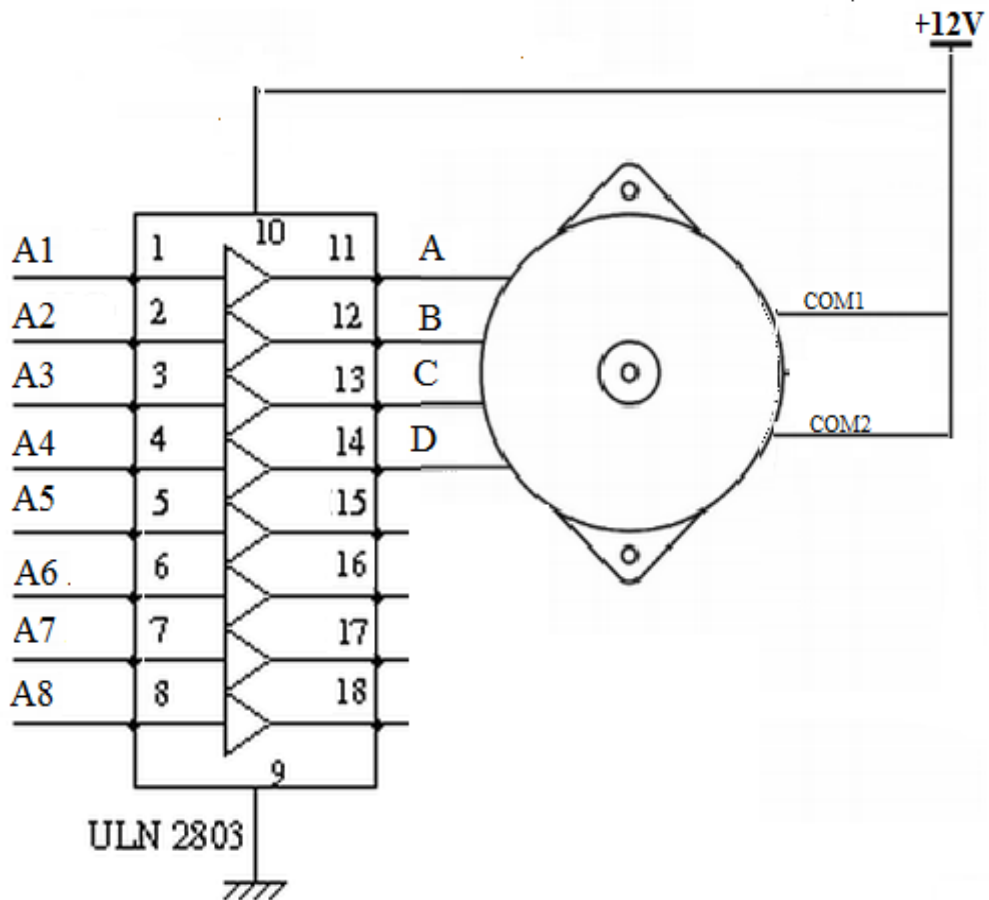


Figure 4-15 : Command un moteur pas à pas par ULN2803.

L'ULN 2803 contient 8 Darlingtons [20] de puissance et des diodes de protections.

Celles-ci, connectées entre les pins 11 à 18 et le pin 10 permettent d'éviter les courts circuits les surtensions produites par les variations brusques de courant aux bornes des bobines du moteur. Chaque Darlington peut supporter jusqu'à 500mA, ce qui suffit pour des moteurs pas à pas de puissance usuelle. Les risques d'échauffements sont minimes, puisque les transistors fonctionnent en interrupteurs.

La figure 4-16 présente un montage qui permet d'alimenter deux moteurs pas à pas consommant jusqu'à 1A par bobine. Les résistances R1 à R8 permettent une protection de l'ULN2803 en cas de court-circuit.

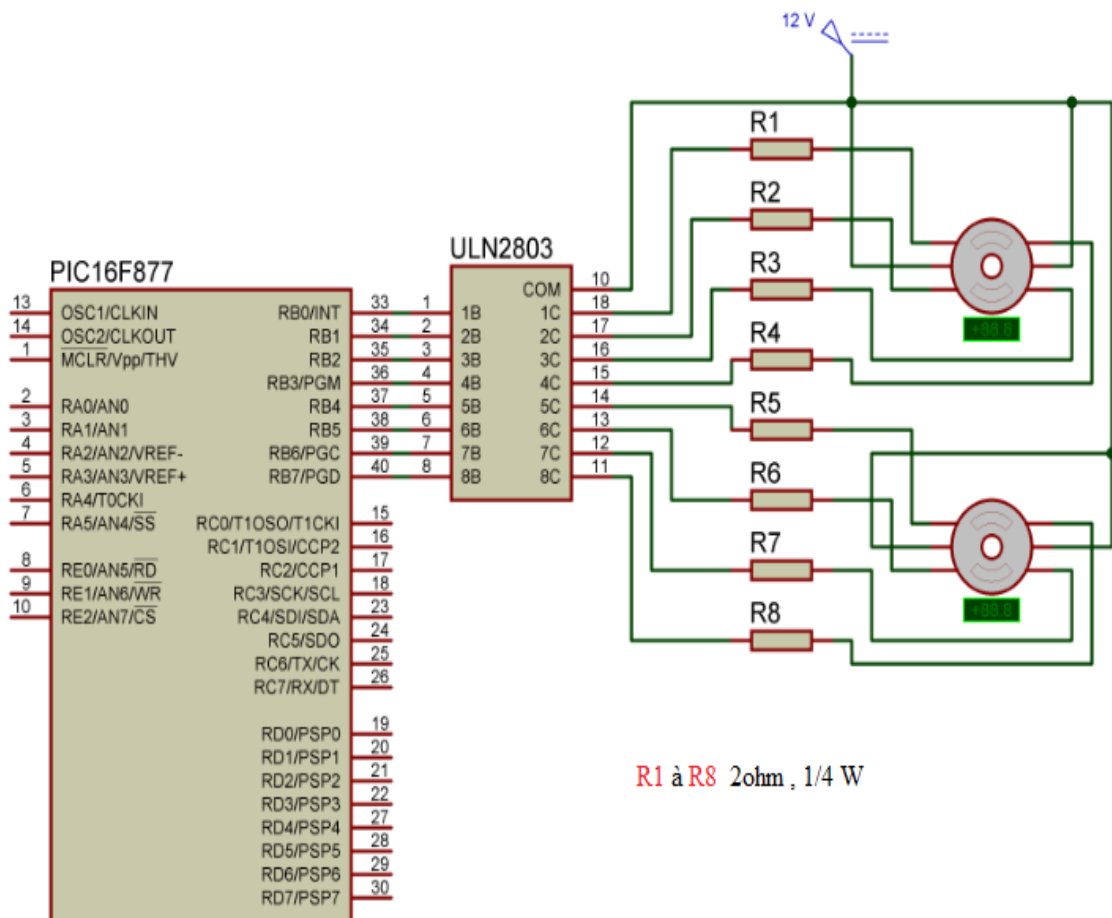


Figure 4-16 : Brochage l'ULN2803 avec 2 moteurs pas à pas.

Un seul ULN 2803 peut ainsi commander deux moteurs pas à pas, et pour le robot à 6 moteurs d'articulation, donc il faut ajouter 2 circuits d'ULN2803 pour commander le mécanisme du robot.

La figure 4-17 illustre le brochage de la carte mère.

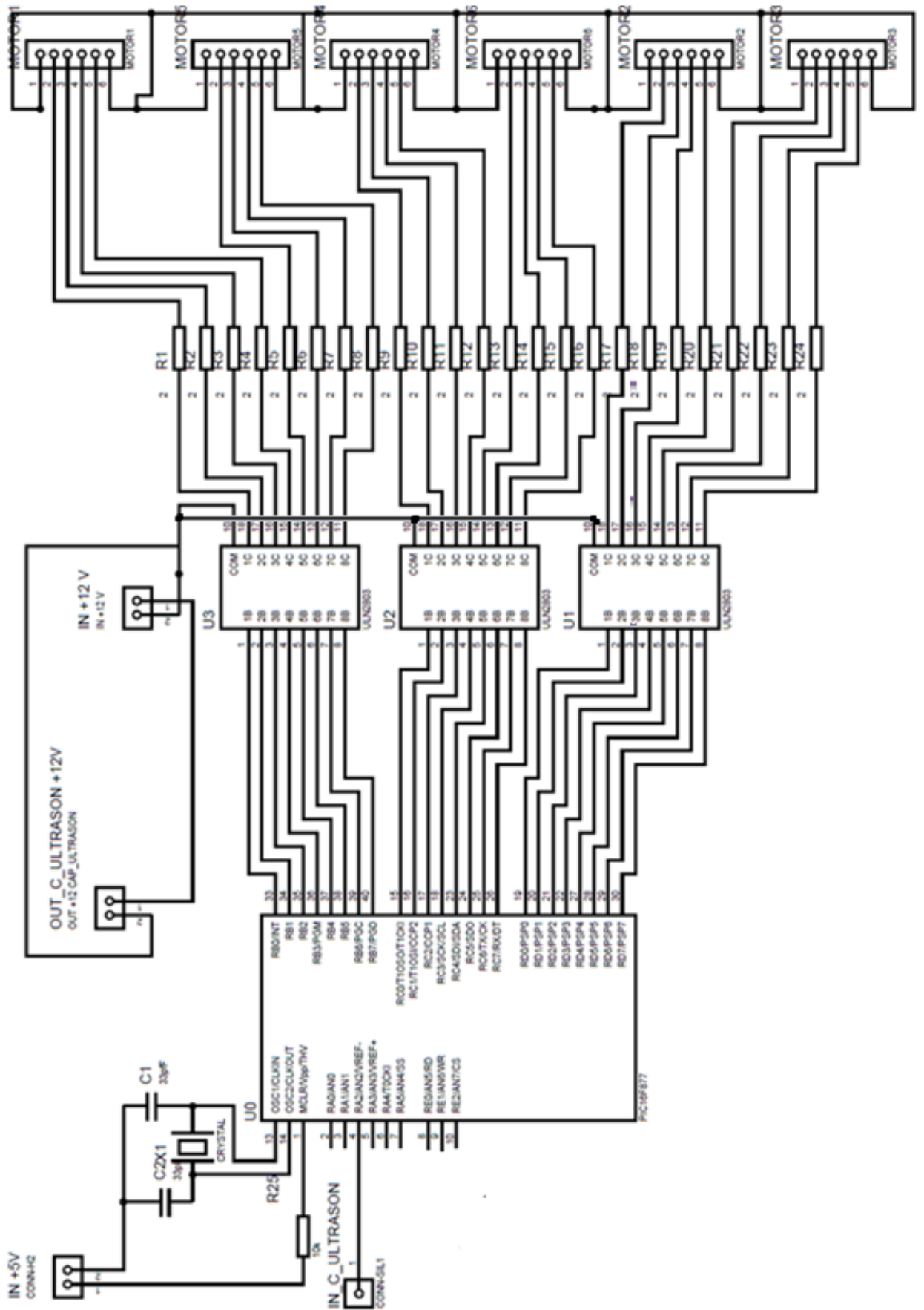


Figure 4-17 : brochage de la carte mère.

4.2 Caractéristique et brochage des capteurs

4.2.1 Brochage du capteur ultrason FESTO177469

Dans le graphe ci-dessous on peut voir que la tension de sortie est de 0,4V pour un obstacle à une distance de 10 cm et de 2,4V pour un obstacle à 80 cm. On observe un écart de 2V entre la tension maximale et la tension minimale ce qui fait que la différence de tension pour 1 cm est de 29mV. Cette valeur étant faible, il est possible, qu'il y ait des imprécisions au niveau de la mesure de distance. Ce capteur renvoie donc un signal analogique qui varie en fonction de la distance de l'obstacle. Il faut donc convertir ce signal à l'aide d'un convertisseur analogique numérique pour pouvoir traiter l'information plus facilement avec le PIC16F877.

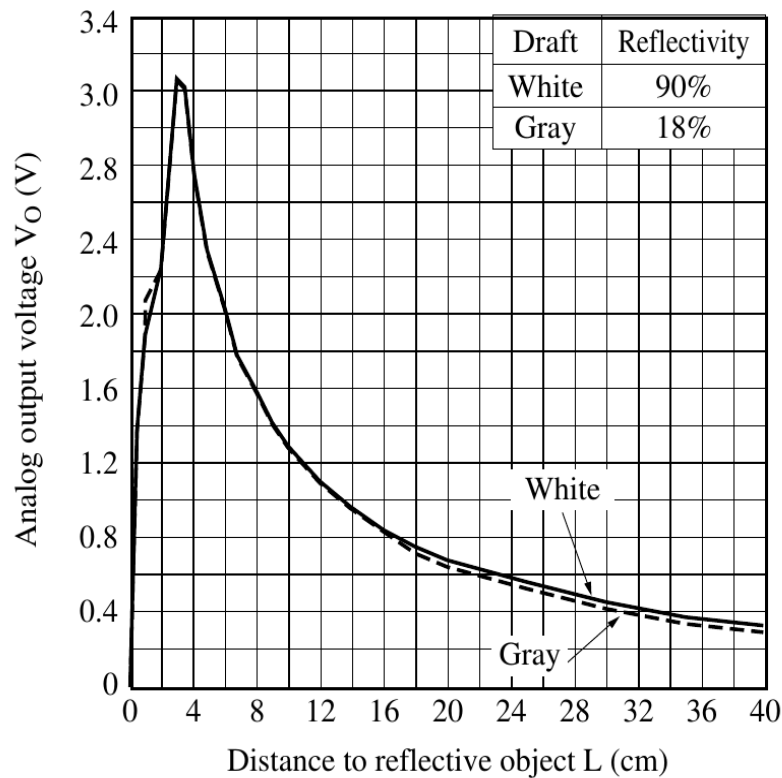


Figure 4-18 : Variation de tension de sortie en fonction de la distance de l'obstacle.[17]

On peut voir ci-dessous le brochage du module à ultrasons.

