

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

Mémoire

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **Master Professionnel**

En : Génie Electrique

Spécialité : Electronique industrielle

Par : Melle. MANSOURA Lila & Melle. BAIT Lyliya

Thème

Contrôle automatique de la locomotion d'un robot bipède

Soutenu publiquement, le 26/09/2018, devant le jury composé de :

Mr. Y. ATTAF	Prof.	à l'UMMTO	Président
Mr. K. ABAINIA	M.A.B	à l'UMMTO	Promoteur
Mr. M. A. KHELIFA	M.A.B	à l'UMMTO	Examineur

Remerciements

Nous tenons, à remercier notre promoteur Mr Abania Kheireddine pour son suivi, ses orientations éclairés et sa disponibilité tout au long de notre travail

Nous remercions le président et les membres de jury, de nous avoir accordé l'honneur d'examiner et de valoriser notre travail

Un grand merci a nos parents, frères, sœurs, et amis pour leurs soutiens

Dédicaces

A nos mères

A nos pères

A nos frères et sœurs

A nos amis et nos collègues de la promotion 2017/2018

Electronique industrielle

Lila & Lylia

Résumé

La robotique **humanoïde** (et **bipède**) est devenue un domaine fascinant qui intéresse beaucoup de chercheurs à travers le monde. C'est un domaine où le mécanicien, l'informaticien et l'électronicien peuvent collaborés ensemble pour un seul objectif, i.e. développer un robot fiable et capable de faire plusieurs tâches sans consommer trop d'énergie et de garder son allure (**stabilité**).

Les concepteurs cherchent à améliorer leurs robots selon le besoin (médecine, militaire, pédagogie, service à domicile, etc.). Or, la **locomotion** et la **stabilité** de ce genre de robots restent toujours un problème dans la recherche en **robotique**, et afin de répondre à ce problème ils ont développé différentes techniques et **algorithmes**.

L'objectif de ce travail est de **générer automatiquement** les mouvements d'un robot **bipède**, i.e. **Kheirobot v2.0**, en utilisant une approche bio-inspirée (**algorithme des chauves-souris**).

Table des matières

Liste des figures

Introduction générale.....	8
Chapitre I : Généralités sur les robots humanoïdes	
1. Introduction	10
2. Historique des robots humanoïdes.....	10
3. Etude biomécanique de la marche.....	11
3.1. Décomposition du cycle de marche chez l'humanoïde	12
3.1.1. Phase simple support.....	12
3.1.2. Phase double support.....	12
3.1.3. Phase d'impact	13
3.2. Les caractéristiques du pas.....	13
4. Robots humanoïdes existants.....	14
4.1. Les robots de Honda.....	14
4.2. Le robot Wabian-2.....	15
4.3. Les robots bipèdes de MIT.....	16
4.4. Le robot Sony QRIO.....	16
4.5. Toyota motor corporation (TMC).....	17
4.6. Le robot français Bip2000.....	18
4.7. Le robot ATLAS.....	18
4.8. Le robot RoNa.....	19
4.9. Le robot Zeno R25 de RoboKind.....	20
5. Domaines d'utilisation des robots humanoïdes.....	21
5.1. Accueil et collecte d'informations	21
5.2. Serveur de café.....	21
5.3. Services à domicile.....	22
5.4. Formateur et pédagogue	22
5.5. Robot humanoïde en médecine.....	22
5.6. Robot humanoïde militaire.....	22
6. Travaux de recherche effectués sur les robots humanoïdes et bipèdes.....	23
7. Conclusion.....	23
Chapitre II : Etude de la biomécanique des robots bipèdes	
1. Introduction.....	24
2. Conception mécanique des robots bipèdes.....	24
3. Plans de mouvement.....	26
4. Le centre de masse.....	26
5. Polygone de support.....	27
6. Equilibre de robot.....	28
6.1. Stabilité statique.....	28
6.2. Stabilité dynamique.....	29
7. Conclusion.....	30
Chapitre III : planification de mouvement du robot bipède	
1. Introduction.....	31
2. Conception de robot Kheirobot v2.0.....	31
2.1. Arduino.....	31
2.2. La commande.....	32

2.3. Radio fréquence (émetteur récepteur radio).....	33
2.4. Le servomoteur.....	35
3. Algorithme de chauve-souris.....	36
3.1. Echolocalisation.....	36
3.2. Comportement des chauves-souris.....	36
3.3. Optimisation par l'algorithme des chauves-souris.....	38
4. Conclusion.....	39
Conclusion générale.....	41

Liste des figures

Figure 1.1 Phases d'un cycle de marche	12
Figure 1.2 Le déroulé du pied au cours de la marche humaine.....	13
Figure 1.3. Caractéristiques du pas.....	14
Figure 1.4. Quelques réalisations de robots humanoïdes de <i>Honda</i>	14
Figure 1.5. Robot <i>ASIMO</i> de <i>Honda</i>	15
Figure 1.6. Le robot <i>Wabian-2</i> . A gauche une photo réelle et à droite un schéma cinématique.....	15
Figure 1.7 Série de robots de MIT.....	16
Figure 1.8. Les robots <i>QRIO</i> de Sony. A gauche <i>SDR 3X</i> et à droite <i>SDR 4X</i>	17
Figure 1.9. Robot marcheur <i>Toyota-1</i>	17
Figure 1.10. Le robot <i>Bip2000</i> . A gauche une photo réelle et à droite le schéma cinématique.....	18
Figure 1.11. Le robot <i>ATLAS</i> de Boston Dynamics.....	19
Figure 1.12. Le robot <i>RoNA</i>	20
Figure 1.13. Le robot <i>Zeno</i>	20
Figure 1.14. Le robot d'accueil <i>Josie Pepper</i> à l'aéroport de Munich.....	21
Figure 1.15. Le robot serveur <i>Cafero</i>	21
Figure 1.16. Le robot militaire russe <i>fedor</i>	22
Figure 2.1. Différentes structures du robot bipède dans le plan sagittal.....	25
Figure 2.2. Différentes structures du robot bipède dans le plan frontal.....	25
Figure 2.3. Plans principaux dans lesquels les mouvements prennent lieu.....	26
Figure 2.4. Illustration du centre de masse (CM).....	27
Figure 2.6. Le polygone de support en simple et double support.....	28
Figure 2.7. Marche statique bipède.....	28
Figure 2.8. Marche dynamique bipède.....	29
Figure 3.1. Schéma cinématique du robot <i>Kheirobot v2.0</i>	31
Figure 3.2. Modélisation 3D du robot <i>Kheirobot v2.0</i> pour la simulation.....	32
Figure 3.3. Architecture d'une carte <i>ArduinoUno</i>	33
Figure 3.4. Module radio <i>nRF24L01+</i>	34

Figure 3.5. Schéma électrique de nRF24L01+.....	34
Figure 3.6. Fiche de commande d'un servomoteur.....	36
Figure 3.7. Exemple d'écholocalisation.....	37
Figure 3.8. Organigramme de l'algorithme des chauves-souris.....	40
Tableau 1.1. Les caractéristiques du robot ATLAS.....	19

INTRODUCTION GENERALE

Au contraire de ce que l'on peut imaginer, la robotique n'est pas un domaine nouveau. L'histoire fascinante de la robotique a commencé depuis des siècles, où des traces laissées par les anciennes civilisations montrent que les créatures artificielles ont été toujours présentes dans la vie de l'homme. En fait, dès la création des premières créatures artificielles comme la *Dame à la Capuche* (appelée aussi *Dame de Brassempouy*) par les anciennes civilisations de la préhistoire en passant par les automates *Jaquemarts* du moyen-âge, le premier robot de forme humaine de *Léonard de Vinci*, les automates du siècle des Lumières de *Jacques de Vaucanson*, les premières machines de *Turing* et le premier robot *UNIMATE 0014 (Universal Automation)* de *Georges Charles Devol* sont les premières vraies recherches dans le domaine de la robotique, jusqu'à la construction des robots les plus sophistiqués de nos jours.

Le Japon est incontestablement le pays de la robotique humanoïde. L'initiation de projets de recherche pilotés par le Professeur *Kato* dans les années 60 à l'université de Waseda, a joué un rôle fondamental dans l'élaboration des robots humanoïdes [Sandra Oliveira , 2016].

Aujourd'hui, la recherche sur la locomotion des robots humanoïdes et bipèdes constitue l'un des axes les plus fascinants de la robotique. L'imitation de la marche de l'homme par une machine qui n'a pas de cerveau est un sujet crucial. Les multitudes de solutions existantes varient selon le temps, la technologie et les coûts qui affectent la perfection de la dynamique et la souplesse du mouvement du robot. L'intérêt du robot humanoïde réside principalement par le fait qu'il est possible de réaliser la plupart des opérations que nous accomplissons quotidiennement. Les objectifs sont de le faire intervenir dans les situations dangereuses pour l'homme, et de l'assister dans des tâches complexes ou nécessitant la force et la précision, ou encore pour accompagner l'homme dans les tâches de la vie quotidienne [Nada Kherici et Yamina Mohamed Ali, 2014].