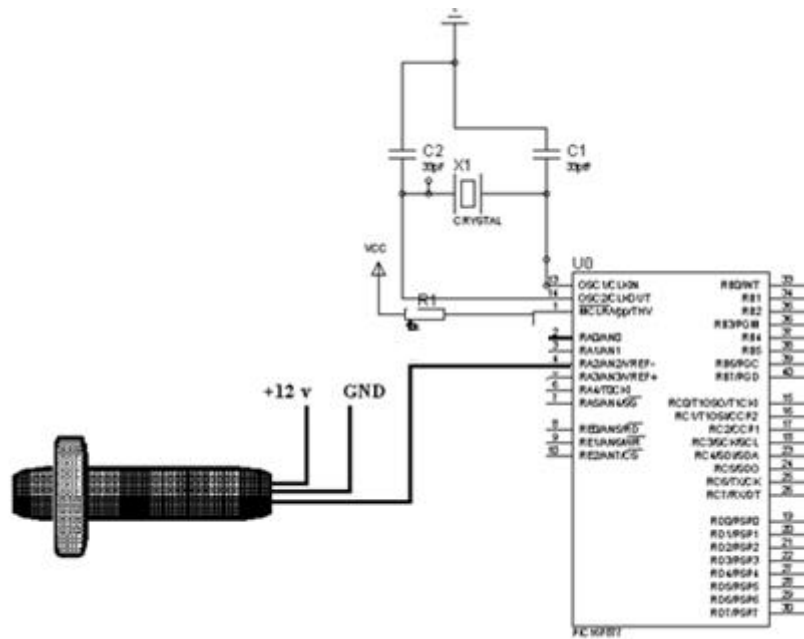


Figure 4-19 : Brochage du module à ultrasons.

4.2.2 Brochage du Capteur Micro Switch

Ce montage qui consiste à relier l'alimentation 5 volts à l'entrée du microcontrôleur PIC16F877 à travers l'interrupteur, soit la 2ème et la 3ème patte du port A.

Ainsi, le port reçoit un niveau haut quand l'interrupteur est enfoncé et un niveau bas quand l'interrupteur est relâché.

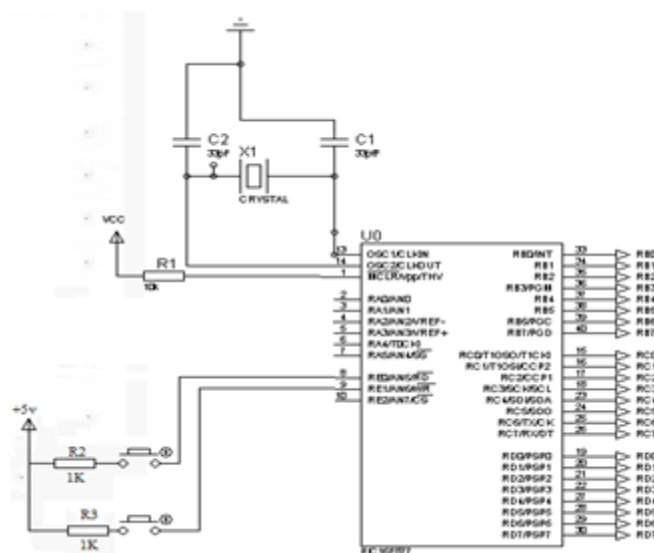


Figure 4-20 : Brochage de capteur Micro Switch.

L'emplacement de ce capteur est le pied du robot, A cet emplacement, il peut nous fournir des informations sur l'inclinaison du sol, lorsque le pied est posé.

4.2.3 Perspective d'utilisation des capteurs sous le robot

Ces capteurs sont tout simplement des fin de courses destinés à arrêter le systèmes avant les butées mécanique afin de protéger l'ensemble du système en cas de dysfonctionnement. Ils sont situés sur les membres aux extrémités des vis sans fin.

5. PROGRAMMATION DU PIC16F877

La version qui sera utilisé appelée "MikroC PRO" dispose de très nombreuses améliorations: nouvelles variables utilisables, nouvelle interface IDE, amélioration des performances du linker et de l'optimisateur, cycle de compilation plus rapide, code machine généré plus compact (jusqu'à 40 % suivant les cas), nouveaux PIC supportés, environnement de développement encore plus ergonomique, nouveaux exemples d'applications, etc...

5.1 Présentation de l'environnement de travail sous MikroC

MikroC diffère des autres langages classiques tels que pascal ou fortran. Dans ces derniers, on doit directement écrire des instructions l'une à la suite de l'autre jusqu'à la fin.

MikroC ressemble plus à un atelier où l'on dispose d'une boîte à outils et d'un ensemble d'objets qui servent à fabriquer une application. Ainsi Sous MikroC on n'écrit pas une application mais on la fabrique.

C'est sur la figure 4-21 que vous obtenez lorsque vous démarrez l'IDE MikroC *PRO* pour la première fois.

Une description détaillé de toutes les options disponibles dans ce compilateur prendre trop de temps, de sorte que nous allions sauter cette étape. Au lieu de cela, nous allons décrire seulement le processus d'écriture d'un programme en langage *mikroC*, un simulateur de contrôle.

5.1.1 Editeur de code

L'éditeur de code est le même que toute éditeur de texte standard pour l'environnement de Windows, y compris Copie, Coller, Annuler les actions etc... Il possède en plus des ressources comme suit :

- Coloration syntaxique réglable
- Assistant de code
- Assistant de paramètre

- Mise en forme automatique

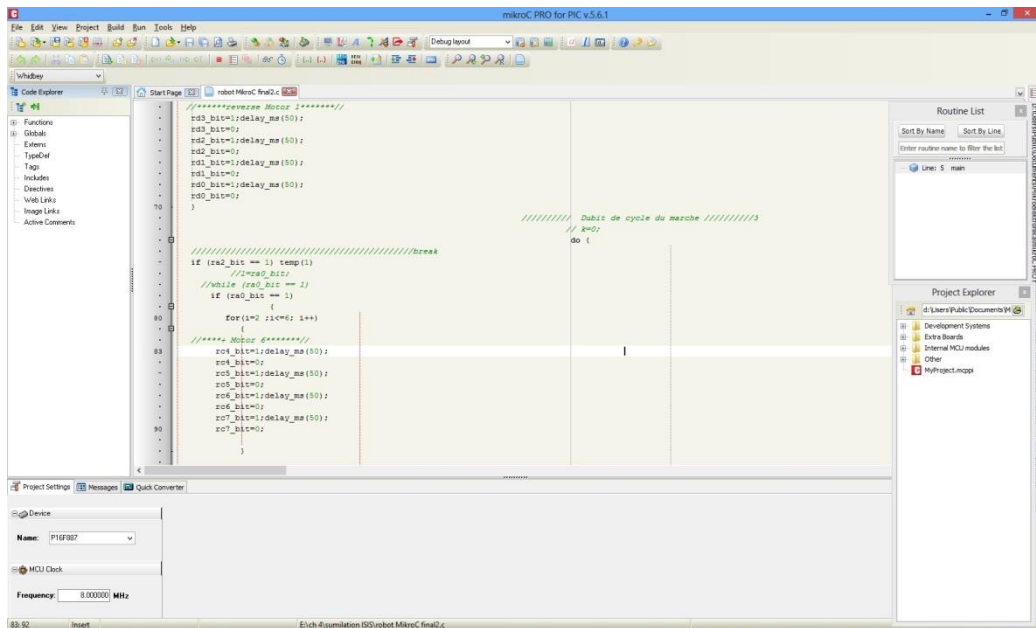


Figure 4-21 :L'environnement IDE du compilateur MikroC PRO.

5.1.2 Outils intégrés

Le compilateur "MikroC PRO" pour PIC intègre différents petits outils très pratiques qui vous simplifieront l'écriture des programmes de vos applications.

➤ Mini terminal USART

Le "MikroC PRO" intègre un petit terminal de communication USARTRS-232(Universal Synchronous Asynchronous Receiver) pour lequel vous pourrez configurer le débit, les commandes RTS et DTR....

➤ Minigestionnaire7segments

Le "MikroC PRO" intègre un petit utilitaire qui vous permettra de sélectionner la valeur décimale ou hexadécimale à fournir pour piloter un afficheur 7 segments.

➤ Table de conversion ASCII

Le "MikroC PRO" intègre un petit utilitaire qui vous permettra d'afficher une table de conversion ASCII (très utile lorsque vous travaillez avec des afficheurs LCD).

➤ Gestion des LCD graphiques

Le "MikroC PRO" intègre un petit utilitaire qui vous permettra de convertir des fichiers BMP en données pouvant être affichées sur plusieurs types de LCD graphiques.

5.2 Les étapes de l'assistant de projet

On commence à créer un nouveau projet, en cliquant sur le bouton *Next*:



Figure 4-22 : étape de l'assistant de projet à MikroC.

- **Premier pas** : Sélectionnez le périphérique la liste déroulante.
- **Deuxième pas** : Spécifiez la valeur de fréquence de l'oscillateur 20Mhz.
- **Troisième pas** : Spécifiez l'emplacement où votre projet sera enregistré.

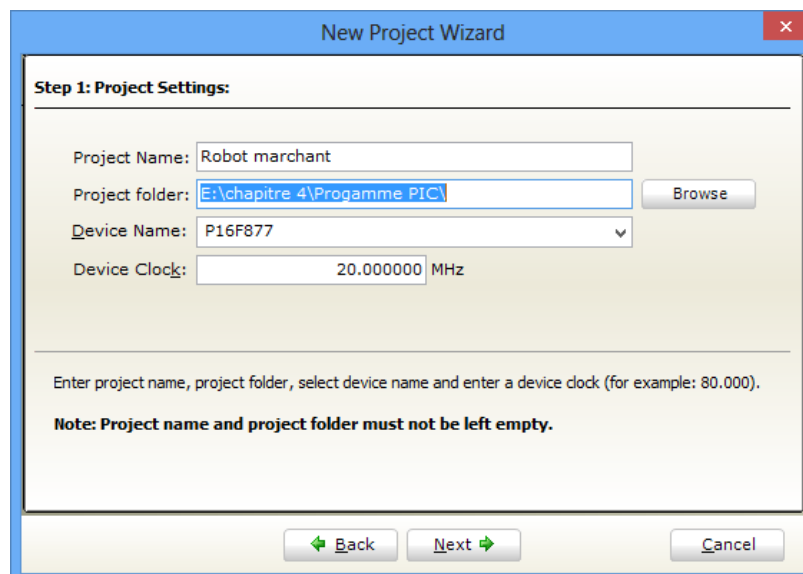


Figure 4-23 : paramètres de l'assistant de projet à MikroC.

Quatrième pas : Cliquez sur *Finish* pour créer votre nouveau projet.

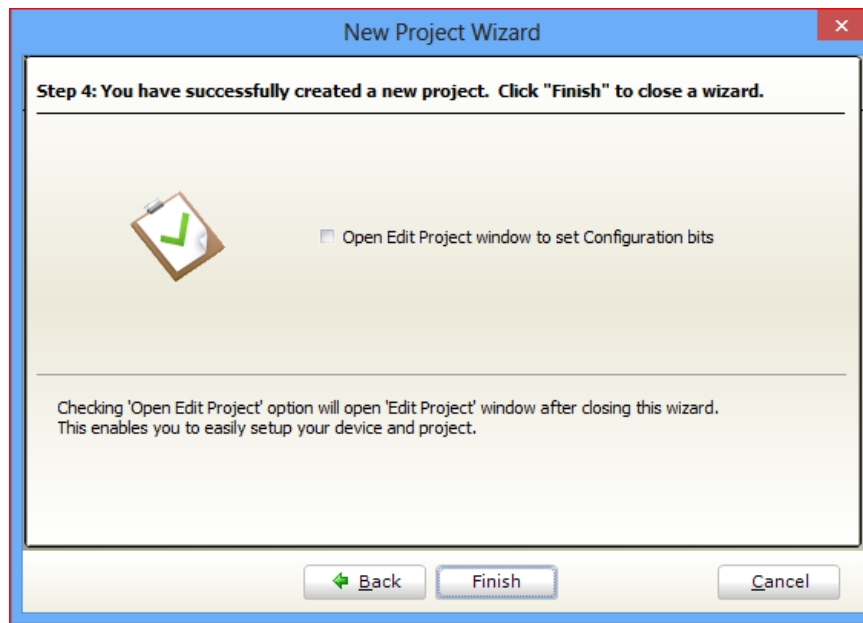


Figure 4-24 : La dernière étape de l'assistant de projet à MikroC.

A ce stade, une nouvelle fenêtre vide comme représenté à la figure 4-25, elle s'affiche afin que vous puissiez y saisir votre programme.

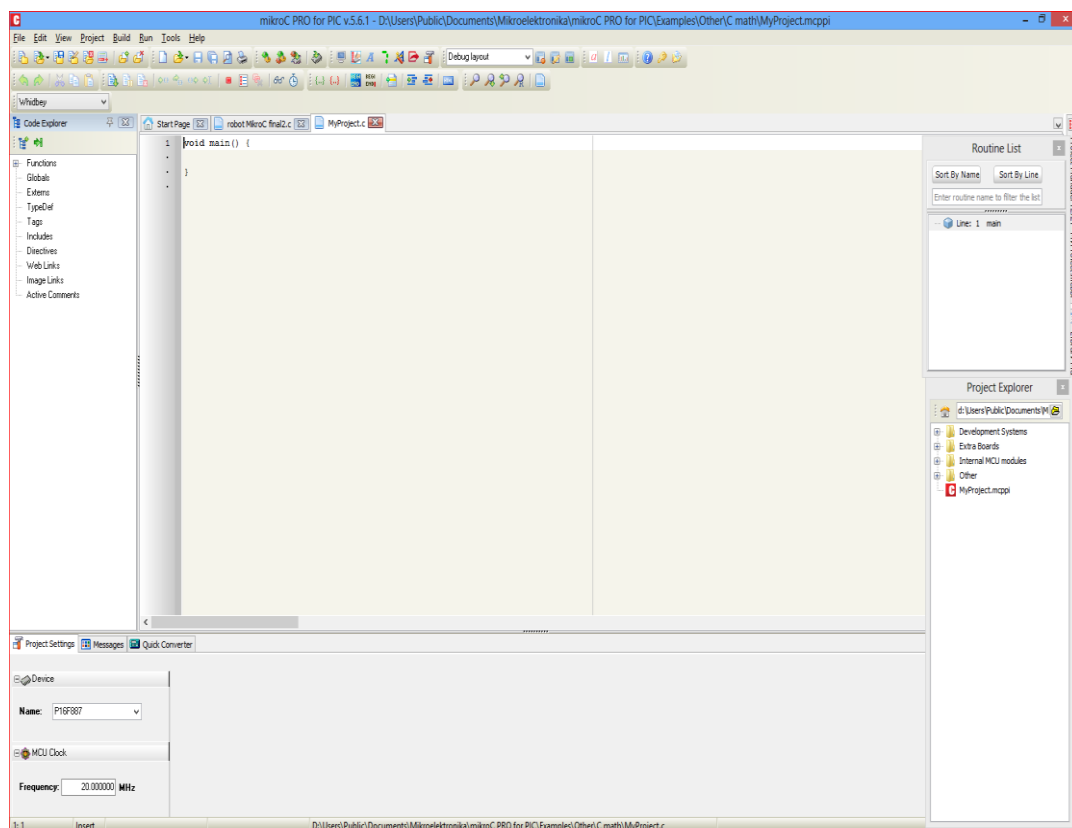


Figure 4-25 : Fenêtre de command de MikroC.

5.3 Ecriture du programme

Les caractéristiques désirées de la structure logicielle du robot sont la modularité, les possibilités d'évolution, l'efficacité et la robustesse.

5.3.1 Choix de l'architecture

L'architecture décisionnelle utilisée sur le robot répond aux caractéristiques des architectures mécaniques du robot. La figure 4-26 illustre le principe général de ces architectures.

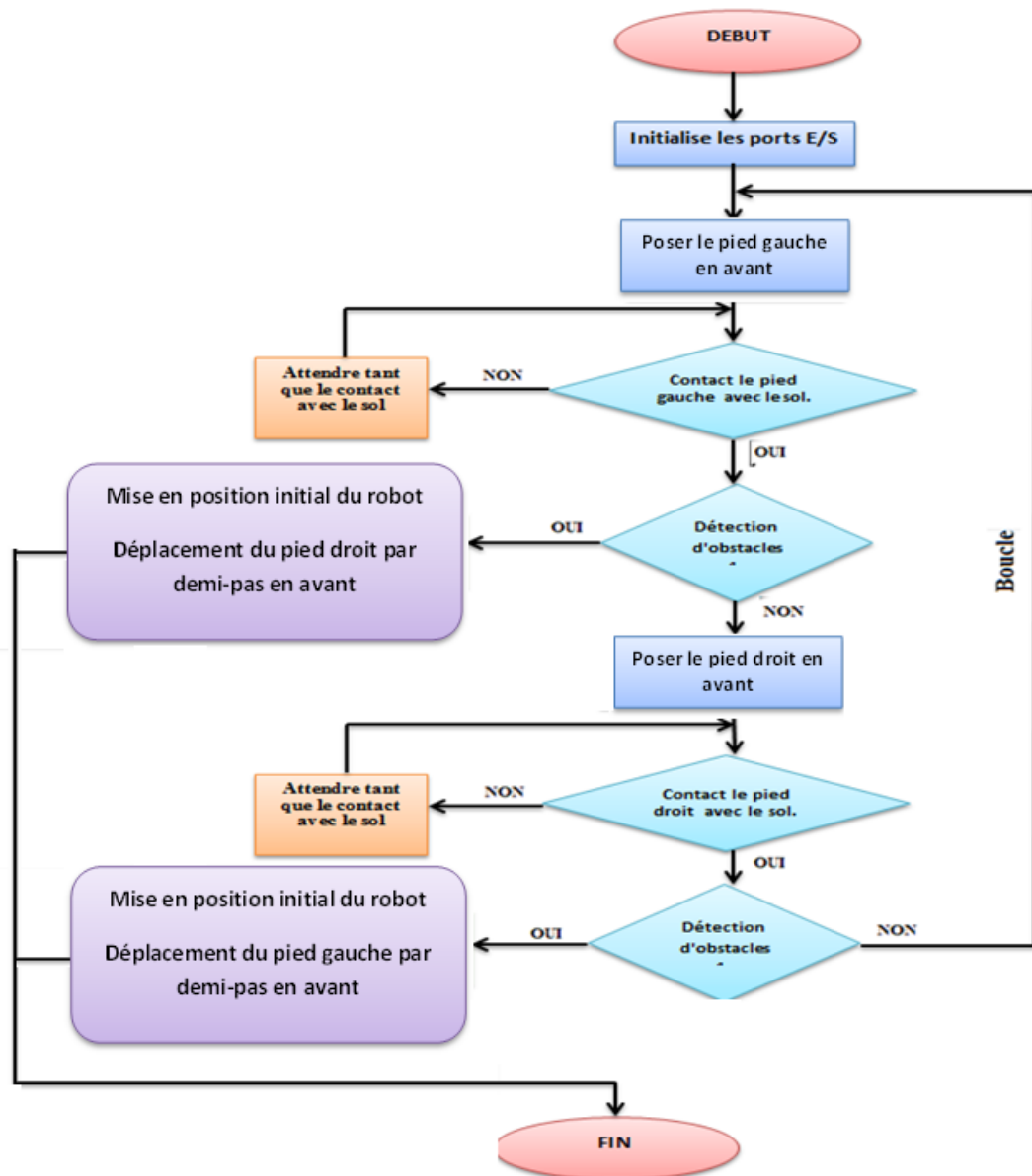


Figure 4-26 : Algorithme Du programme.

5.4 Affectation des entrées/sorties du robot aux broches du PIC 16F877

Le PIC 16F877 dispose de 3 ports de 8 bits (B, C et D), d'un port de 5 bits (A) et d'un port de 3 bits (E). Soit en tout 32 E/S. Toutes les bornes de tous les ports peuvent être configurées en entrées ou en sorties logiques, mais pour les autres utilisations (PWM, Liaison série, entrée analogique, ...) seules certaines broches sont utilisables.

Voici une proposition d'utilisation des broches qui permet la meilleure évolution.

RA2 : Entrée analogique vers capteurs ultrasons

RB0 : sortie logique vers commande moteur 1

RB1 : sortie logique vers commande moteur 1

RB2 : sortie logique vers commande moteur 1

RB3 : sortie logique vers commande moteur 1

RB4 : sortie logique vers commande moteur 2

RB5 : sortie logique vers commande moteur 2

RB6 : sortie logique vers commande moteur 2

RB7 : sortie logique vers commande moteur 2

RC0 : sortie logique vers commande moteur 3

RC1 : sortie logique vers commande moteur 3

RC2 : sortie logique vers commande moteur 3

RC3: sortie logique vers commande moteur 3

RC4: sortie logique vers commande moteur 4

RC5: sortie logique vers commande moteur 4

RC6 : sortie logique vers commande moteur 4

RC7 : sortie logique vers commande moteur 4

RD0 : sortie logique vers commande moteur 5

RD1 : sortie logique vers commande moteur 5

RD2 : sortie logique vers commande moteur 5

RD3 : sortie logique vers commande moteur 5

RD4 : sortie logique vers commande moteur 6

RD5 : sortie logique vers commande moteur 6

RD6 : sortie logique vers commande moteur 6

RD7 : sortie logique vers commande moteur 6

RE0 : Entrée analogique vers Capteur Micro Switch (pied gauche)

RE1 : Entrée analogique vers Capteur Micro Switch (pied droit)

5.5 Description du programme et des fonctions

Pour plus de facilité de modification, nous avons scindé le programme en plusieurs fichiers, réparti en diverses fonctions.

5.5.1 Programme pour commander les moteurs

Le module de contrôle temps réel est composé des comportements, activés et configurés par le module Exécutif et de contrôleurs PIC16F877 pour les commandes aux actionneurs du robot.

Le programme dans figure 4-27 permet de faire la rotation du moteur 1 de la cheville gauche .c'est l'un des programme les plus simple qui soit est très pratique pour tester le bon fonctionnement des montages, qui devraient toujours avoir l'état du moteur permettant d'afficher l'état du pic.

Le moteur 1 tourne 6 fois, ça permet un balancement du robot au front sagittal par un angle de 15.68°.

```
        unsigned int temp_res;
        int i;

void main() {
    porta=0x00;           // initialisé à 0
    portb=0x00;           //initialisé à 0
    portd=0x00;           // initialisé à 0
    portc=0x00;           // initialisé à 0
    porte=0x00;           //initialisé à 0

    trisa=0xFF;           // utiliser le port A comme entée de lecture analogique
    trisb=0x00;           // utiliser le port B comme sortie
    trisd=0x00;           // utiliser le port D comme sortie
    trisc=0x00;           // utiliser le port C comme sortie
    trise=0x07;           // utiliser le port E comme sortie
    adcon1=0x82;          // Configurer le registre ADCON1 ()

    for(i=1 ;i<=7; i++)   // boucle 7 fois : 7 tours direct de moteur 1
    {
        rd0_bit=1;delay_ms(50); // Rotation du moteur 1 à 45°
        rd0_bit=0;
        rd1_bit=1;delay_ms(50); // Rotation du moteur 1 à 90°
        rd1_bit=0;
        rd2_bit=1;delay_ms(50); // Rotation du moteur 1 à 90°
        rd2_bit=0;
        rd3_bit=1;delay_ms(50); //Rotation du moteur 1 à 90°
        rd3_bit=0;
    }
}
```

Figure 4-27 : programme de command un moteur pas à pas.

Voilà un aperçu du code implémenté :

```
unsignedinttemp_res;
int i;
voidmain() {
porta=0x00;//initialisé à 0
portb=0x00;//initialisé à 0
portd=0x00;// initialisé à 0
portc=0x00;// initialisé à 0
porte=0x00;//initialisé à 0
trisa=0xFF; // utiliser le port A comme entée de lecture analogique
trisb=0x00; // utiliser le port B comme sortie
trisd=0x00; // utiliser le port D comme sortie
trisc=0x00; // utiliser le port C comme sortie
trise=0x07; // utiliser le port E comme sortie
adcon1=0x82;// Configurer le registre ADCON1 ()
for(i=1 ;i<=7; i++)// boucle 7 fois: 7 tours direct de moteur 1
{
rd0_bit=1;delay_ms(50); // Rotation du moteur 1à 45°
rd0_bit=0;
rd1_bit=1;delay_ms(50);// Rotation du moteur 1 directe à 90°
rd1_bit=0;
rd2_bit=1;delay_ms(50); // Rotation du moteur 1 directe à 90°
rd2_bit=0;
rd3_bit=1;delay_ms(50); //Rotation du moteur 1 directe à 90°
rd3_bit=0;
}
```

5.5.2 Programme du convertisseur analogique/numérique

Le PIC16F876 possèdent en plus, des instructions très puissantes, donc un programme à développer réduit, une programmation simple. Il dispose plus de ROM par rapport aux autres, microcontrôleur, ce qui est nécessaire pour développer des programmes plus longs, ainsi que la présence d'un convertisseur analogique/numérique indispensable pour la mesure de valeur du capteur Ultrason.

Ce qui donne la fonction de conversion suivante en MikroC :


```
        unsigned int temp_res;
        int i;

void main() {
    porta=0x00;        // initialisé à 0
    portb=0x00;        //initialisé à 0
    portd=0x00;        // initialisé à 0
    portc=0x00;        // initialisé à 0
    porte=0x00;        //initialisé à 0

    trisa=0xFF;        // utiliser le port A comme entrée de lecture analogique
    trisb=0x00;        // utiliser le port B comme sortie
    trisd=0x00;        // utiliser le port D comme sortie
    trisc=0x00;        // utiliser le port C comme sortie
    trise=0x07;        // utiliser le port E comme sortie
    adcon1=0x82;        // Configurer le registre ADCON1 ()

    for(i=1 ;i<=7; i++)    // boucle 7 fois : 7 tours direct de moteur 1
    {
        rd0_bit=1;delay_ms(50);    // Rotation du moteur 1 directe à 45°
        rd0_bit=0;
        rd1_bit=1;delay_ms(50);    // Rotation du moteur 1 directe à 90°
        rd1_bit=0;
        rd2_bit=1;delay_ms(50);    // Rotation du moteur 1 directe à 90°
        rd2_bit=0;
        rd3_bit=1;delay_ms(50);    //Rotation du moteur 1 directe à 90°
        rd3_bit=0;

        temp_res = adc_read(2);        // Lire la valeur de ADC de la 2eme chanel de lecture analogique
        if (temp_res>0b0001010010) break; // Si un obstacle à inferieur 1m ==le robot s'arrêtera si non il continuera la marche
    }
}
```

Figure 4-28 : code source C pour détection l'obstacle.

Voilà un aperçu du code implémenté :

```
unsigned int temp_res;
int i;
void main() {
    porta=0x00; //initialisé à 0
    portb=0x00; //initialisé à 0
    portd=0x00; // initialisé à 0
    portc=0x00; // initialisé à 0
    porte=0x00; //initialisé à 0
    trisa=0xFF; // utiliser le port A comme entrée de lecture analogique
    trisb=0x00; // utiliser le port B comme sortie
```

```
trisd=0x00; // utiliser le port D comme sortie
trisc=0x00; // utiliser le port C comme sortie
trise=0x07; // utiliser le port E comme sortie
adcon1=0x82; // Configurer le registre ADCON1 ()
for(i=1 ;i<=7; i++)// boucle 7 fois: 7 tours direct de moteur 1
{
rd0_bit=1;delay_ms(50); // Rotation du moteur 1 directe à 45°
rd0_bit=0;
rd1_bit=1;delay_ms(50); // Rotation du moteur 1 directe à 90°
rd1_bit=0;
rd2_bit=1;delay_ms(50); // Rotation du moteur 1 directe à 90°
rd2_bit=0;
rd3_bit=1;delay_ms(50); //Rotation du moteur 1 directe à 90°
rd3_bit=0;
}
temp_res = adc_read(2); // Lire la valeur de ADC de la 2eme chanel de lecture
analogique
if (temp_res>0b0001010010) beak; // Si un obstacle à inferieur 1m ==le robot s'arrêtera
sinon il continuera la marche
}
```

6. CONCLUSION

Nous avons donc vu dans ce chapitre les différents éléments électroniques pertinents de la conception de ce robot, et le fonctionnement des circuits électroniques grâce aux programmes établit avec le MikroC et qu'on a charge dans le PIC16F877.

Nous avons évité la programmation par l'assembleur compte-tenu de la complexité de ces jeu d'instruction, et notre programme nécessite d'élaborer des fonctions particulière.

En premier lieu nous avons développé en premier les différents programme séparément pour se familiarisé avec ces composants.

Pour cette partie on a préféré de présenter des organigrammes afin de décrire la logique de la programmation pour gérer le mouvement des moteurs à travers la carte de commande.

Nous avons également présenté les schémas de branchement détaillés de chaque composants constituant cette partie matérielle de notre travail .Le dessin de certains schéma a été effectuée avec le logiciel ISIS Proteus.

CHAPITRE 5

SIMULATION DU CIRCUIT DE COMMANDE

1. INTRODUCTION

Le pic est le cœur de la commande. C'est à lui que le fonctionnement de tous les autres périphériques est lié, et c'est lui qui traite les données envoyées par l'opérateur, et c'est lui qui pilote les moteurs, et c'est lui qui communique avec l'opérateur grâce à un algorithme

Mais comment assure-t-il cette commande ?