Dans ce travail, nous nous intéressons au contrôle automatiquement de la locomotion d'un robot bipède, i.e. *Kheirobot v2.0*¹, qui est un cas particulier des robots humanoïdes (le bas du robot humanoïde). Plus spécifiquement, nous adressons la planification du mouvement du robot, où notre but est de générer les angles de rotation des articulations tout en gardant la stabilité du robot pendant la marche. Au début, le mouvement du robot *Kheirobot* a été planifié manuellement par son concepteur (*Abainia Kheireddine*) en cherchant les bonnes valeurs des angles (8 angles correspondants à 8 degrés de liberté), d'où il peut effectuer différentes actions, i.e. marcher, faire un grand écart, frapper un ballon, etc.

La planification du mouvement manuellement est une tâche ardue et plus coûteuse en termes de temps. Donc, pour y remédier, on a besoin d'utiliser un algorithme qui fait le job automatiquement. A cet égard, nous avons penché sur l'algorithme évolutionnaire bio-inspiré, i.e. algorithme des *Chauves-souris* ou *Bat*. C'est une nouvelle méta-heuristique qui a prouvé

¹ <https://www.youtube.com/watch?v=DZ1AnPju9BM>

sa robustesse dans différents domaines de recherche, et c'est grâce à son puissant mécanisme de recherche des solutions.

Cette thèse est scindée en trois chapitres au total, où nous consacrons le premier aux généralités en présentant un petit historique sur la robotique humanoïde et quelques réalisations, les domaines d'utilisation et quelques travaux scientifiques effectués dans ce domaine. Ensuite, dans le second nous étudions la locomotion des robots bipèdes en tenant compte de la conception mécanique des bipèdes, le centre de masse (CM) et ses caractéristiques, le polygone de support et le ZMP (le point nul des moments). Enfin, dans le dernier chapitre, on décrit la conception du robot Kheirobot v2.0 avec sa modélisation 3D pour la simulation, ainsi l'algorithme des Chauves-souris pour résoudre le problème adressé.

CHAPITRE I

Généralités sur les robots humanoïdes

1. Introduction

Afin de concevoir un robot marcheur, on doit faire appel à une grande diversité de compétences, orles quatre grandes disciplines présentes dans l'élaboration d'une structure robotique sont : la mécanique, l'automatique, l'informatique et l'électronique. En comparant les différents robots marcheurs, i.e. bipèdes, humanoïdes, quadrupèdes, hexapodes et octopodes, les robots bipèdes présentent l'intérêt de pouvoir être impliqués dans des recherches en biomécanique. Les expérimentations sur les robots humanoïdes peuvent participer activement à une meilleure compréhension de la locomotion humaine et de ses pathologies, dans le but d'aider au diagnostic et à la conception de prothèses et d'orthèses

[Oliveira, 2016].

Dans ce chapitre, nous présentons des généralités sur les robots humanoïdes, ainsi les robots bipèdes qui sont une variante du premier type. Ensuite, nous présentons une étude théorique sur la biomécanique de la marche humaine, ainsi quelques robots existants et leurs domaines d'utilisation. A la fin, nous citons quelques travaux scientifiques effectués dans ce domaine.

2. Historique des robots humanoïdes

L'idée des robots existait depuis l'antiquité, où dans le troisième siècle avant Jésus-Christ, les premiers mécaniciens de la Grèce antique Héron d'Alexandrie et Philon de Byzance se penchent sur la question des automates. Par conséquent, ils inventèrent des humanoïdes animés par l'eau, l'air et la vapeur d'eau. Une serveuse automate qui s'anime quand une coupe est posée dans sa main, sous l'effet de la gravité, et remplit le verre de vin puis d'eau par un système de valves [Galdeano, 2016].

Le premier robot humanoïde doté d'une marche bipède est appelé *WABOT-1*, et a été fabriqué en 1973 à l'université de *Waseda* au Japon. Ce robot, doté d'un ordinateur embarqué, est capable de voir, de marcher, de parler et d'attraper des objets [Aurousseau, 2012]. Depuis, la robotique humanoïde intéresse presque tous les pays développés ou en voie de développement. En 1984, la même université (*Waseda*) effectua des améliorations à la première version de *WABOT-1*, capable de jouer au piano (*WABOT-2*).

En 1996, *Honda* annonça l'arrivée de son nouveau robot *ASIMO* (*Advanced Step in Innovative Mobility*) qui peut monter et descendre les escaliers comme il peut marcher dans un terrain plat. *ASIMO* a été exposé au grand public en 2000 comme premier robot humanoïde capable de courir, et ceci pour démontrer leur savoir faire (*Honda*) mais n'est pas disponible à la vente

En 2005, la Corée du sud s'incrusta dans le développement des robots humanoïdes avec son projet de *KAIST* (Korea Advanced Institute of Science Technology). *KAIST* présenta sa première version du robot nommée *HUBO* puis une deuxième nommée *Albert HUBO*. Dans la même année 2005, *Toyota* lance le robot *PARTNER* qui est capable de jouer de la trompette et du violon [Aurousseau, 2012].

Entre 2005 et 2008, *Aldebaran-Robotics*, une entreprise française créa la surprise en présentant le robot *NAO*, un petit robot humanoïde qui est largement diffusé dans les laboratoires de recherche et les universités du monde entier vu son prix raisonnable et sa technologie avancée. A la même époque, l'*IIT* (Istituto Italiano di Tecnologia), en partenariat avec plusieurs laboratoires européens, présente le *iCub* un petit robot d'environ 1m possédant 53 degrés de liberté et capable de voir et d'entendre [Aurousseau, 2012].

En 2009, un premier projet collaboratif, *ROMEO* de *Aldebaran-Robotics* financé par le *FUI* (Fonds Unique Interministériel) qui consista la réalisation d'un robot de grande taille, adapté à l'environnement domestique pour faciliter l'interaction et permettre de remplir des tâches du quotidien.

En 2012, le projet *ROMEO 2a* a été labellisé par *Cap Digital* et soutenu par *Bpifrance* comme projet structurant des pôles de compétitivité (*PSPC*) du programme d'investissements d'avenir. Ce projet de 4 ans regroupe 16 partenaires industriels et académiques [Aurousseau, 2012].

Actuellement, on trouve des robots humanoïdes de taille humaine plus développés et dotés de mouvements plus fluides. On note également le *HRP-4* et *Atlas* :

- Le *HRP-4* a été développé par la recherche publique japonaise (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology) et commercialisé par Kawada Industries. D'une taille de 151 cm, pesant 39 kg et doté de 34 degrés de liberté (DDL), ce robot est conçu aux dimensions d'un être humain afin d'ouvrir de nouvelles voies de recherche [Fatoux, 2014].
- L'*Atlas* a été créé par Boston Dynamics pour la DARPA (défense militaire américaine). D'une taille de 180 cm, pesant 150 kg et doté de 28 DDL. Ce robot a été développé pour l'intervention en zone de désastre comme la catastrophe nucléaire de Fukushima.

3. Etude biomécanique de la marche

La marche est une activité qui permet de bouger les jambes pour se déplacer. Elle semble simple et automatique, mais toutefois elle requiert un apprentissage depuis l'enfance (généralement entre le 10^e et le 14^e mois) en différentes étapes successives pour devenir un geste naturel que nous employons tous les jours (Plas, 1979). Pour une marche en terrain plat, à allure confortable elle peut osciller entre 100 et 130 enjambées à la minute chez l'adulte, et en considérant un écart de 60 cm de talon à talon, cela donne une vitesse optimale de 4,5 à 5,85 Km/h. Avec une cadence de 120 enjambées par min, on a donc 60 cycles par minute, d'où on peut déduire facilement la durée moyenne du cycle qui est égale à environ une seconde.

La biomécanique définit la marche comme une activité rythmique symétrique et coordonnée des deux membres inférieurs, et peut être décomposée en cycles successifs alternant les phases d'appuis (simples ou doubles) et phases oscillantes. Cette alternance est appelée, dans la littérature, cycle de marche [Lepoutre, 2008].

3.1. Décomposition du cycle de marche chez l'humanoïde

La marche humanoïde est un enchaînement de phases de simple et double support semblables à celle de l'humain, mais les proportions entre simple et double support peuvent être différentes [Bacha, 2010].

3.1.1. Phase simple support

La phase simple support ou simple appui, 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, et 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 [Chemori, 2005].

Durant la phase simple support, un seul pied est en contact avec le sol et le second effectue un mouvement de balancement vers l'avant. Cette phase est subdivisée en trois sous-phases :

- **L'accélération** : commence dès que le pied quitte le sol, et le marcheur utilise les muscles de la hanche pour accélérer la jambe vers l'avant.
- **Le milieu de balancement** : a lieu lorsque le pied passe juste sous le corps.
- **La décélération** : décrit l'action des muscles qui ralentissent la jambe et stabilisent le pied par anticipation du prochain contact du talon avec le sol.