Pour répondre à cette question nous allons nous intéresser dans ce chapitre aux logiciels qu'on a utilisé pour le contrôle de la carte de commande par le PIC le « MikroC » parce qu'il est simple et facile à comprendre ainsi son manuel est complet, il nous permettra de créer le code machine qui sera chargé dans la mémoire du microcontrôleur, le logiciel «ISIS» pour la simulation et le teste des composants et programmes.

2. PRESENTATION GENERALE DE PROTEUS ISIS

Le logiciel PROTEUS est composé de trois modules :

- L'éditeur de schéma ISIS
- Le simulateur LISA
- L'outil de conception de circuit imprimé ARES

ISIS produit d'une part, une liste d'équipotentiels qui peut être utilisée par le simulateur LISA et l'outil de conception de circuit imprimé ARES, d'autre part, une liste de matériel et des rapports de contrôle des règles électriques.

LISA est un ensemble de modules de simulation lié à ISIS. Le noyau de simulation PROSPICE est basé sur la version 3F5 du moteur SPICE publié par l'université de Berkeley.

ARES est un module de conception de circuit imprimé compatible Windows, 98 2000 et XP. Il permet le placement des composants en mode automatique, manuel ou semi-automatique et le routage des liaisons sur plusieurs couches en mode automatique manuel ou semi-automatique.

2.1 Lancement du module ISIS

- Dans le menu Démarrer sélectionnez Programme puis Proteus 7 professionnel puis ISIS 7 Professionnal.

- Double cliquez sur l'icône ISIS placée dans le bureau.

Interface utilisateur

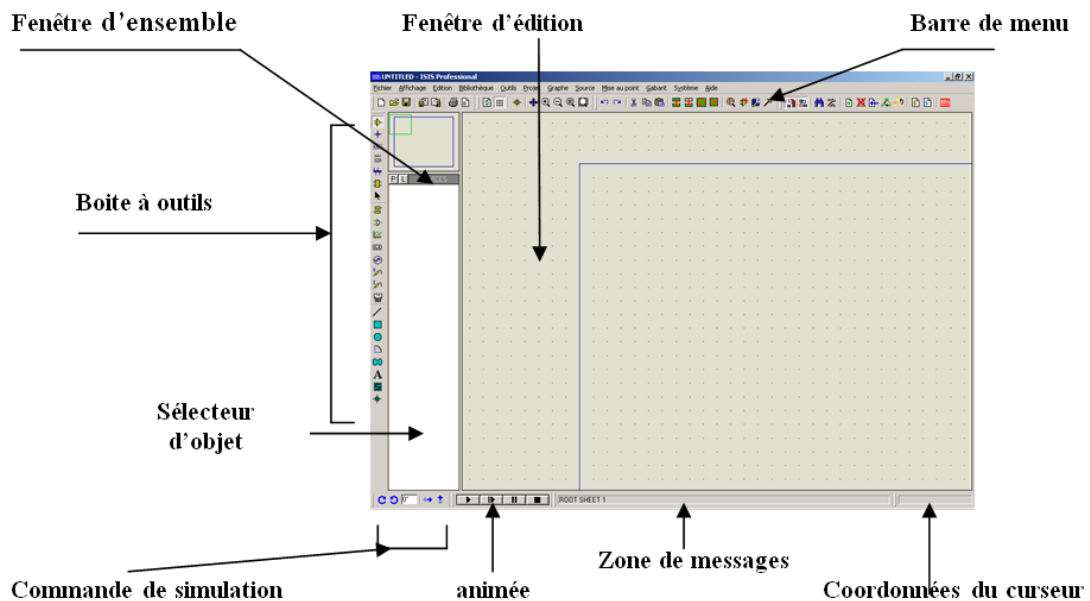


Figure 5-1: Fenêtre d'éditeur de schéma ISIS.

Fenêtre d'ensemble

Le cadre en bleu délimite l'espace de travail tel qu'il a été défini par la commande 'Définir taille des feuilles' du menu 'système'.

Le cadre en vert délimite la zone de travail, c'est à dire la partie du schéma visible dans la fenêtre principale.

- Vous pouvez déplacer cette zone de travail en pointant la souris sur la zone désirée de la fenêtre d'ensemble et en effectuant un clic gauche.
- Vous pouvez redéfinir la zone de travail dans la fenêtre d'ensemble en appuyant sur la touche majuscule 'shift' du clavier, associée au déplacement de la souris en maintenant appuyé le bouton gauche.

Fenêtre d'édition

C'est dans cette fenêtre que vous éditez votre circuit. Elle ne représente que la partie du circuit qui est définie par le cadre vert dans la fenêtre d'ensemble.

- Vous pouvez redéfinir la zone travail à l'aide de la fenêtre d'ensemble ou en utilisant la commande 'Zoom' du menu 'Affichage'.

La boîte à outils

Elle est composée d'un ensemble d'icônes dont les fonctions seront détaillées ultérieurement et d'un sélecteur d'objet utilisé pour choisir les boîtiers, le style des pastilles, des traces, des traversées, etc...

Coordonnées curseur

Les coordonnées déterminent la position du curseur par rapport à l'origine qui par défaut se trouve au centre de la fenêtre d'édition.

Les coordonnées sont affichées en 1/1000 de pouce (th).

3. ETAPES DE DEVELOPPEMENT D'UN PROGRAMME

Pour le développement de nos Programme, nous avons subdivisé notre travail en deux étapes:

- Etape1 :

L'activité de programmation est un jeu d'instructions dans laquelle, il suffit d'enchaîner des instructions élémentaires pour parvenir à résoudre notre problème. Dans notre cas nous avons utilisé le logiciel de compilation MikroC.

- Etape2 :

Après l'obtention d'un programme compilé, le besoin d'émuler son bon fonctionnement devient une nécessité puisqu'il nous permet d'avoir une idée claire sur le côté matériel, de plus nous pouvons visualiser le comportement du PIC avec ses périphériques. Dans notre cas nous avons opté pour le logiciel «PROTEUS» qui nous permettra de chargé facilement le programme compilé dans le PIC.

Dans la phase terminale, une fois le fichier source compilé et simulé, il va falloir le transférer dans la mémoire du PIC le fichier code-machine, Pour cela il faut un programmeur et un logiciel de transfert de programme.

Et la figure 5-1 résume ces différentes étapes précédentes.

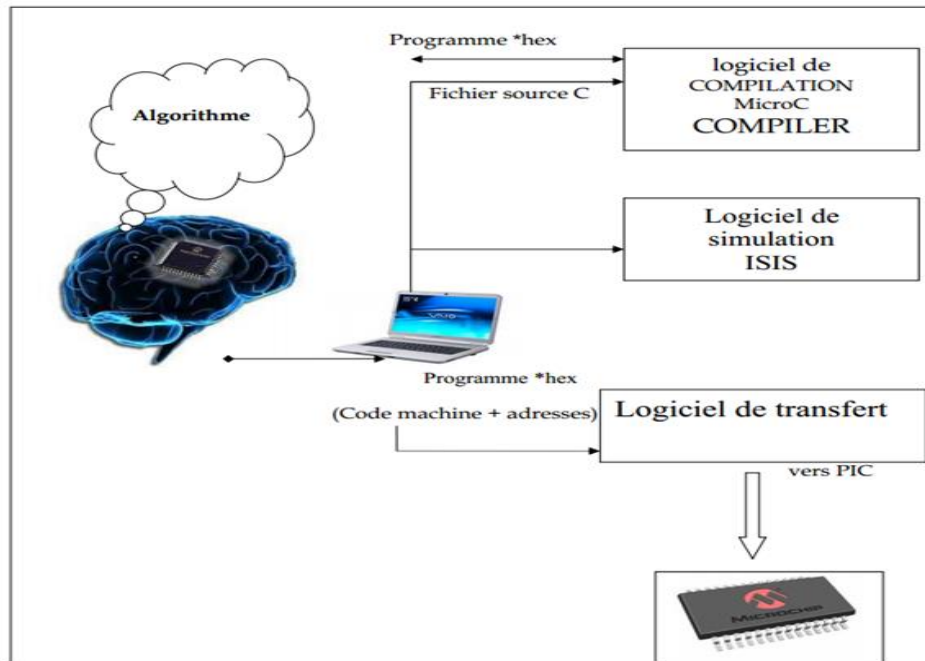


Figure 5-2 : Cheminement de la programmation.

4. SIMULATION DU PROGRAMME:

Arrivons à ce stade la simulation de notre programme paraît indispensable d'où l'utilisation du logiciel « PROTEUS ISIS » permettant de mieux visualiser le bon déroulement du système ainsi que d'avoir une idée claire sur la partie matérielle que ce soit références et même conception des circuits imprimés.

L'intérêt de simuler d'un programme est bien sûr pédagogique car comme nous le verrons, nous allons pouvoir visualiser le fonctionnement du PIC avec tous les périphériques de la carte de commande. De plus, nous allons vérifier le fonctionnement du programme avant de le transférer vers la mémoire de microcontrôleur.

Cela nous permettra d'économiser du temps et également d'augmenter la durée de vie de notre PIC.

Le schéma que nous avons élaboré par ISIS représente l'ensemble des composants électroniques de la carte de commande, Le microcontrôleur PIC16F877 est visible sur cette interface graphique, la figure 5-3 montre la fenêtre du logiciel de simulation « ISIS ».

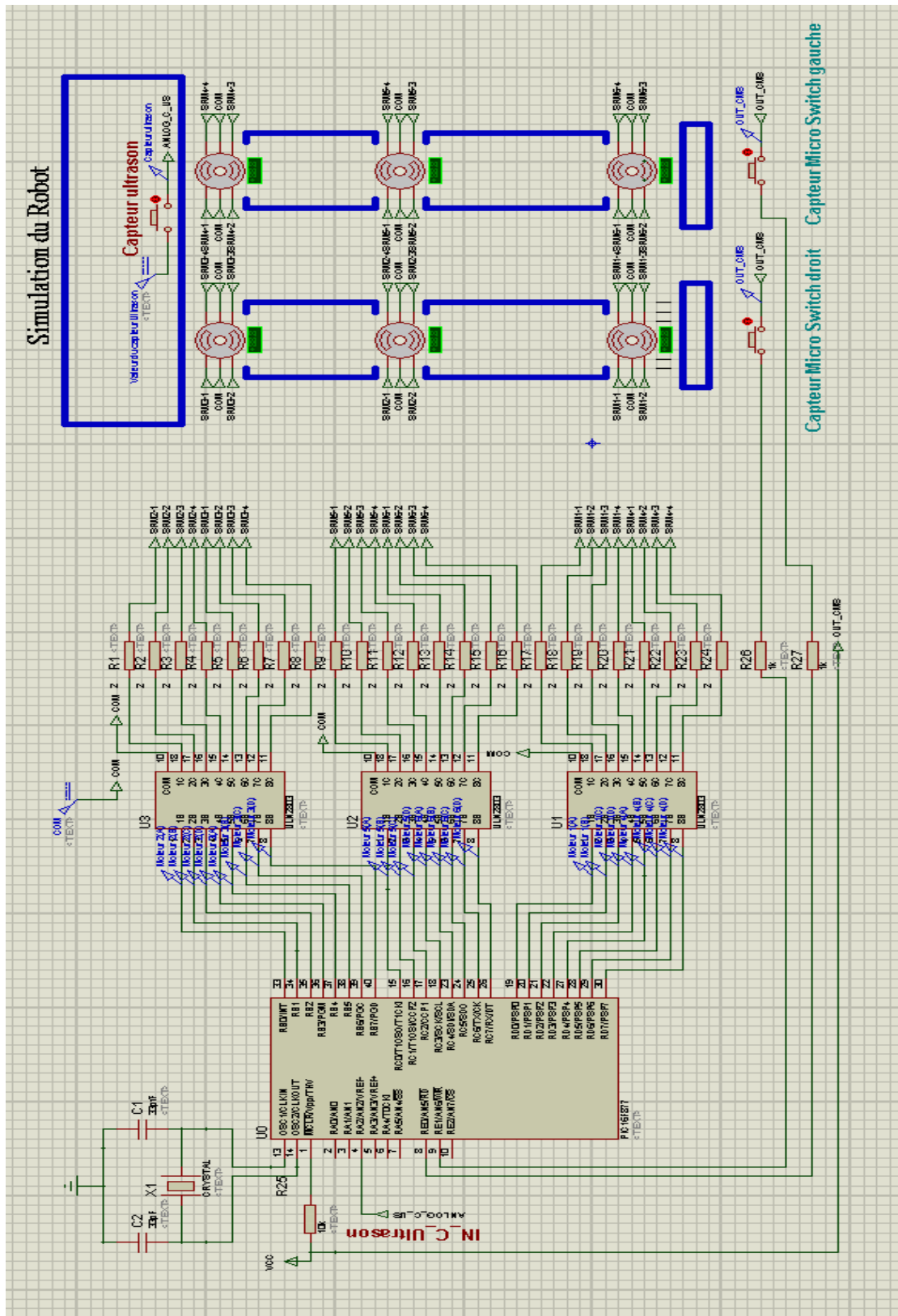


Figure 5-3: Fenêtre de simulation de la carte de commande par ISIS.

On a seulement montré comment généré les six moteurs électriques des articulations du robot

4.1 Teste des périphériques qui entoure le PIC

Comme on l'avais vu dans le chapitre précédent que le PIC16F877 est entouré par plusieurs composants électroniques, et ils ont un lien directe avec lui, donc leurs teste est très important .Donc nous nous intéresserons dans cette partie à la programmation du PIC pour le pilotage de ses composants un par un à l'aide de MikroC et la simulation est assuré par le logiciel ISIS.

4.1.1 Simulation du capteur ultrason FESTO177469

Comme on la déjà explique dans le premier chapitre, le capteur nous fournit des résultats sous forme de courant électrique variable entre 6 et 20 mA (se sont les limites d'utilisation su capteur), convertie en tension en chargeant la sortie du capteur par une résistance.

L'évaluation de la distance séparant l'objet du détecteur ce fait par l'intermédiaire d'un convertisseur Analogique Numérique qu'on le réalisera avec le microprocesseur PIC 16F877A et le langage de programmation le MikroC.

Pour que cette tension soit une information utile pour le microcontrôleur PIC16F877A, elle doit passer par le module CAN (Convertisseur Analogique Numérique) intégré dans notre dispositif. Après traitement de la valeur numérique récupéré, on affiche sur un LCD (2Lignes 16 colonnes) s'il existe un obstacle ou non, et si c'est le cas on affiche la distance qui sépare ce dernier avec notre capteur.

Voilà un aperçu de la simulation du capteur FESTO177469 sous Proteus ISIS est comme mieux détaillé à la figure 5-4.

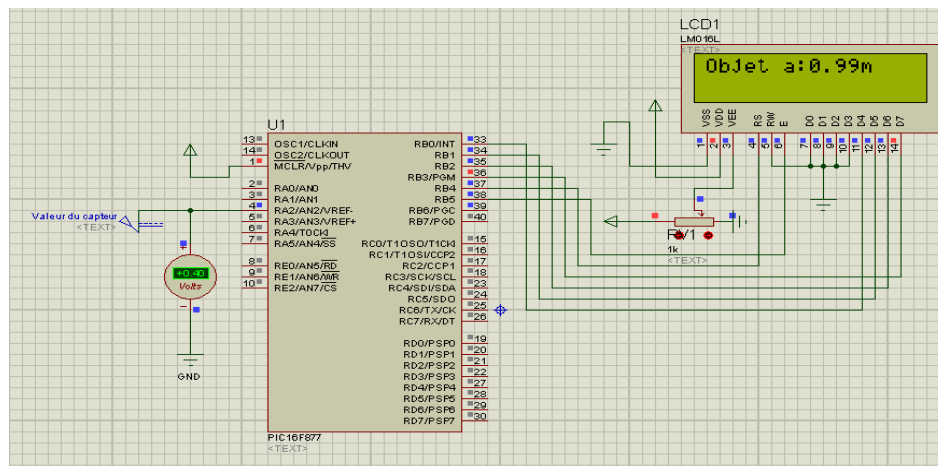


Figure 5-4 : Fenêtre de simulation du capteurFESTO177469 par ISIS [23].

On peut sur cette figure 5-4 voir que la tension de sortie est de 0,4V pour un obstacle à une distance de 1m. Ce capteur renvoie donc un signal analogique qui varie en fonction de la distance de l'obstacle. Il faut donc convertir ce signal à l'aide d'un convertisseur analogique numérique pour pouvoir traiter l'information plus facilement avec le PIC16F877, comme nous avons déjà converti le signal analogique de 0.4V vers un code numérique à figure 5-5.

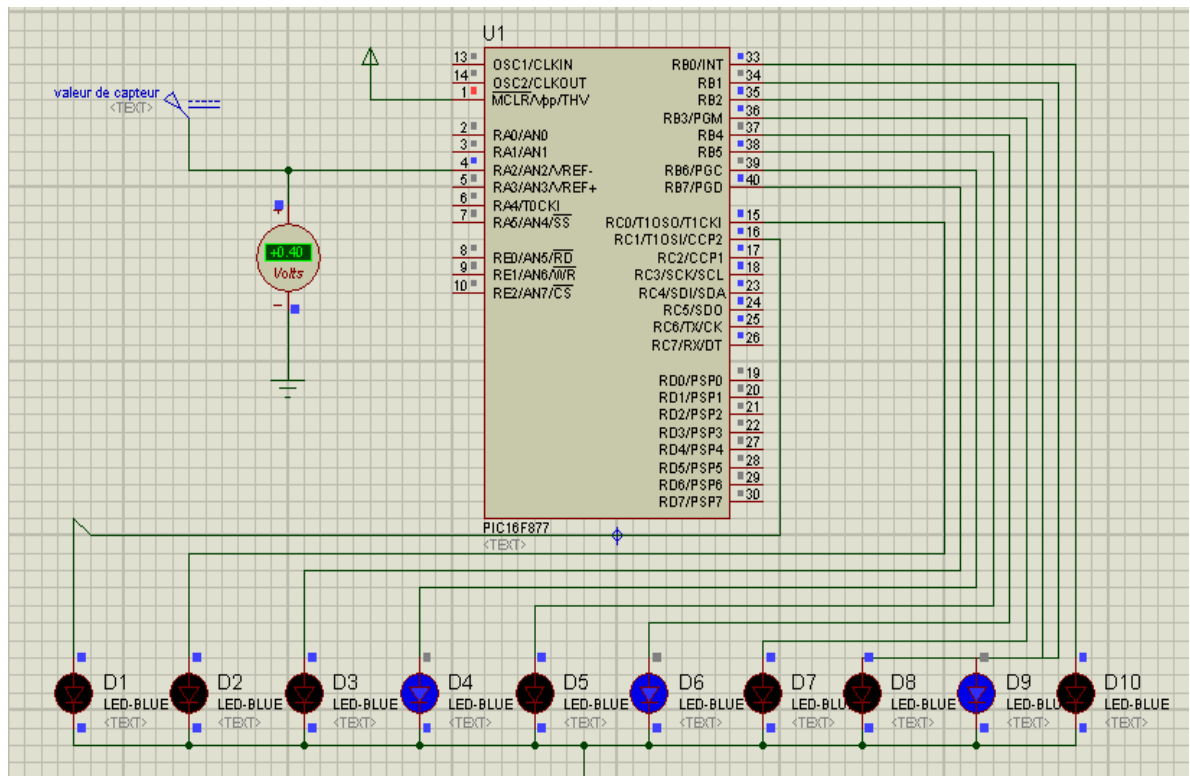
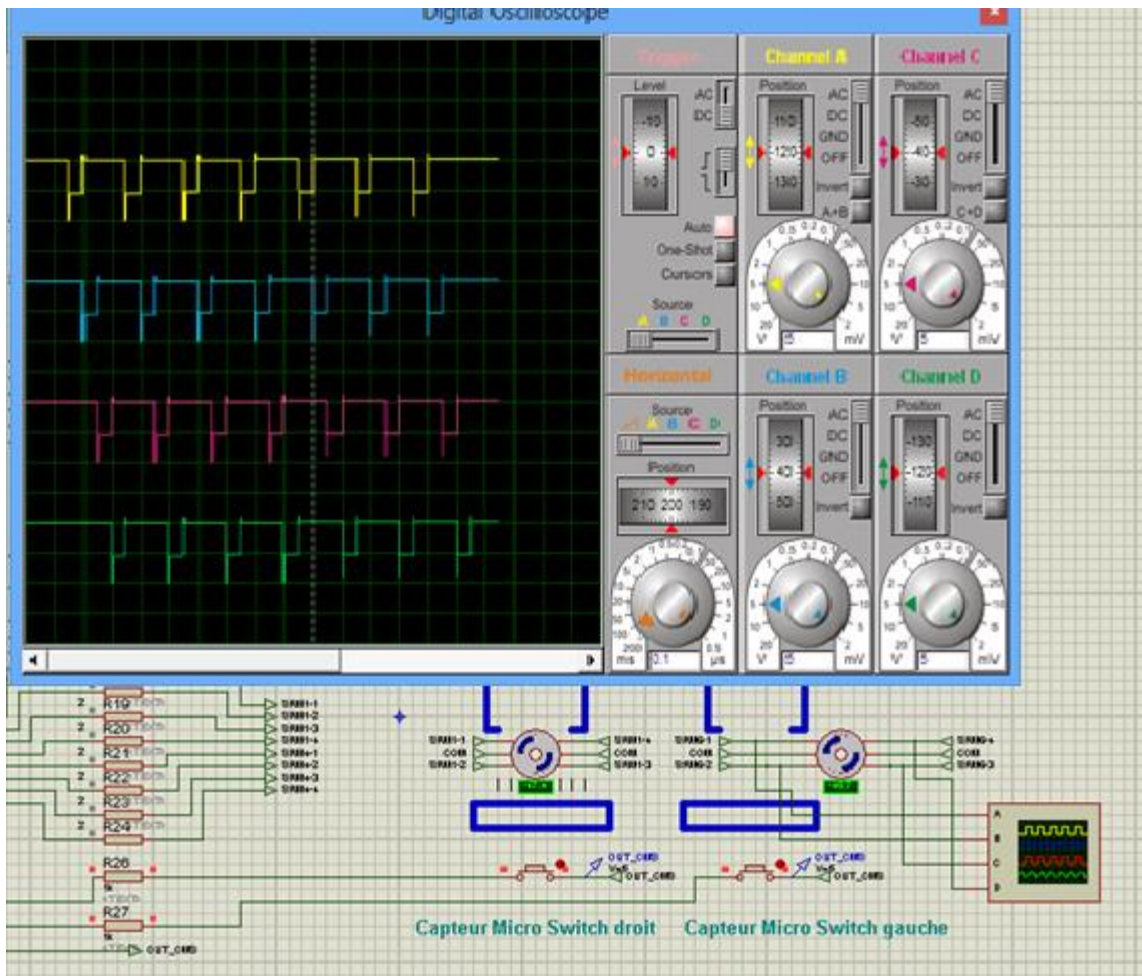


Figure 5-5 : convertir le signal analogique de 0.4V vers un code numérique par ISIS.

4.1.2 Pilotage du moteur pas à pas

Pour mieux s'assurer de la correspondance entre Les signaux qui sont générés par la carte de commande, on propose d'utiliser un oscilloscope virtuel pour visualiser les signaux de commande pour le moteur 6. La figure 5-6 illustre les valeurs introduites à travers la carte de commande, et la visualisation des signaux de commandes sur l'oscilloscope.



La figure 5-6 : Fenêtre de simulation de moteur 6 par « ISIS ».

Les signaux A, B, C et D sont les signaux, qui seront appliqués au circuit de puissance d'alimentation du moteur pas à pas comme mieux détaillé à la figure 5-7.

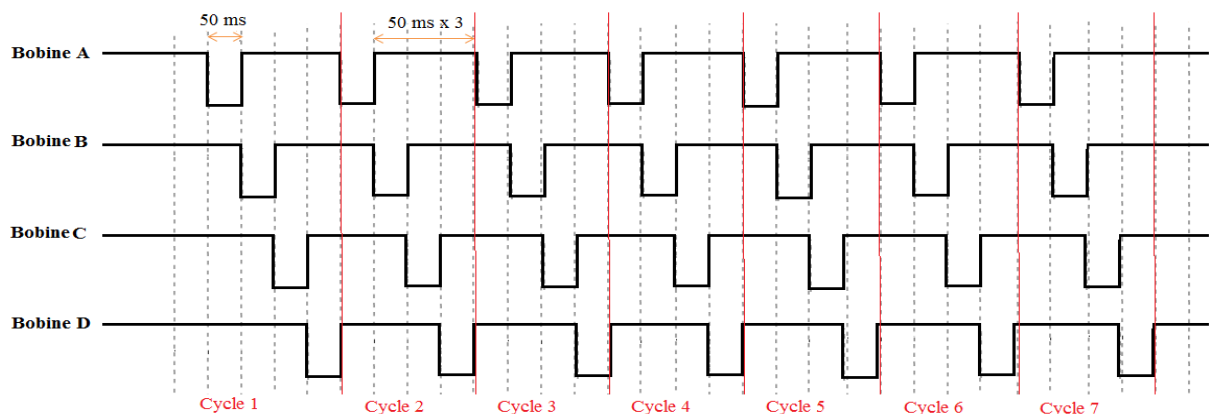


Figure 5-7 : chronogrammes des signaux de sorties qui commande le moteur 6.

Le tableau 5-1 résume les états successifs des différentes étapes d'un cycle ; l'état logique indique si la bobine est alimentée ("1") ou non ("0").

Les étapes d'un cycle	Etape 1	Etape 2	Etape 3	Etape 4
l'état logique (ABCD)	1000	0100	0010	0001

Tableau 5-1 : les états successifs des différentes étapes d'un cycle.

4.1.3 Visualisation des signaux de commande

Pour toutes les simulations, le système est remplacé par un modèle d'analyseur logique virtuel qui montre les signaux obtenus en sortie de la PWM. Les capteurs sont par ailleurs remplacés par de simples boutons poussoirs virtuels et fonctionnels que nous actionnons pour visualiser les changements de la sortie visualisée.

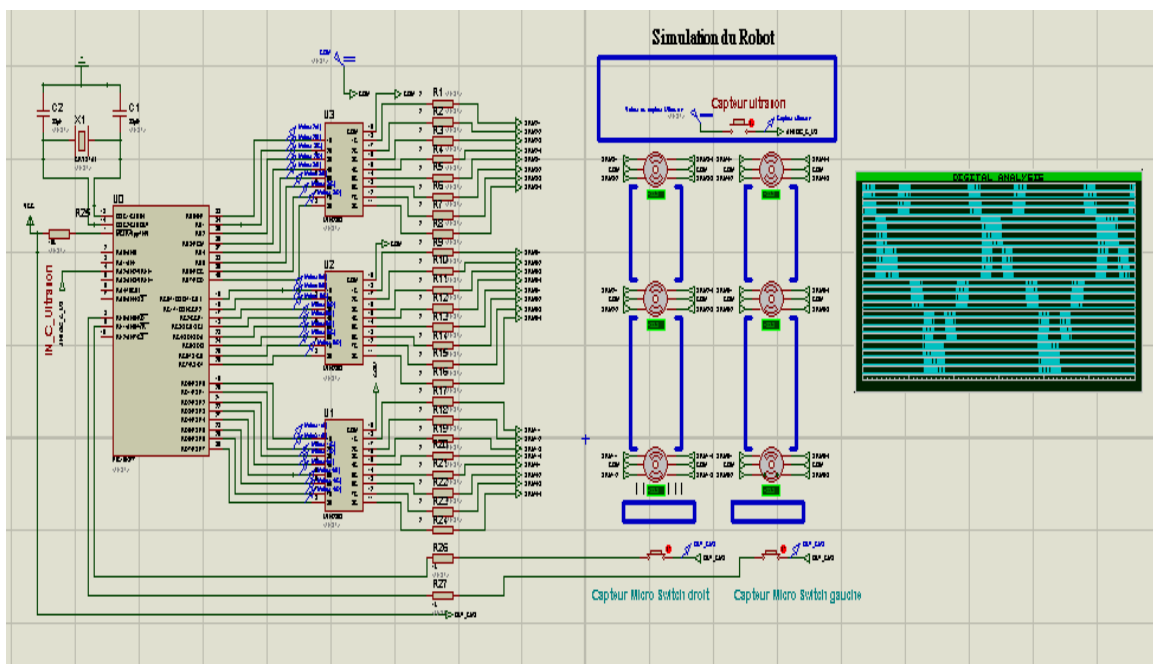


Figure 5-8: Fenêtre de simulation des signaux de commande « ISIS ».