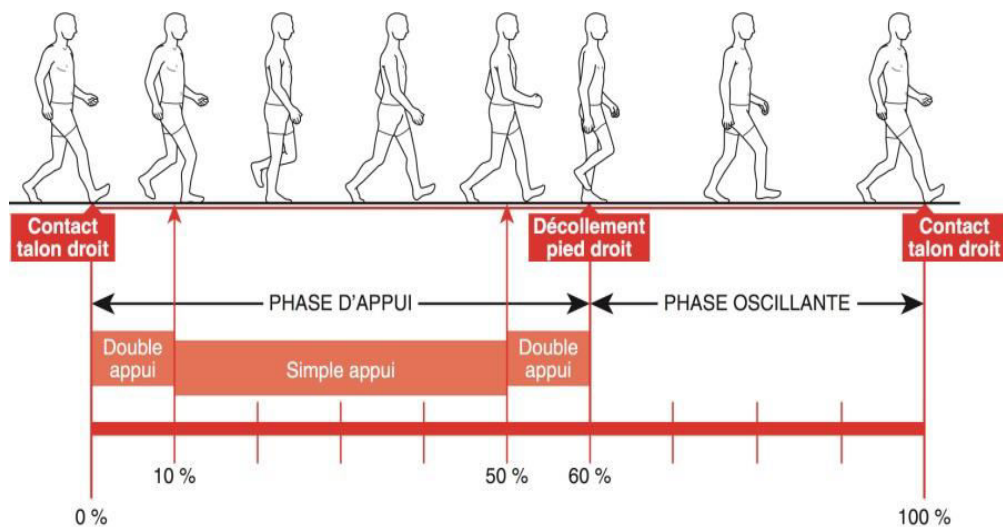


Figure 1.1 Phases d'un cycle de marche

3.1.2. Phase double support

Le double support est une phase de la marche durant laquelle les deux pieds sont en contact avec le sol. Sa durée est plusieurs fois inférieure à la durée de la phase simple support, d'où elle constitue entre 20% et 30% du cycle de marche [Heddouche, 2014]. Cette phase peut être divisée en cinq sous-phases :

- **L'attaque du talon** : initialise le cycle de marche et représente le moment où le centre de gravité du corps est au plus bas.
- **Le pied à plat au sol** : apparaît lorsque le pied repose sur toute sa longueur.
- **Mi-appui (appui monopodal)** : dans cette sous-phase de la marche, la mise en charge pendant l'appui unilatéral est progressive. Le pied supporte le poids du corps et il se produit une poussée nécessaire à l'accélération verticale du centre de gravité.
- **Le décolllement du talon** : se produit lorsque le talon perd le contact avec le sol et une poussée est engendrée par les muscles, ce qui entraîne le fléchissement plantaire de la cheville.
- **Le décolllement des orteils** : termine la phase double support dès que le pied quitte le sol.



Figure 1.2 Le déroulé du pied au cours de la marche humaine [Omran, 2017]

3.1.3. Phase d'impact

Contrairement aux humains, un robot humanoïde a souvent un pied droit. Ceci se traduit par un impact pendant sa marche, dû à la rigidité qui amorti peu le choc et à la vitesse non nulle de contact entre le pied et le sol [Galdeano, 2016].

Cette phase d'impact peut être dangereuse pour le robot, car elle est potentiellement destructive. Au moment de l'impact, une force extérieure de grande amplitude est appliquée via le pied d'impact, sur toute la jambe. Si cette phase n'est pas prise en compte, les réducteurs, moteurs, et même la structure du robot peuvent subir des dégradations mécaniques. Dans les cas les plus extrêmes, cette situation peut amener à une rotation des moteurs créant ainsi un pic de courant important qui influence négativement sur l'électronique du robot. La plupart des lois de commande cherchent donc à minimiser la force de l'impact au cours de cette phase [David Galdeano].

3.2. Les caractéristiques du pas

Un autre type d'information peut aider à l'étude du mouvement de la marche. Il est fourni par le pas qui représente deux appuis successifs du pied lors de la marche. Il se caractérise par :

- **Longueur du pas** : c'est la distance qui sépare les deux appuis successifs. On la mesure du talon au talon. La longueur du pas dépend avant tout de la dimension des leviers osseux.

- **Vitesse:** Elle est le produit de la longueur du pas par leur nombre, en un temps déterminé. Dans la plupart des cas, la longueur du pas augmente avec la cadence mais, on peut voir des cadences rapides avec des pas très courts.
- **Largeur du pas:** Elle se mesure en prenant la distance entre les lignes de progression d'un talon à l'autre. Sa moyenne est de 6 cm chez un être humain de taille normale en terrain plat. L'élan latéral aura donc à faire réaliser à chaque pas un transfert de droite à gauche et de gauche à droite de 12 cm au centre de gravité pour que celui-ci devienne portant alternativement [Hadidi, 2010].
- **Angle du pas:** Il s'agit de l'angle formé par le pied avec la ligne de progression (normalement 15°).

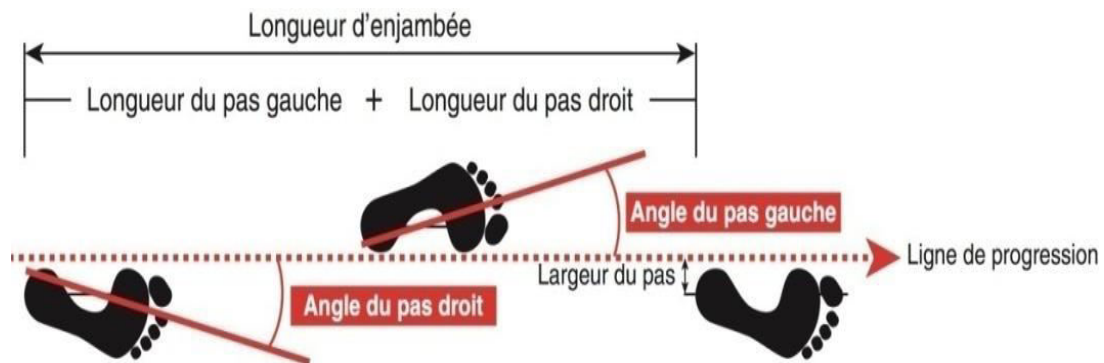


Figure 1.3. Caractéristiques du pas [Hadidi, 2010].

4. Robots humanoïdes existants

4.1. Les robots de Honda

Honda a débuté ses recherches sur la robotique en 1986 et a créé au total plus de 100 robots sous plusieurs modèles différents, i.e. E0 à E6 et P1 à P3. Le premier modèle de robot Honda était le P1 en 1993, et était capable de marcher sur deux pattes de façon équilibrée. Ensuite, le P2 et le P3 avec certaines améliorations.



Figure 1.4. Quelques réalisations de robots humanoïdes de Honda

Le dernier robot ASIMO (Advanced Step in Innovative Mobility) est beaucoup moins lourd que ses précédents, il pèse 43 kg et se déplace plus facilement. ASIMO est conçu avec une hauteur de 1,2 m et 34 degrés de liberté, et est capable de marcher à une vitesse de 0,3 m/s. Il

peut monter et descendre les escaliers comme il peut marcher dans un terrain plat ce qui permet d'effectuer des tâches tout comme un humain. Le robot humanoïde ASIMO peut agir de façon autonome et assurer un service permanent et fini.

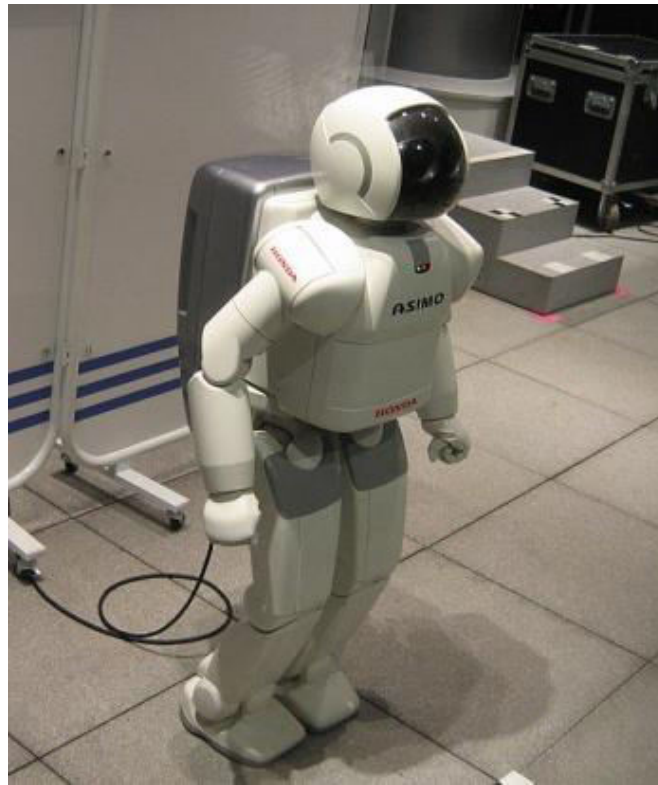


Figure 1.5. Robot ASIMO de Honda.