Pour tous les moteurs :

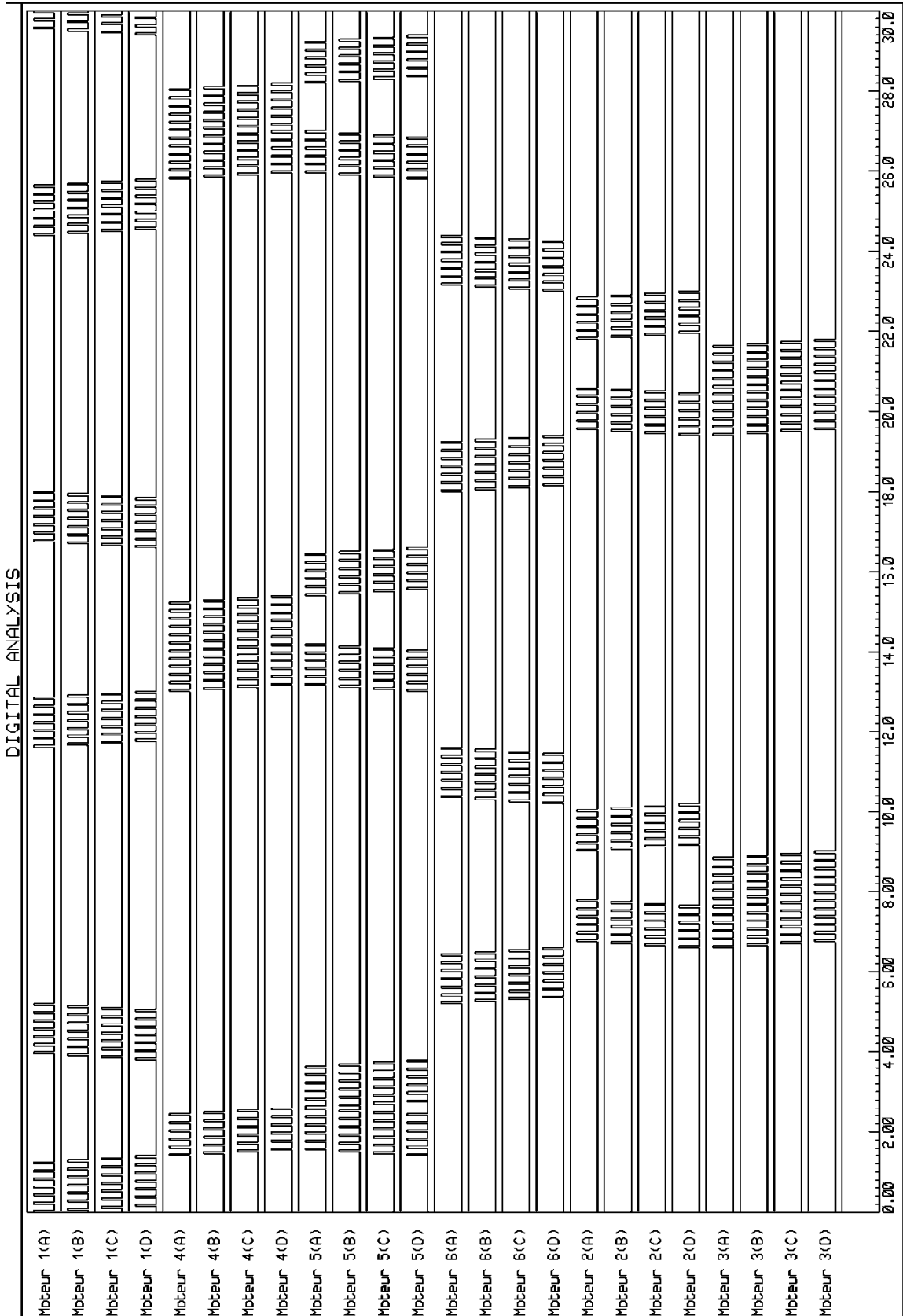



Figure 5-9 : Chronogrammes des signaux de sorties qui commande les moteur.

5. CONCEPTION DE CIRCUITS IMPRIMES

Pour juste avoir une aidé sur la forme du circuit imprimé, c'est faisable avec Proteus ISIS spécialement sur ARES. A l'aide du bouton suivant on peut passer directement sur ARES  .

5.1 Connexion des composants :

A l'aide de la fenêtre SCHEMATIC de ARES qui est montre dans la figure 5-10, on réalise les connexions entre les composants électroniques qu'on a chargés à partir des bibliothèques dont on a parlé précédemment.

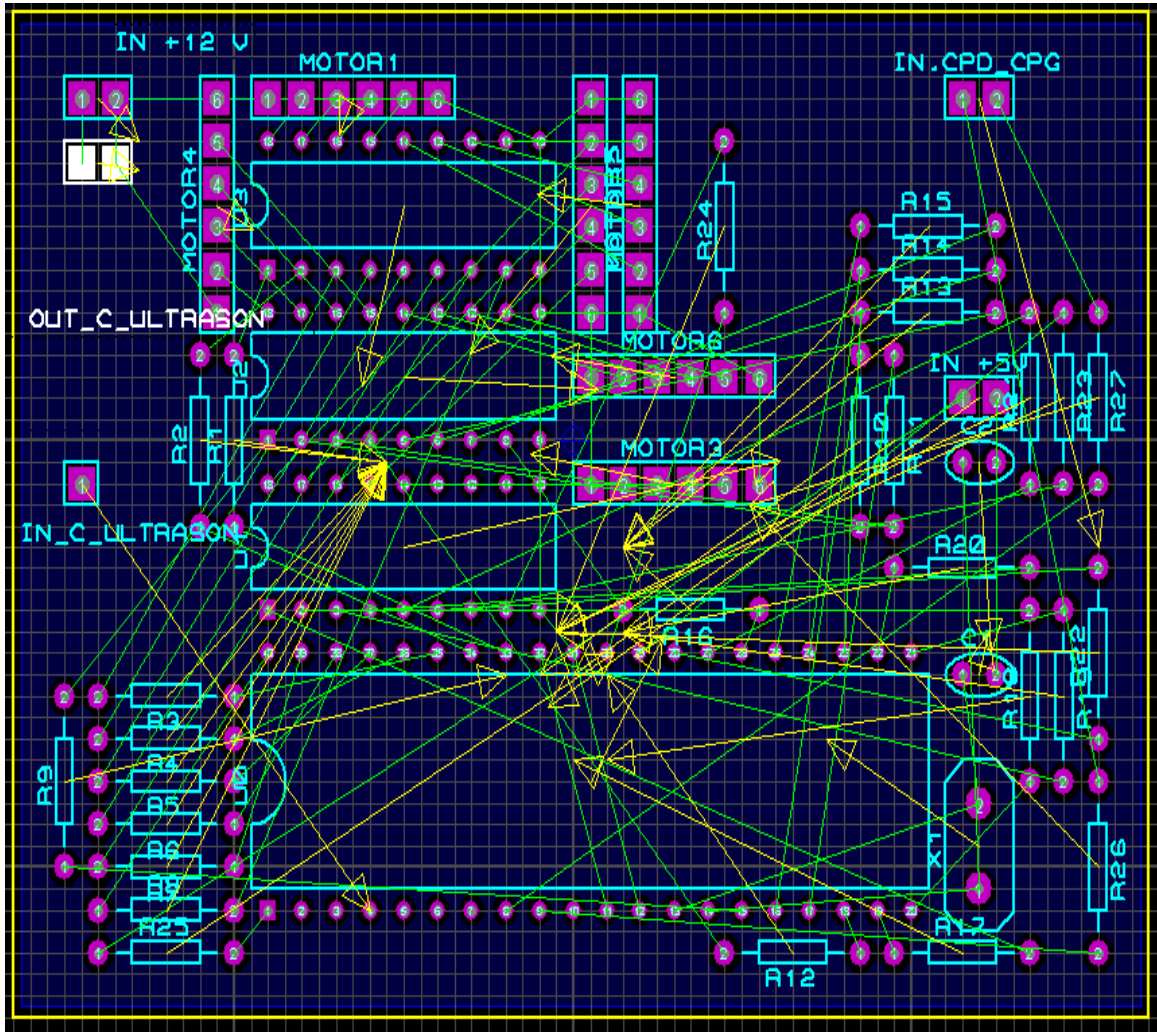


Figure 5-10 : fenêtre schématique de ARES.

Après avoir place nos composants de la disposition souhaitent sur la carte finale, pour pouvoir tracer les pistes sous ARES, il suffit de sélectionner :



On obtient le schéma suivant :

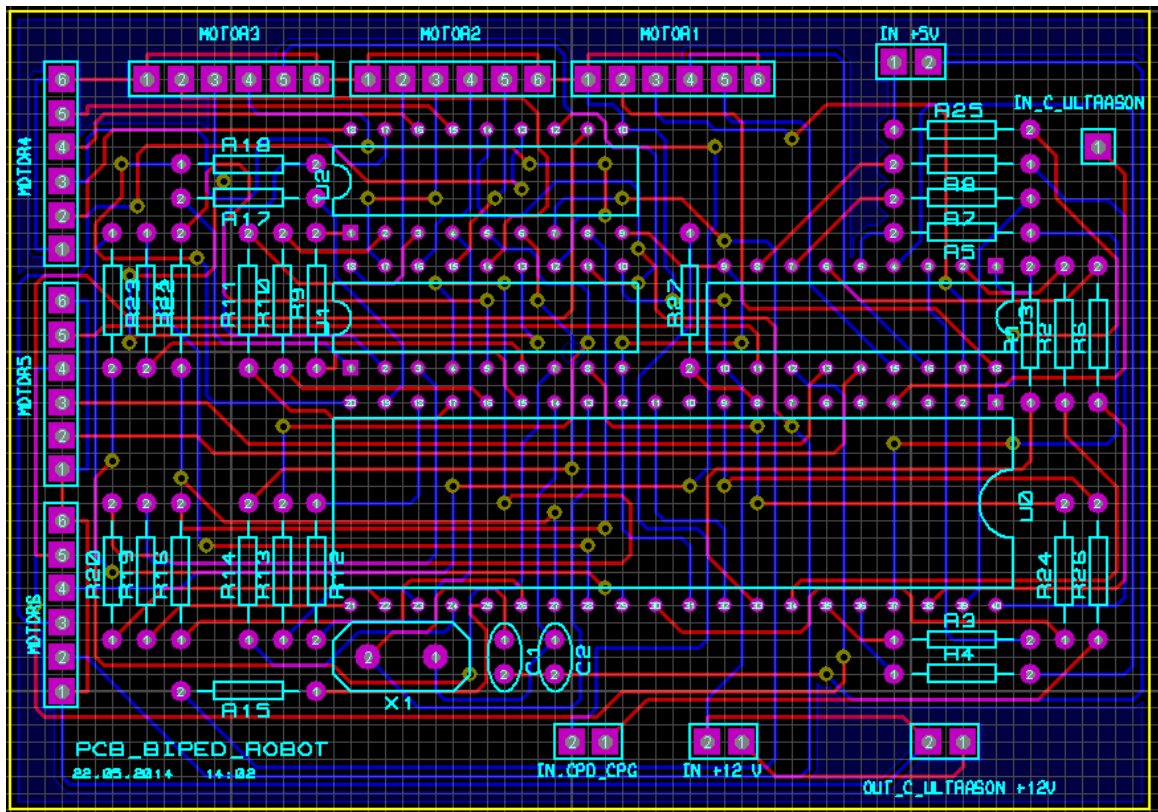


Figure 5-11 : fenêtre schématique de circuit imprimé sous ARES.

On peut changer l'épaisseur des pistes comme suit :



La fenêtre suivante apparaît :

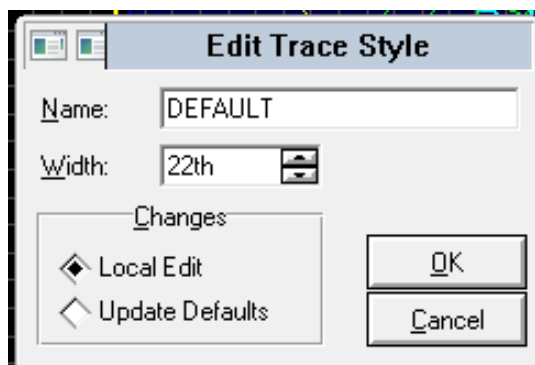


Figure 5-12 : fenêtre d'édit trace.

On choisit l'épaisseur qu'on veut, en changeant la valeur de WIDTH .

Et On a choisi 40 pour tracer le schéma de la figure 3.14.

5.2 Circuit imprimée

On se propose de réaliser le circuit imprimé simple face (pistes côté soudure) en respectant les contraintes d'implantation et de routage ci-dessous :

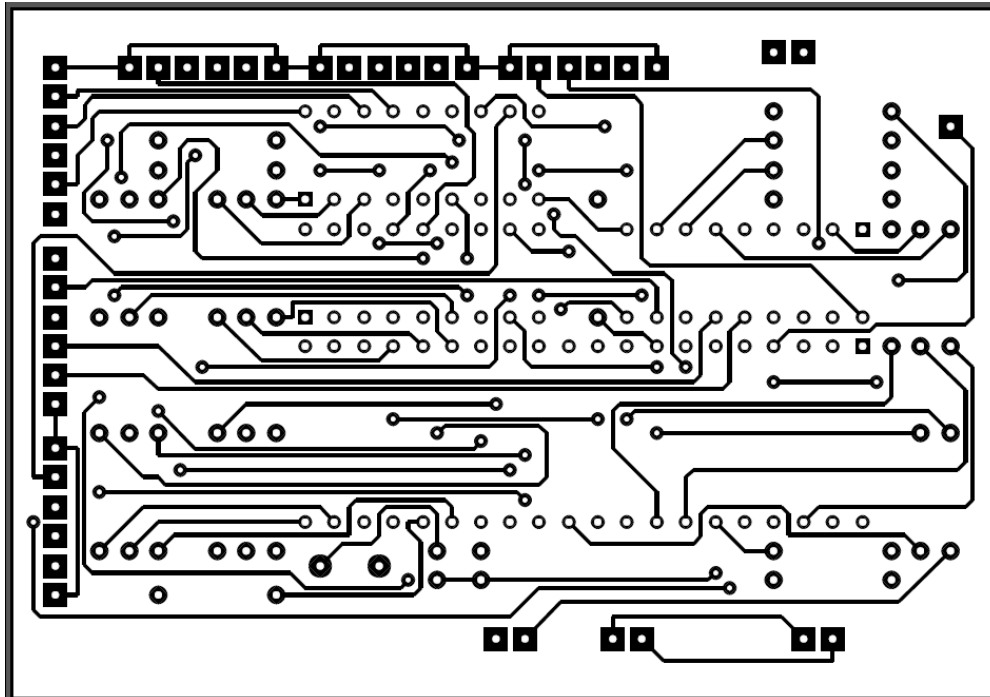


Figure 5-13: Côté piste miroité de la carte mère.