4.2. Le robot Wabian-2

Le robot *Wabian-2* (*WAsedaBIpedalhumANoid 2*) est le dernier humanoïde marcheur que l'université japonaise *waseda* a créé (Figure 1.6). Ce robot a pour vocation la simulation de mouvement humain, d'où son système de locomotion possède des redondances qui sont utiles dans certains cas particuliers.

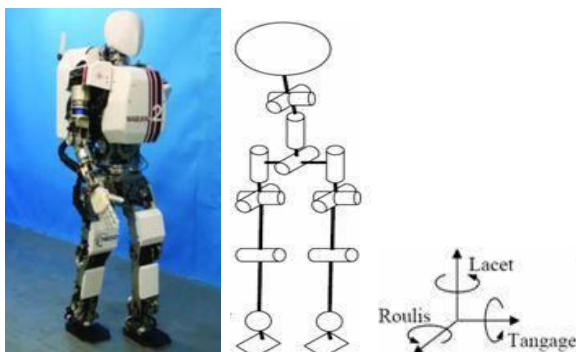
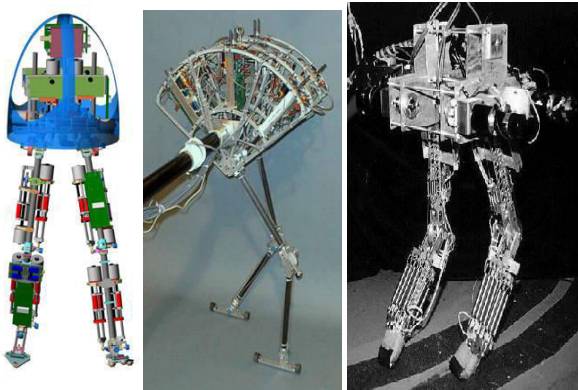


Figure 1.6. Le robot *Wabian-2*. A gauche une photo réelle et à droite un schéma cinématique.

Le robot Wabian-2R (date de 2009) a été conçu avec 1500mm de hauteur et 64kg de poids afin d'imiter les mouvements humains. Il a 41 DDLs avec une gamme mobile des articulations conçue en référence à celle de l'homme.

4.3. Les robots bipèdes de MIT

Certains bipèdes sont inspirés des oiseaux avec les pattes qui se plient dans le sens inverse des genoux de l'être humain, comme le *M2*, *Spring-Turkey* et le *Flamingo-Spring* du MIT.



a. M2

b. Springer-Flamingo

c. Spring-Turkey

Figure 1.7 Série de robots de MIT

- **Le Springer-Turkey** (1994-1996) est un robot bipède capable de marcher sur un terrain plat. Ce robot a été développé comme une plate-forme expérimentale pour la mise en œuvre des applications (commande). Ses moteurs actionneurs sont placés dans son corps supérieur, la puissance étant transmise aux joints par l'intermédiaire des courroies. Il pèse environ 10 kg et a une hauteur de 60 cm.
- **Le Springer Flamingo** est un robot bipède planaire ayant 6 DDLs, et a été développé au laboratoire de patte de MIT par co-fondateur Jerry Pratt de Yobotics. Le Springer-Flamingo est capable de marcher à une vitesse de 1.25 m/s.
- **Le M2** ayant 12 DDLs. C'est un bipède tridimensionnel développé au laboratoire de patte de MIT par co-fondateur Dan Paluska de Yobotics.

4.4. Le robot Sony QRIO

Sony Corporation a développé un petit robot bipède marcheur « SDR » (3X et 4X prototype). En synchronisant les mouvements de 24 articulations sur son corps, il peut effectuer des mouvements de base tels que la marche et le changement de direction. Ainsi, il peut se lever et maintenir son équilibre sur une patte pour donner un coup de pied à une boule, et peut danser.

4.5. Toyota motor corporation (TMC)

TMC a annoncé un ensemble de projets pour développer des robots collaborateurs conçus pour fonctionner comme aides personnel. Le robot marcheur Toyota-1 pèse 35 kg, ayant 120cm de longueur peut utiliser ses mains pour effectuer une multitude de tâches.



a. QRIO SDR 3x b. QRIO SDR 4x

Figure 1.8. Les robots *QRIO* de Sony. A gauche *SDR 3X* et à droite *SDR 4X*.

La compagnie Toyota utilise la même théorie de stabilisation (ZMP) qui se traduit pratiquement par la commande du robot à l'aide des capteurs de position et de forces.



Figure 1.9. Robot marcheur *Toyota-1*.

4.6. Le robot français Bip2000

Le robot bipède *BIP2000* est développé conjointement par INIRA et le laboratoire de mécanique des solides (LMS), et est de taille humaine de 1,80m et un poids de 96 kg. Il comporte deux pattes, un pelvis et un tronc. L'objectif de laboratoire est d'avoir une conception mécanique des jambes couplée avec l'étude de nouvelles techniques de contrôle dont les systèmes de puissance et de commande sont embarqués dans le tronc du robot. Le robot est capable de marcher de façon anthropomorphe sur un plan horizontal ou légèrement incliné et de monter et descendre des escaliers. Le but de ce robot est de pouvoir accompagner l'homme dans ses activités personnelles ou professionnelles.

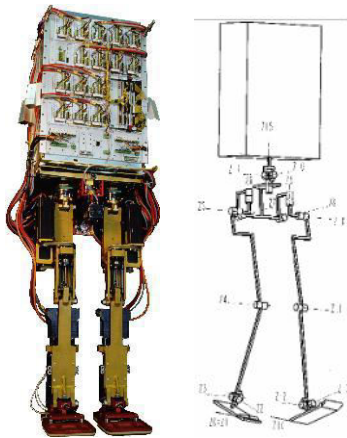


Figure 1.10. Le robot *Bip2000*. A gauche une photo réelle et à droite le schéma cinématique.

4.7. Le robot ATLAS

Boston Dynamics présente son humanoïde de dernière génération, i.e. ATLAS, sponsorisé par la DARPA. Un humanoïde de 1,87 m, de 131 kg et composé de 28 systèmes hydrauliques, dont l'objectif sera de sauver des vies dans les zones sinistrées mais aussi d'accomplir des missions pour le compte de l'armée. Il dispose de nombreuses particularités, dont celle de marcher sur un terrain accidenté (un équilibre est extrêmement évolué).

Malgré le robot est bien évolué, mais n'est pas totalement terminé (en cours d'expérimentation), où il lui manque encore un cerveau qui le fera fonctionner en toute autonomie et en toute circonstance. Pour cela, sept équipes de chercheurs scientifiques de grandes institutions de l'USA sont en compétition pour coder ATLAS. Chaque équipe pourra ensuite tester ses propres codes sur leur robot et ainsi démontrer qu'il est capable de réaliser 8 tâches différentes, de naviguer sur un terrain accidenté, conduire un véhicule utilitaire et entrer de façon autonome dans des bâtiments. On peut résumer les caractéristiques du robot ATLAS dans le tableau ci-dessous (Tableau 1.1).

Figure 1.11. Le robot *ATLAS* de Boston Dynamics.

Tableau 1.1. Les caractéristiques du robot ATLAS

Caractéristique	Description
Vision	Radar, caméras stéréo et des algorithmes de perception lui offrent un large champ de vision
Ordinateur	Un système embarqué surveille l'ensemble de ses capteurs et actionneurs de contrôle, il collecte des données et les communique à distance
Mains	ATLAS peut utiliser et tenir toutes sortes d'outils, certains robots ont même des doigts afin de pouvoir utiliser des petits outils comme des tournevis
28 Système hydraulique	Ils permettent à ATLAS de réaliser une large gamme de mouvements, s'accroupir, s'agenouiller, de sauter, monter les escaliers et se déplacer sur des terrains accidentés
Pieds	Il reproduit des mouvements souples allant des talons aux orteils pour faciliter son équilibre
Matériaux	Le robot est principalement en aluminium, en acier et en titane
Stature	1,87m pour 131kg

4.8. Le robot RoNa

Le robot assistant *RoNa* est créé par la société américaine *Hstar Technologies*, où il a été primé au *Game changer* organisé par *RoboBusiness* le 23 octobre 2013. L'humanoïde *RoNa* sera peut être la prochaine révolution dans les hôpitaux. C'est une aide précieuse pour soulever et déplacer des patients qui peuvent peser jusqu'à 136 kg en remplaçant les infirmiers et personnels hospitaliers. *RoNa* peut être soit contrôlé directement par le personnel soit de près, soit à distance par une autre personne. Ainsi, il peut communiquer à distance avec d'autres équipes médicales à partir d'un écran, et est également capable de reconnaître les voix et les images pour régir en fonction de certaines situations.

4.9. Le robot Zeno R25 de RoboKind

Le robot *Zeno R25* a été créé par la société américaine RoboKind. Le *Zeno R25* est un petit robot humanoïde doté d'une intelligence artificielle qui lui permet d'interagir avec les humains en détectant et en reproduisant leurs émotions. Un robot doté de nombreuses fonctionnalités et spécialisé dans le domaine de l'enseignement, car *ZENO R25* peut enseigner aux enfants de nombreuses matières, répondre à leurs questions en recherchant sur internet les bonnes réponses. Sa particularité principale est sa fluidité qui le rend très humain, or parmi ses 21 DDLs, il y en a 7 exclusivement pour sa tête lui permettant de bouger la bouche, la paupière, les yeux et le front. Doté d'une plateforme logicielle open source en Java et C++ pour être facilement programmable, il peut en plus enseigner des cours informatiques et même aider les enfants les plus fragiles à s'exprimer.

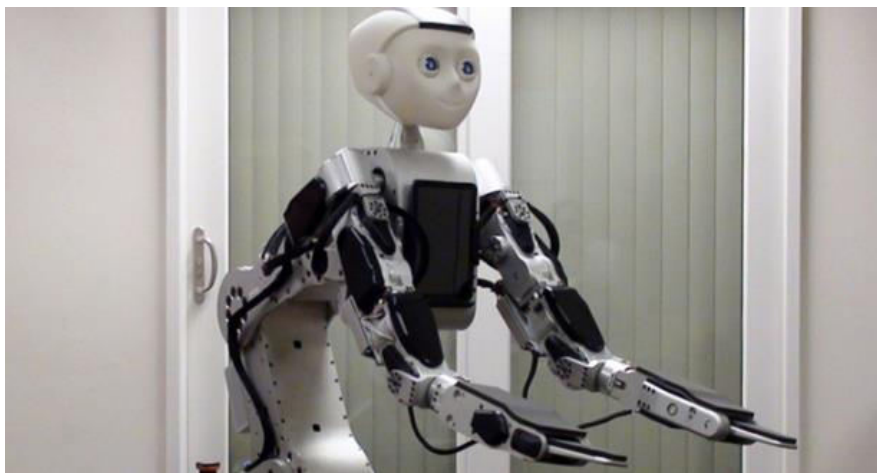


Figure 1.12. Le robot *RoNA*.



Figure 1.13. Le robot *Zeno*.

5. Domaines d'utilisation des robots humanoïdes

Les robots humanoïdes sont devenus une chose familière, où ils présentent des traits plutôt sympathiques, jeunes et souvent féminins. On trouve que beaucoup d'entreprises commencent à imaginer de l'intégrer dans de nombreux domaines, et on cite quelques uns :

5.1. Accueil et collecte d'informations

Josie Pepper est le nom du robot humanoïde conçu par *SoftbankRobotics* et déployé depuis février 2018 à l'aéroport de Munich. Il est implémenté en Cloud et doté d'un processeur de haute performance, où il peut composer des réponses personnalisées aux questions posées par les visiteurs.

5.2. Serveur de café

Le robot *Cafero* prend les commandes à partir d'un écran tactile disposé sur son torse, et il se déplace afin de récupérer les verres remplis grâce à un assistant humain. Ensuite, il retourne pour servir les clients en donnant leur boisson ou café.



Figure 1.14. Le robot d'accueil *Josie Pepper* à l'aéroport de Munich.



Figure 1.15. Le robot serveur *Cafero*.

5.3. Services à domicile

Les robots de service peuvent aider l'homme dans la réalisation des actes élémentaires, i.e. la communication avec la famille, l'hygiène corporelle, l'alimentation, la mobilité, les tâches ménagères, courses, le rappel de prise de médicaments et la surveillance, etc.

5.4. Formateur et pédagogue

Depuis quelques années, de plus en plus de robots investissent les salles de classe, tant en Amérique, en Asie qu'en Europe. Plusieurs études ont montré que ces robots possèdent des caractéristiques qui font d'eux de puissants outils éducatifs, en particulier pour les élèves ayant des difficultés d'apprentissage. L'utilisation des robots humanoïdes a montré, dans certains contextes particuliers, certains effets positifs sur les enfants [Karsenti, 2017]

5.5. Robot humanoïde en médecine

Si les relevées biologiques de la marche humaine sont une source d'inspiration pour la robotique bipède, en contre partie l'étude théorique et la mise en pratique des robots à deux pattes est un moyen précieux pour mieux comprendre les mécanismes de la marche humaine. En outre, il peut aider à réaliser des prothèses et des orthèses intelligents pour les personnes handicapées [Licer, 2008].

5.6. Robot humanoïde militaire

Un robot à deux pattes autonome peut remplacer les soldats humains et participer activement aux batailles terrestres (robot fantassin) ou au démantèlement des champs de mines.



Figure 1.16. Le robot militaire russe *fedor*.

6 .Travaux de recherche effectuée sur les robots humanoïdes et bipèdes

Plusieurs travaux ont été réalisés pour générer la marche des bipèdes ; une grande majorité des recherches sur le modèle de marche ont été réalisées sur la base du critère du point zéro (ZMP). Asuka Kondo et al (chercheurs à l'école supérieure de biosciences et de biotechnologie à Tokyo) ont décrit un algorithme pour générer des modèles de marche pour des simulations de démarches de personnes handicapées basé sur le critère ZMP.

Les recherches de Xuefeng basé sur la marche dynamique, il a mis a sa position un robot bipède avec 6 DDL avec une dynamique et une compensation de moment.

Harada et al se sont concentrés sur la génération du schéma de marche vers un bipède en trois dimensions de 7 DDL en introduisant des schémas de marche économes en énergie. Certains travaux sur la marche étaient basés sur le développement de la dynamique et d'autres sur les algorithmes d'optimisation. Baris et al, présentent un algorithme de marche omnidirectionnel basé sur la conception d'un signal pour un robot joueur de football, utilisant des stratégies d'évolution pour l'optimisation. Chang-Soo et al. Proposé également un générateur de modèle de marche en utilisant un algorithme évolutif quantique inspiré pour le générateur de pattern central (CPG). Enfin, dans les travaux de Kook-Jin et al, un algorithme génétique et un réseau neuronal utilisés pour l'optimisation de la posture en temps réel des robots humanoïdes. [Kherici, 2014]

7. Conclusion

Dance ce chapitre, on a présenté des généralités sur les robots humanoïdes et bipèdes en commençant par un bref historique sur cette catégorie de robots. Ensuite, nous avons détaillé la biomécanique de la marche des robots en étudiant la marche humaine. Nous avons cité également les différents robots humanoïdes existants et les caractéristiques de chacun, ainsi les domaines d'utilisation des robots humanoïdes et bipèdes. Enfin, nous avons cité quelques travaux scientifiques effectués sur les robots bipèdes, car on s'intéresse à cette variante des robots humanoïdes.

CHAPITRE II

Etude de la biomécanique des robots bipèdes

1. Introduction

On trouve la marche bipède chez l'être humain et plusieurs animaux (e.g. les oiseaux), mais certes la marche la plus sophistiquée est celle de l'être humain. C'est pour cette raison, l'homme est considéré comme une référence indiscutable dans l'étude de la locomotion bipède artificielle. On trouve que le corps humain est caractérisé par un système extraordinaire, où il est défini par [Chemori, 2007]:

- 29 DDLs et 48 muscles pour chaque membre inférieur (jambe).
- Un moteur pelvien pour la marche en terrain horizontal et la poussée du triceps sural (mollet), ainsi que 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 DDLs. Il est caractérisé aussi par une semelle plantaire épaisse et fixée, ainsi que par le jeu vertical et transversal des métatarses.
- Des capteurs d'accélération angulaire et linéaire permettant le contrôle des trajectoires en l'absence de contrôle visuel.

L'objectif principal de l'étude de la marche en robotique réside dans la conception et la réalisation de prototypes de robots marcheurs (bipèdes). Ces prototypes sont censés être capables d'imiter certains mécanismes de la marche humaine ou animale et d'aider ou de remplacer l'être humain dans des tâches difficiles [Heddouche, 2014]. Dans ce chapitre, nous étudions la locomotion des robots bipèdes, et les différentes caractéristiques de cette dernière.

2. Conception mécanique des robots bipèdes

Les robots bipèdes sont des systèmes mécatroniques complexes qui peuvent être vus comme une chaîne arborescente d'articulation de corps rigides dans l'espace. Or, il est obligatoire de prendre en considération la structure mécanique et les algorithmes utilisés pour une application visée [Oleivra, 2016]. En effet, le poids et la puissance du robot jouent un rôle primordial dans la conception de sa structure, où il doit comporter un nombre élevé d'articulations dans un volume réduit. En outre, ce système doit être équilibré en permanence, i.e. équilibre statique ou dynamique.