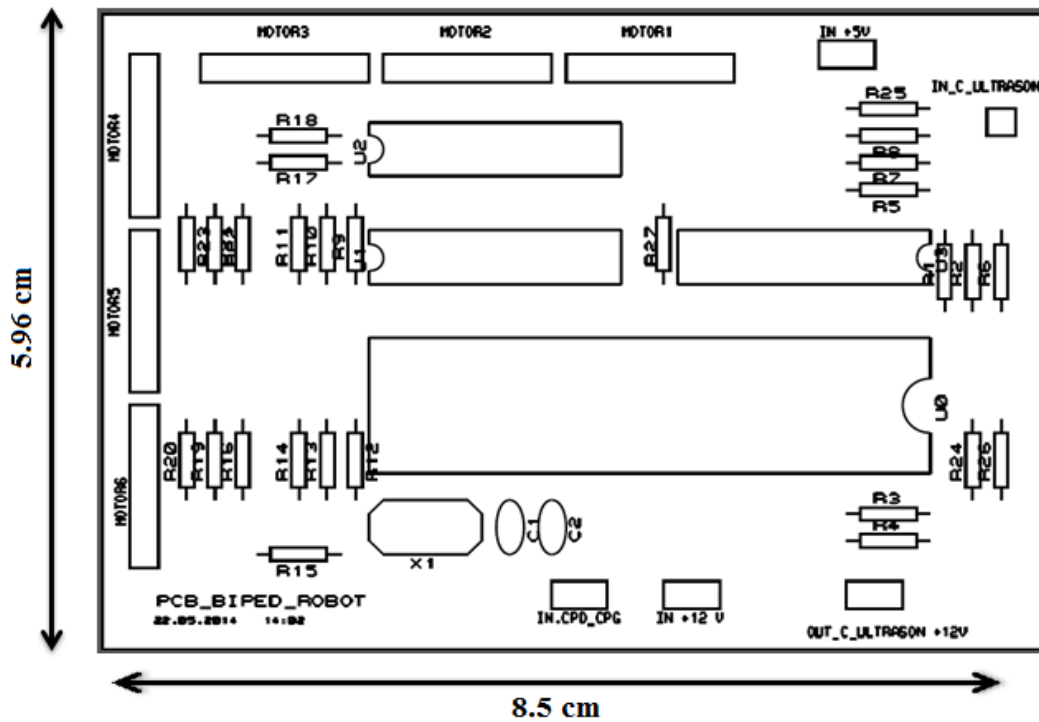


Figure 5-14 : Côté composants de la carte mère.

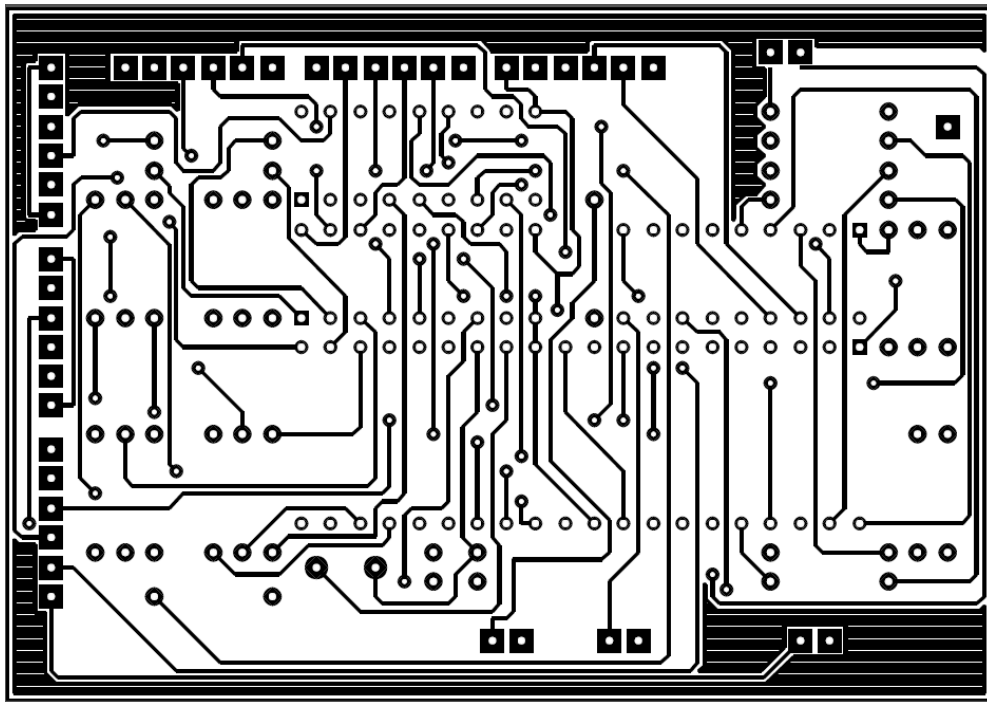


Figure 5-15 : Côté piste normal de carte de la carte mère.

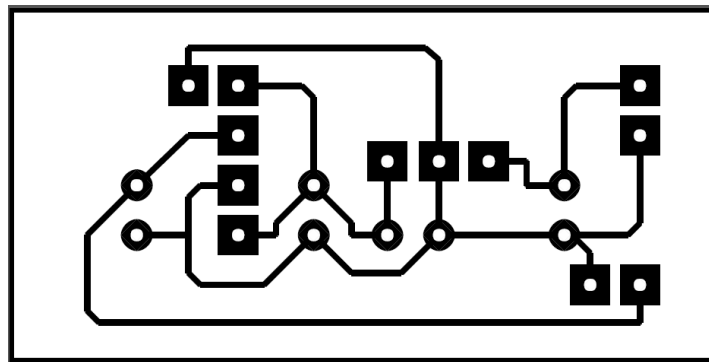


Figure 5-16 : Côté piste normal de la carte d'alimentation.

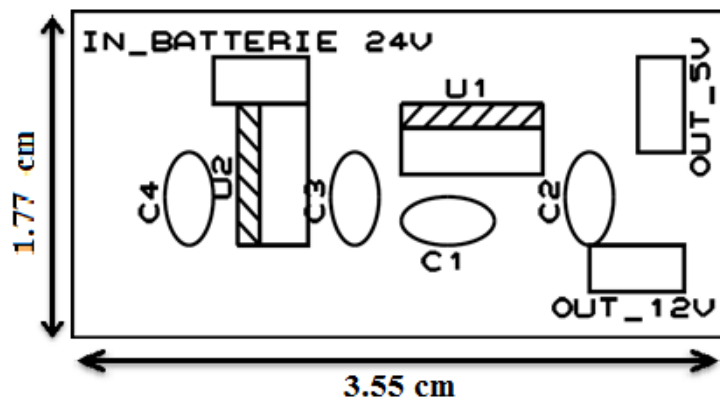


Figure 5-17 : Côté composants de la carte d'alimentation.

6. L'OUTIL DE VISUALISATION EN 3D

Cette outil (**visionneur 3D**) d'ARES permet d'extruder le circuit et de voir la carte telle qu'elle sera en réalité. C'est une aide très utile lors de la conception et la création du circuit.

Parmi les fonctionnalités principales du visionneur 3D comprennent :

- Représentation réaliste du circuit imprimé.
- Pris en compte des empreintes 3D dans les bibliothèques ARES.
- Bouton de visualisation directe des vues haut /face /bas /arrière.
- Description sous la forme de script simple pour une prévisualisation en temps réel lors de la création des empreintes 3D.
- Automatisation du processus de mise à jour des modèle visuels afin d'appliquer les empreintes 3D aux circuits existents.

Pour notre travail, sous ARES visualisation 3D. On a choisi :

Output **3D Visualization**

On obtient la figure comme suivante :

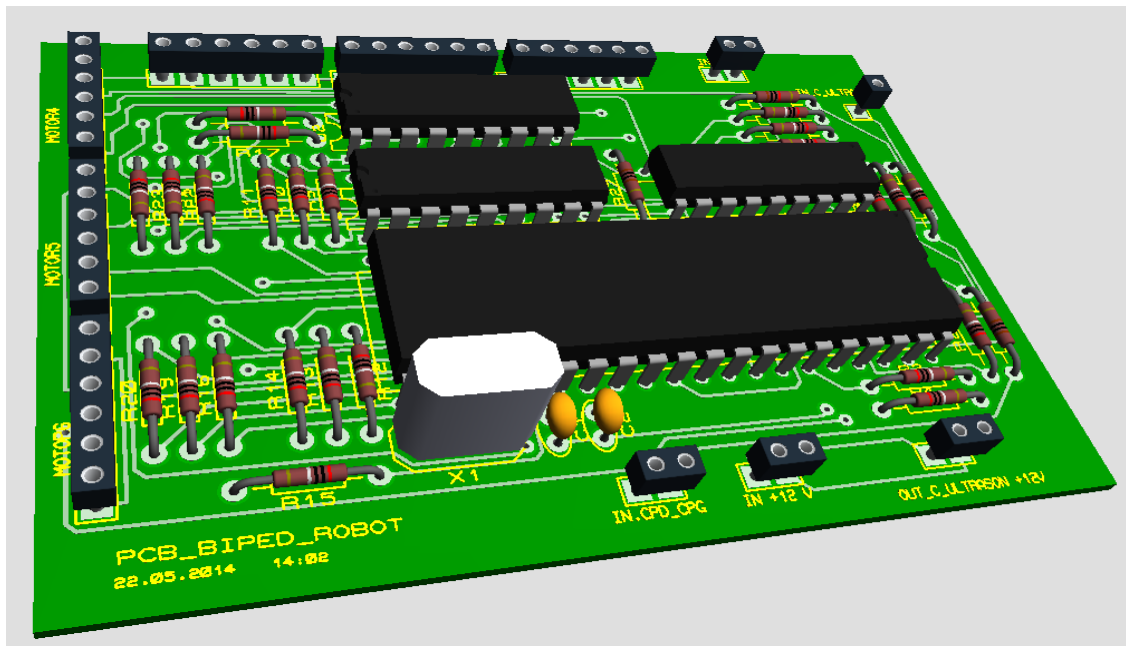


Figure 5-18 : Fenêtre SCHEMATIC sur ARES avec visualisation 3D.

7. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons finalisé notre travail, en faisant apparaître la fonction de circuits électroniques grâce aux programmes établis avec le MikroC et qu'on a chargé dans le PIC.

Nous avons évité la programmation par l'assembleur compte-tenu de la complexité de ces jeux d'instruction, et notre programme nécessite d'élaborer des fonctions particulières.

En premier lieu nous avons développé en premier les différents programmes séparément pour nous familiariser avec ces composants, et nous avons utilisé Proteus ISIS comme logiciel de simulation afin d'éviter les manipulations réelles qui peuvent s'avérer coûteuses et prennent beaucoup plus de temps afin d'éviter de charger et effacer la mémoire du PIC à chaque fois sachant que le cycle d'écriture et d'effacement en mémoire flash est de 1000 cycles d'effacement/écriture.

Pour cette partie on a préféré de présenter des organigrammes afin de décrire la logique de la programmation suivie pour gérer le mouvement des moteurs à travers la carte de commande détaillée dans le chapitre précédent.

Conclusion générale

Nous avons donc vu dans ce travail différents éléments pertinents de la conception de robots. Les principales caractéristiques de la configuration mécanique, du système électrique et du logiciel de contrôle ont ainsi été présentées. Par la suite, un module de prise de décision du programme de contrôle, les différents capteurs utilisés sur ce robot marchant ont été décrits et nous avons pu observer quelques résultats sous logiciel de la simulation ISIS.

Donc nous avons touché trois domaines important, la programmation sous « C », l'électronique digitale, l'électronique de puissance et la mécanique.

Notre étude est intéressante à plus d'un titre, car en plus de sa simplicité de conception du robot, la commande du robot se fait avec six moteurs soit en direct ou en inverse, a une même vitesse de rotation avec simplement une interface créée avec la programmation C.

Bibliographie

- [1] : Le développement industriel futur de la robotique personnelle et de service en France,
*Date de parution : 12 avril 2012 Couverture : Nathalie Palous, Brigitte Baroin Édition :
Nicole Merle-Lamoot, Gilles Pannetier*
- [2] : L'histoire des robots, *par Asimov, Isaac*
- [3] : Introduction à la robotique *par Laetitia Matignon Université de Caen, France*
- [4] : ROBOTIQUE, ISTIA, *Université Angers Jean-Louis Boimond*
- [5] : <http://jf.duchet.pagespersoorange.fr/robotique/Pages/applications.htm>
- [6] : Généralités sur la robotique mobile *par ISTIA, Université Angers*
- [7] : Quelques contributions à la commande non linéaire des Robots marcheurs bipèdes
sous-actionnés *par Ahmed Chemori Spécialité : " Automatique - Productive "*
- [8] : Modélisation et optimisation de la marche d'un robot bipède avec genoux
anthropomorphiques *par Mathieu HOBON Spécialité " Automatique "*
- [9] : <http://www.inria.fr>
- [10] : <http://www.robot-maker.com>
- [11] : MODELISATION ET SIMULATION DYNAMIQUE D'UN BIPÈDE PLAN À 9
DDL *par Séverine Marien*
- [12] : Éléments de conception et de dimensionnement des robots à pattes *G. Abba.. École
Nationale d'Ingénieurs de Metz.*
- [13] : <http://mchobby.be>
- [14] : <http://www.festo-didactic.com>
- [15] : <https://www.bananarobotics.com>
- [16] : <http://www.piclist.com>
- [17] : ROBOT Vierzon 2010/2011 *Alexandre CASTAN-VARLET, Gauthier CHAVET,
Bastien DELRUE, Benoit PAGES, Marius RICHARD, Loïc VOSSIER*
- [18] : Contribution à l'étalonnage géométrique des robots industriels *Par : Toufik
BENTALEB Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique*
- [19] : <http://www.positron-libre.com>
- [20] : http://fr.wikipedia.org/wiki/Transistor_Darlington
- [21] : http://www.mon-clubelec.fr/pmwiki_mon_club_elec/pmwiki.
- [22] : <http://www.mdpmotor.fr>