Plusieurs architectures différentes de robots ont été choisies. Le nombre de liens, de DDLs et de plans de mouvement varie en fonction des capacités recherchées, des objectifs de construction du robot bipède et de l'avancement du projet [Heddouche, 2007]. Il est évident que plus les objectifs de mouvement sont grands, plus le robot aura besoin de plus de DDLs. Certains chercheurs ont développé une version tridimensionnelle du robot ce qui rend la stabilité plus complexe, car elle doit être recherchée dans le plan sagittal et frontal simultanément. D'autre part, les chercheurs ayant comme premier objectif d'étudier la locomotion humaine ont d'abord construit des robots plans, ce qui permet d'étudier la locomotion en simplifiant considérablement l'analyse du système [Galdeano, 2016]. En négligeant le plan frontal, il est encore possible d'étudier les trajectoires et la dynamique dans le plan sagittal, soit le plan dans lequel se déroule la partie la plus importante de la marche.

Dans le plan sagittal, la structure élémentaire est celle ressemblant à un compas avec trois corps et deux articulations au niveau des hanches (Figure 2.1.a). Cette structure de base très simple apporte énormément d'informations sur la conception et la commande de bipède. L'ajout de genoux (Figure 2.1.b) permet d'éviter le frottement du pied mobile avec le sol. Donc, la structure la plus complète dans le plan sagittal (Figure 2.1.c) comprend une articulation aux chevilles (appelée bipède à 7 corps).

Le passage à des robots de trajectoire 3D nécessite des articulations supplémentaires dans le plan frontal. En particulier, elles sont très souvent placées aux hanches (Figure 2.2.a), d'où elles permettent des mouvements latéraux. Ainsi, elles permettent également un déplacement du centre de masse au dessus de la jambe d'appui, une stabilisation du mouvement latéral et l'inclinaison de l'ensemble du robot lors d'un changement d'orientation [Moubihan, 2005]. Le déplacement du centre de masse et la stabilisation du mouvement peuvent également être obtenus par une articulation du tronc au niveau du bassin (Figure 2.2.b et Figure 2.2.c).

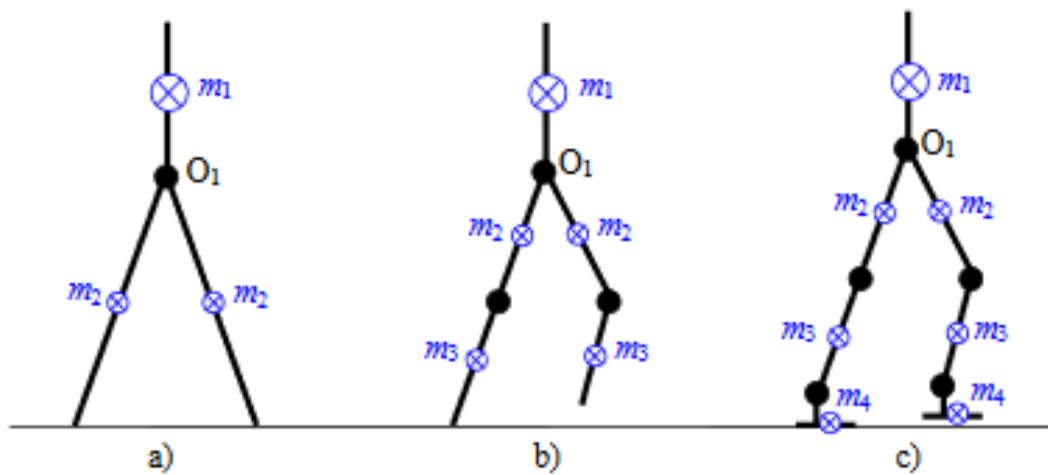


Figure 2.1. Différentes structures du robot bipède dans le plan sagittal [Moubihan, 2005].

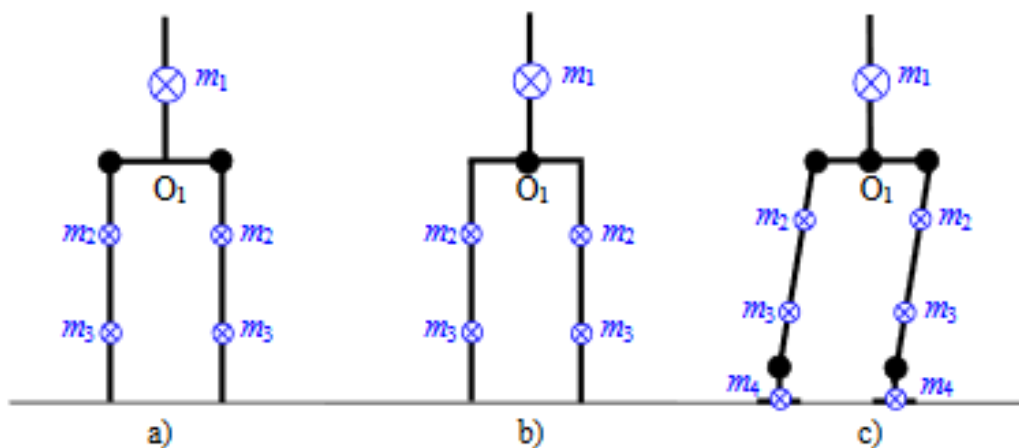


Figure 2.2. Différentes structures du robot bipède dans le plan frontal [Moubihan, 2005].

3. Plans de mouvement

Les plans de mouvement permettent de décrire les mouvements associés à la marche (Figure 2.3). En effet, le plan sagittal correspond à une vue de côté du marcheur, le plan horizontal à une vue de haut et le plan frontal à une vue de face. Le marcheur se déplace principalement dans le plan sagittal, mais des mouvements comme le déhanchement, le déplacement latéral et la rotation du bassin se produisent dans les deux autres plans augmentant la fluidité de la marche [Bedared, 2006].

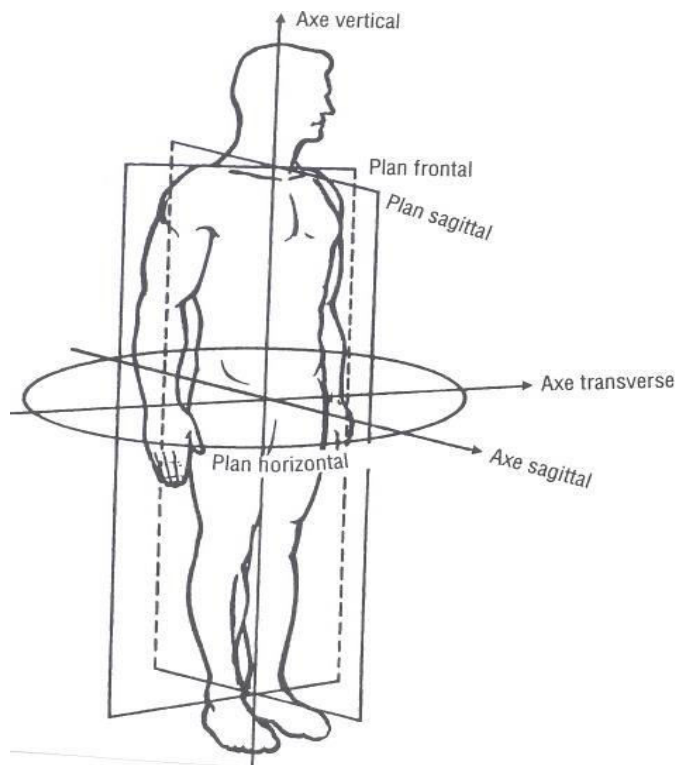


Figure 2.3. Plans principaux dans lesquels les mouvements prennent lieu [Heddouche, 2014].

4. Le centre de masse

Le centre de masse CM d'un corps est un point de référence imaginaire situé à la position moyenne de la masse du corps, autrement dit c'est le point où la masse totale du corps peut être appliquée et se déplace lorsque les parties du corps se déplacent [Chemori, 2007].

Le centre de masse d'un robot est composé de plusieurs segments, il peut être calculé avec la formule suivante :

$$CdM_x = M_1 X_{i1} + M_2 X_{i2} + \dots + M_I X_I \quad (1)$$

$$CdM_y = M_1 Y_{i1} + M_2 Y_{i2} + \dots + M_I Y_I \quad (2)$$

$$CdM_z = M_1 Z_{i1} + M_2 Z_{i2} + \dots + M_I Z_I \quad (3)$$

Où M est la masse d'élément du robot (Kg), X est la position d'élément du robot selon l'axe x , Y est la position d'élément du robot selon l'axe y , Z est la position d'élément du robot selon l'axe z .

Simon Vézina cite quelques caractéristiques du centre de masse :

- Cette position n'est pas toujours au centre du corps.
- Le centre de masse d'un corps homogène (masse volumique constante) qui possède un haut niveau de symétrie est situé au centre géométrique du corps (ex : sphère, cube).
- Le centre de masse n'est pas nécessairement situé sur le corps lui-même.
- Lorsqu'un corps effectue un mouvement libre (aucun axe de rotation imposé sur le corps), alors le centre de masse du corps effectue un mouvement de translation tandis que les autres points du corps effectuent une rotation autour du centre de masse.

Dans le cas d'un robot bipède, le centre de masse n'est pas toujours à l'intérieur du polygone de support, et ça dépend des mouvements du robot. Selon la Figure 2.4.b la projection du centre de masse est à l'intérieur du polygone de sustentation, tandis que sur la Figure 2.4.a la projection du COM est à l'extérieur du polygone à cause d'un déplacement dynamique.

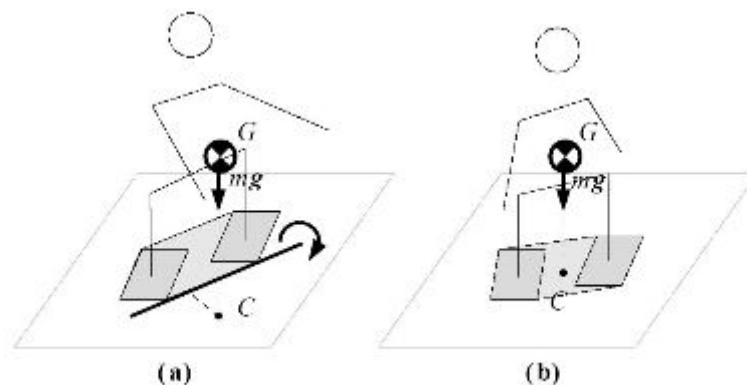


Figure 2.4. Illustration du centre de masse (CM).

5. Polygone de support

Le polygone de support est le contour extérieur des points d'appui au sol. La figure 2.6 présente un exemple de polygone de support pour les phases de simple et double support [Bedard, 2006]. Le polygone de support est un concept qui permet de caractériser la marche au niveau de la stabilité.

6. Equilibre de robot

Dans le contexte de la marche robotique, on distingue deux types de marches qui sont liés à la stabilité et à l'équilibre du corps du robot pendant le déplacement. Il s'agit de stabilité statique et stabilité dynamique.

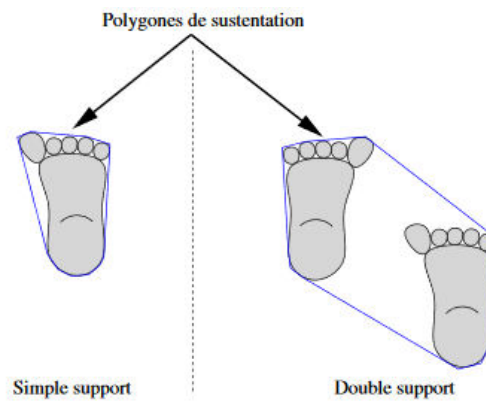


Figure 2.6. Le polygone de support en simple et double support [Lydoire, 2004]

6.1. Stabilité statique

Le critère de la stabilité statique permet d'assurer que le robot bipède ne tombera pas pendant la marche et sa posture reste stable à tout moment, c'est-à-dire que son poids est supporté directement par au moins un pied à tout moment de son déplacement. Ainsi, le robot peut arrêter son mouvement à n'importe quel moment et rester en équilibre. Lors de la marche statique, la projection du centre de masse (CM) du bipède sur le sol se trouve tout le temps dans le polygone de support [Chemori, 2007]. Cette condition est obligatoire pour assurer l'équilibre à chaque instant [Lydoire, 2004]. Cette démarche est employée par l'homme dans des situations difficiles telles que les montées ou descentes d'escalier ou les terrains instables ou glissants où la marche est très lente.

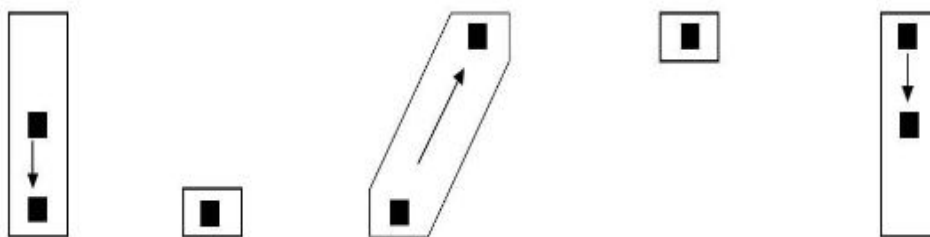


Figure 2.7. Marche statique bipède. Le rectangle noir représente le CM et la flèche indique le sens de déplacement du CM [Heddouche, 2014].

6.2. Stabilité dynamique

Contrairement à la marche statique, dans le cas de la marche dynamique, le robot sera nécessairement dans une phase de déséquilibre. L'équilibre dynamique est très souvent étudié dans le domaine de la robotique humanoïde. En effet, dans le cadre du contrôle de la marche de ces robots munis d'un grand nombre de DDLs, et d'autant de solides en mouvement, il est pertinent d'assurer l'équilibre en considérant la dynamique du système [Paillat, 2010].

Le concept le plus utilisé dans ce genre de contrôle est le ZMP (Zero Moment Point). Il est défini comme le point sur la terre où la somme des moments due aux forces actives est égal à zéro [Hadidi, 2010], ce concept fut proposé par M. Vukobratovic en 1968 [Kim, 2002], [Kajita, 2003]. La stabilité du système est assurée si le ZMP est à l'intérieur du polygone de support.

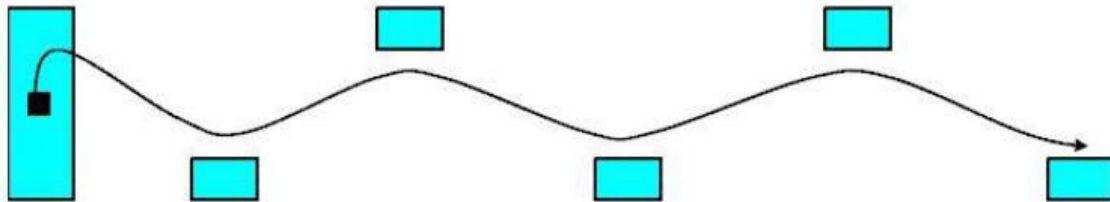


Figure 2.8. Marche dynamique bipède [Heddouche, 2014].

Les coordonnées du ZMP sont décrites à partir des équations de la dynamique de Newton. Rappelons que le moment généré par une force \vec{R} en un point z est noté M_z et en un point O est noté M_0 , sont soumis à la relation suivant :

$$M_0 = M_z + \overrightarrow{OZ} \cdot \vec{R} \quad (4)$$

L'application des lois de Newton au robot soumis à la force de pesanteur et la force de réaction du sol s'écrit :

$$m\ddot{\vec{G}} = \vec{R} - \vec{P} \quad (5)$$

$$\delta_0 = M_0 + \overrightarrow{OG} \cdot \vec{P} \quad (6)$$

où m est la masse totale du robot, G est le centre de gravité, \vec{R} est les forces de réaction du sol, \vec{P} est la force de pesanteur (égale à $m\vec{g}$), δ_0 est le moment dynamique du robot évalué au point O , et M_0 est le moment généré par \vec{R} au point O .

A partir de (4), ces relations peuvent être réécrites comme suit:

$$\vec{R} = m\vec{g} + m\ddot{\vec{G}} \quad (7)$$

$$\delta_0 = M_z + \overrightarrow{OZ} \cdot \vec{R} + \overrightarrow{OG} \cdot \vec{P} \quad (8)$$

En considérant Z comme étant le ZMP, MZ_x et MZ_y sont nuls. On obtient alors la relation suivante :

$$\delta_{0x} = Z_x R_z + G_x P_z + G_z P_x \quad (9)$$

$$\delta_{0y} = Z_y R_z + G_y P_z + G_z P_y \quad (10)$$

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude théorique sur la conception mécanique d'un robot bipède, ainsi quelques concepts concernant la marche et la stabilité du robot. En particulier, nous avons discuté les différentes de stabilité et quelques caractéristiques de cette dernière.

CHAPITRE III

Planification de mouvement du robot bipède

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons le robot bipède Kheirboto v2.0, ainsi l'algorithme des chauves-souris qui est utilisé pour l'optimisation du mouvement du robot et la génération des angles de rotation automatiquement.

2. Conception du robot Kheirobot v2.0

Kheirobot v2.0 est un robot fait maison a base de bipède de 8 DDL (degré de liberté), basé sur les servomoteurs de type MG958 et une carte ArduinoUno. Il est contrôlé à distance via un émetteur – récepteur radio nRF24L01+. Kheirobot v2.0 peut effectuer des tâches multiples telle que: se tenir debout sur une jambe, se pencher, tirer quelque chose et marcher en avant et en arrière.

Le robot kheirobot v2.0 mesure 30 cm pour 1,2 kg, il est constitué de 8 articulations estimées suffisantes pour la marche de base. Il est constitué de deux branches, qui ont 4 degrés de liberté au niveau du bassin, 2 degrés de liberté au niveau les genoux et les chevilles. Par cette structure, il est possible pour le robot de se pencher, tirer quelque chose et marcher en avant et en arrière.