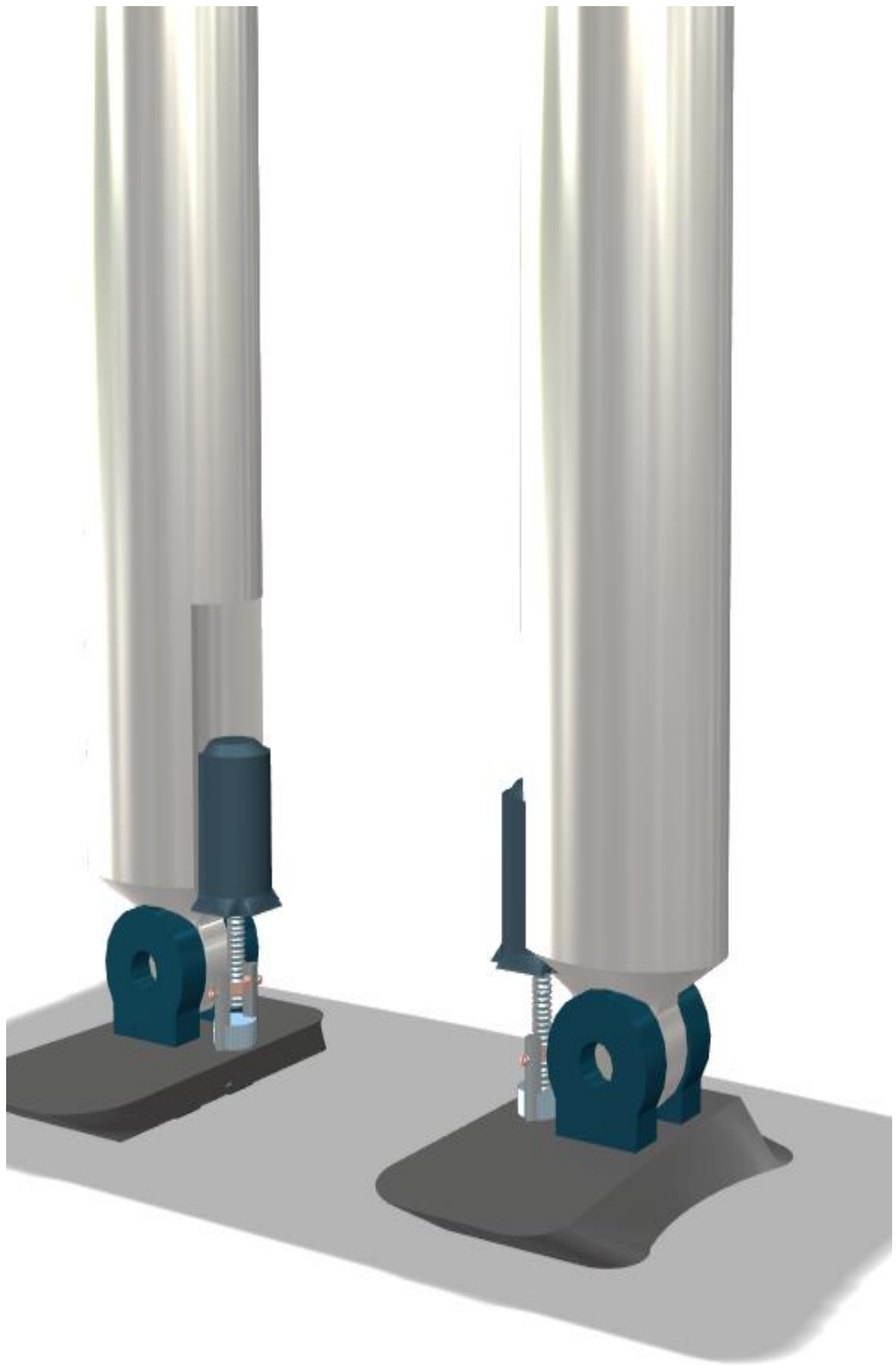
[23] : <http://bouhajalamia.weebly.com/deacutetecteur-drsquoobstacle.html>

Annexe A
Dessins mécaniques









Annexe B Feuilles de spécifications des pièces.

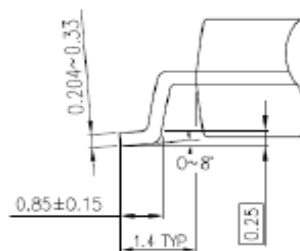
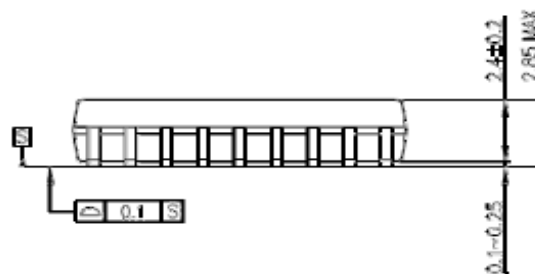
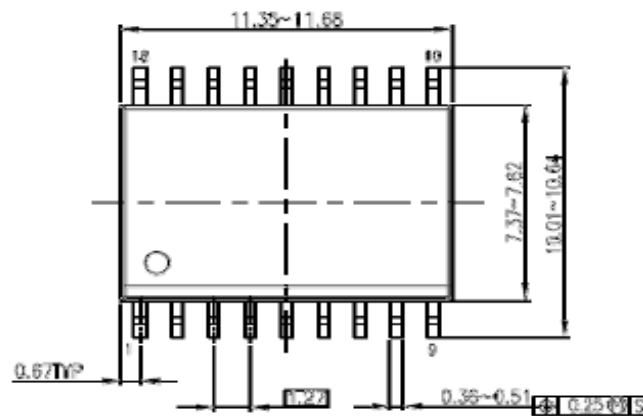
TOSHIBA

ULN2803,04APG/AFWG

Package Dimensions

P-SOP18-0812-1.27-001

"Unit : mm"



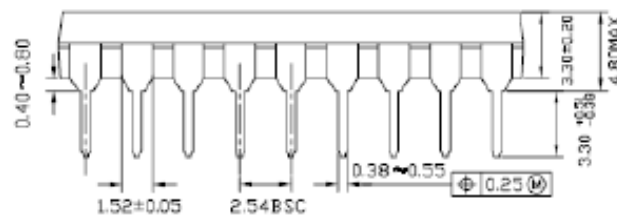
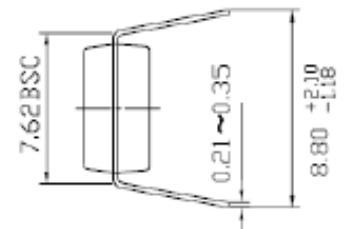
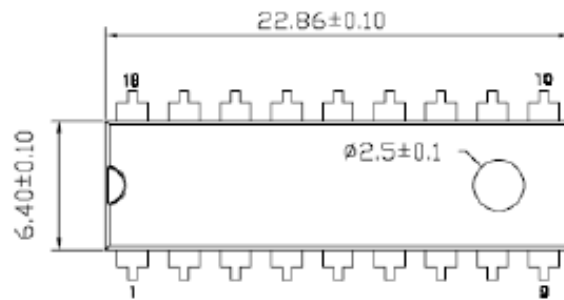
Weight: 0.48 g (typ.)

This drawing is an object for explanation.

Package Dimensions

P-DIP18-300-2.54-001

"Unit : mm"



Weight: 1.478 g (typ.)

This drawing is an object for explanation.

TOSHIBA Bipolar Digital Integrated Circuit Silicon Monolithic

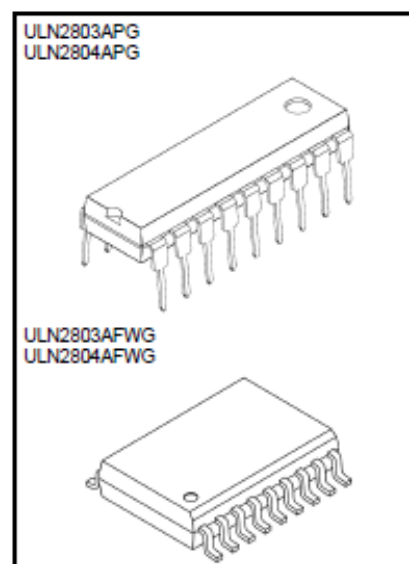
ULN2803APG, ULN2803AFWG, ULN2804APG, ULN2804AFWG

8ch Darlington Sink Driver

The ULN2803APG / AFWG Series are high-voltage, high-current darlington drivers comprised of eight NPN darlington pairs. All units feature integral clamp diodes for switching inductive loads. Applications include relay, hammer, lamp and display (LED) drivers.

Features

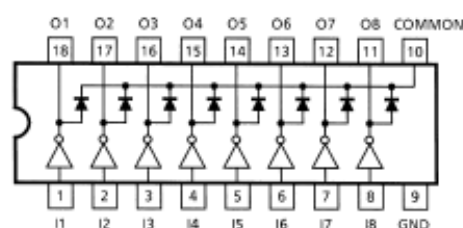
- Output current (single output)
500 mA (max)
- High sustaining voltage output
50 V (min)
- Output clamp diodes
- Inputs compatible with various types of logic.
- Package Type-APG : DIP-18pin
- Package Type-AFWG : SOP-18pin



Weight
P-DIP18-300-2.54-001: 1.478 g (Typ.)
P-SOP18-0812-1.27-001: 0.48 g (Typ.)

Type	Input Base Resistor	Designation
ULN2803APG / AFWG	2.7 kΩ	TTL, 5 V CMOS
ULN2804APG / AFWG	10.5 kΩ	6~15 V PMOS, CMOS

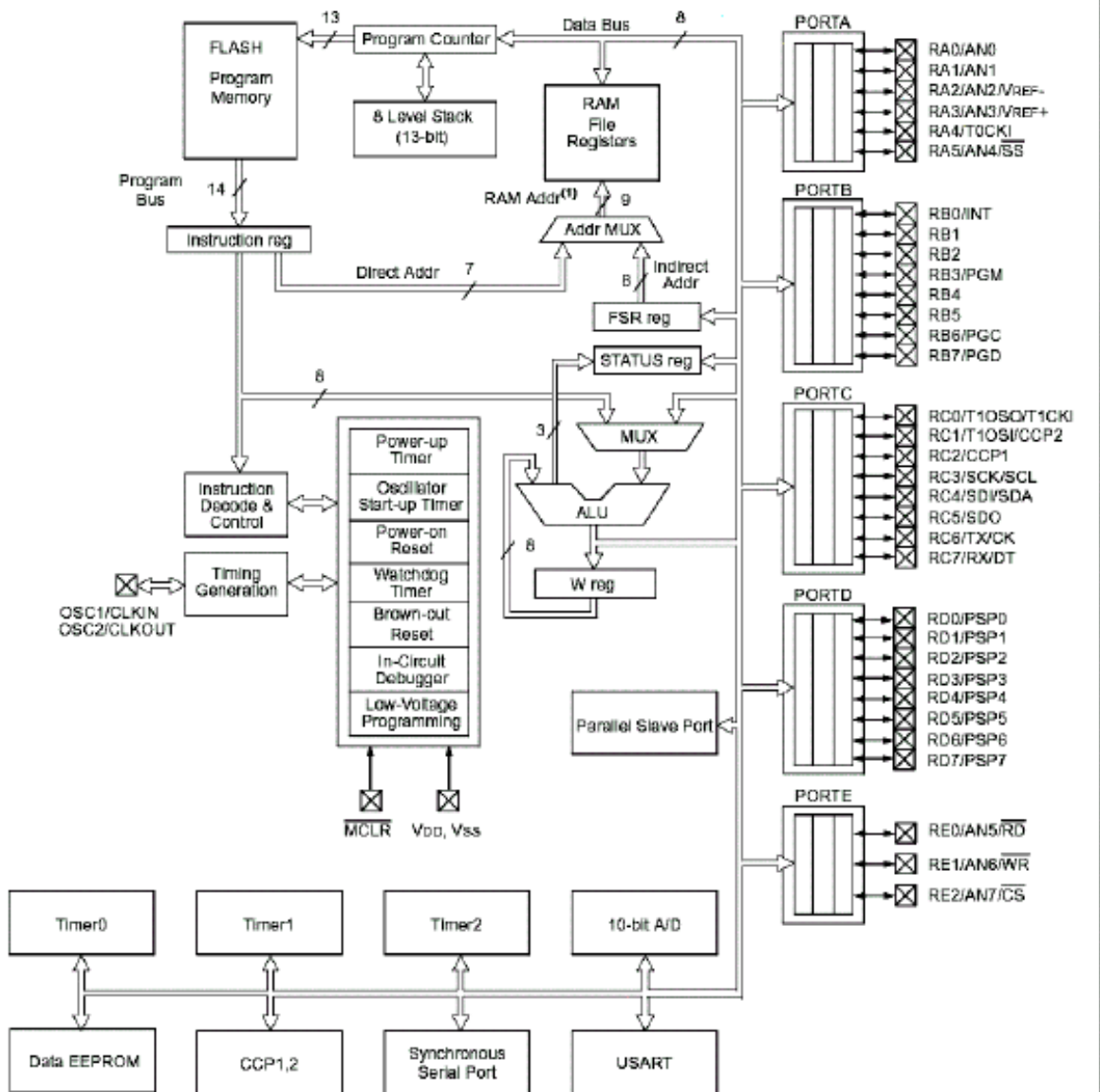
Pin Connection (top view)



Le PIC16F877 (Microchip)

...PIC16F874 AND PIC16F877 BLOCK DIAGRAM

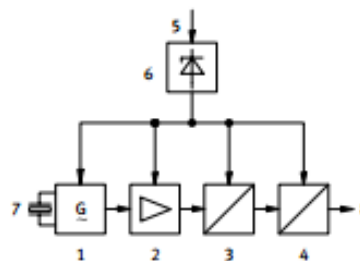
Device	Program FLASH	Data Memory	Data EEPROM
PIC16F874	4K	192 Bytes	128 Bytes
PIC16F877	8K	368 Bytes	256 Bytes



Note 1: Higher order bits are from the STATUS register.

177469

Analog ultrasonic distance sensor



- | | | | |
|---|----------------------------|---|----------------------------------|
| 1 | Oscillator | 5 | External voltage |
| 2 | Amplifier | 6 | Internal constant voltage supply |
| 3 | Evaluation unit | 7 | Ultrasonic transducer |
| 4 | Output signal conditioning | 8 | Output: Current signal |

Design

The ultrasonic sensor is mounted on an aluminium bracket. Assembly is effected by means of a T-head nut and a knurled screw.

Function

The operational principle of an ultrasonic sensor is based on the generation of acoustic waves and their detection when reflected by an object. Normally, atmospheric air serves as a carrier of the ultrasonic waves.

A transducer is actuated briefly and emits an ultrasonic pulse, which is inaudible to the human ear. After emission, the ultrasonic pulse is reflected by an object within the range of the sensor and reflected back to the receiver. The transit time of the ultrasonic pulse is subsequently electronically evaluated. Within a defined range, the output signal is proportional to the signal transit time of the ultrasonic pulse.