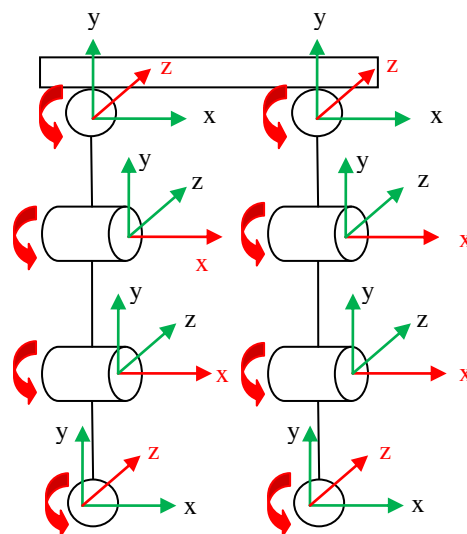


Figure 3.1. Schéma cinématique du robot Kheirobot v2.0.

2.1. Arduino

L'Arduino est né en 2005 dans le cadre d'un projet étudiant en Italie par Massimo Banzi, architecte logiciel et co-fondateur du projet suite à un manque considérable de subventions et fermeture de l'Interaction Design Institut [Richa ,2017]. C'est ainsi qu'un modeste projet d'étudiants bouleversa le milieu de l'électronique, en rendant la technologie plus accessible [Bouyekhf ,2017]. Aujourd'hui, la carte Arduino est disponible avec des prix raisonnables (25 Euros) et on peut la construire nous-même sans avoir de droit de licence à payer. Arduino est

devenu presque un réflexe dès lors qu'on souhaite s'initier au monde de l'électronique numérique.

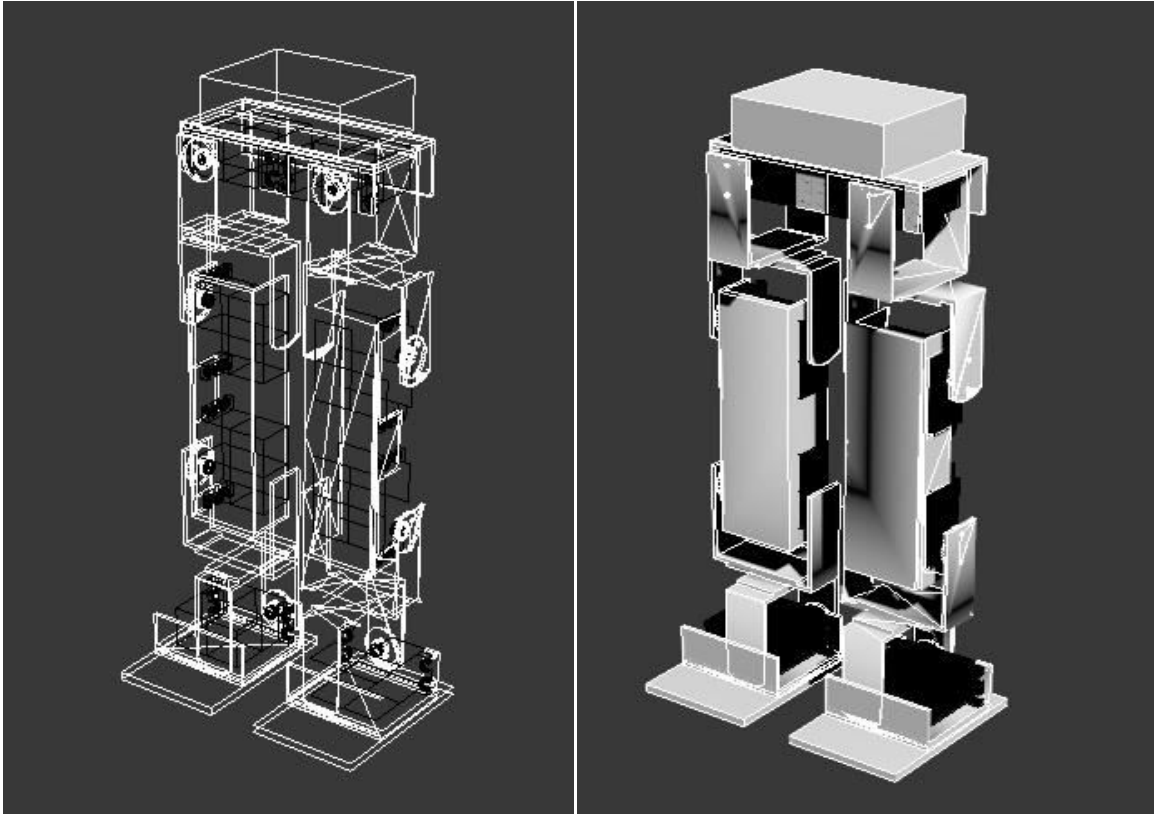


Figure 3.2. Modélisation 3D du robot Kheirobot v2.0 pour la simulation.

Elle est considérée comme un grand équipement électronique pour les amateurs ainsi que les professionnels, l'Arduino est un puissant ordinateur à carte unique avec une utilisation facile à adapter. Il existe plusieurs types de carte Arduino à titre d'exemple ; ArduinoUno, Arduino Leonardo, ArduinoMega, Arduino DUE, Arduino Mini Pro, Arduino Yun et Arduino Nano.

2.2. La commande

On distingue deux catégories de commande :

- La commande par fil : le point de commande est relié au moteur par des fils électriques qui transmettent l'ordre au moteur
- La commande sans fil (à distance) : Il existe plusieurs types dans cette catégorie comme l'infrarouge (IR), le Wifi, Bluetooth et Radio fréquence (RF).

2.3. Radio fréquence (émetteur récepteur radio)

Dans le système radio fréquence, la transmission des ordres au moteur se fait par ondes radio. Il n'y a plus de câblage électrique entre le moteur et la commande. Celle-ci est mobile et on peut commander le volet roulant dans un rayon de 20 mètres, même à travers un mur. De plus l'installation est plus rapide et plus pratique [Richa , 2017].

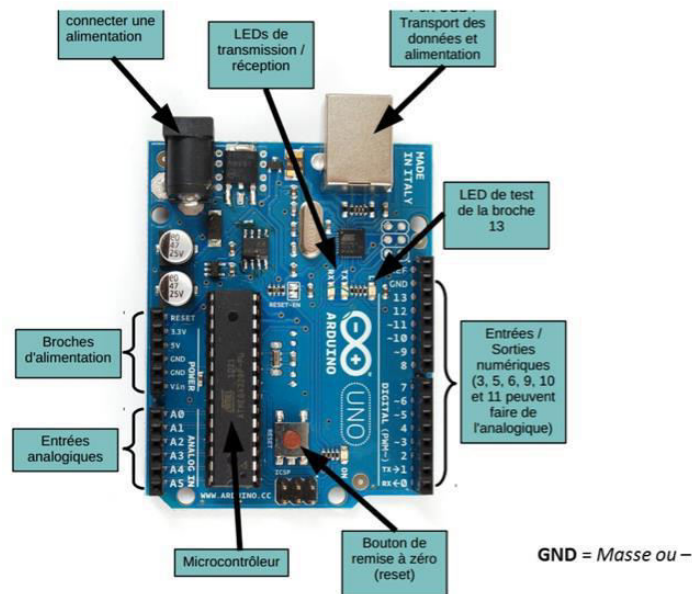


Figure 3.3. Architecture d'une carte ArduinoUno.

Dans le cas de robot Kheirobot v2.0 la commande a été assurée par un émetteur récepteur modèle nRF2401+. Ce dernier peut émettre et réceptionner en radio fréquence de 2.4 GHz.

Les caractéristiques techniques de nRF24L01+ :

- Interface Arduino via bus SPI (8 Mhz), autorisant le 5v.
- Alimentation 3.3v du module.
- Bande radio fréquence 2.4 GHz et possibilité de 126 canaux.
- Transmission / Réception à 1 ou 2 Mb/s.
- Puissance de transmission programmable : 0 -6, -12 ou -18 dBm.
- Consommation en émission à 0 dBm de 11.3 mA.
- Consommation en réception à 2 Mb/s de 12.3 mA.

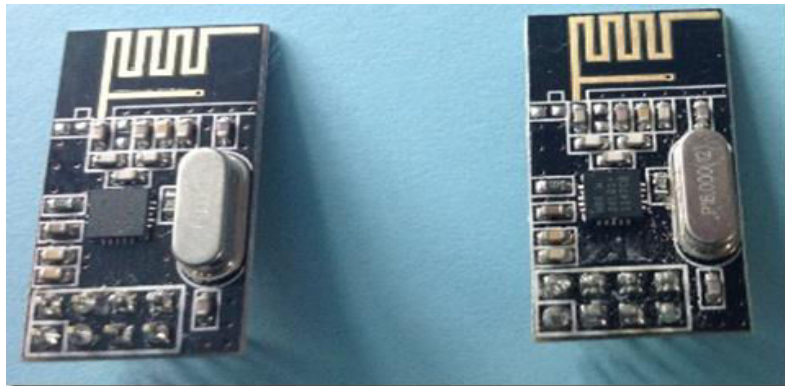


Figure 3.4. Module radionRF24L01+.

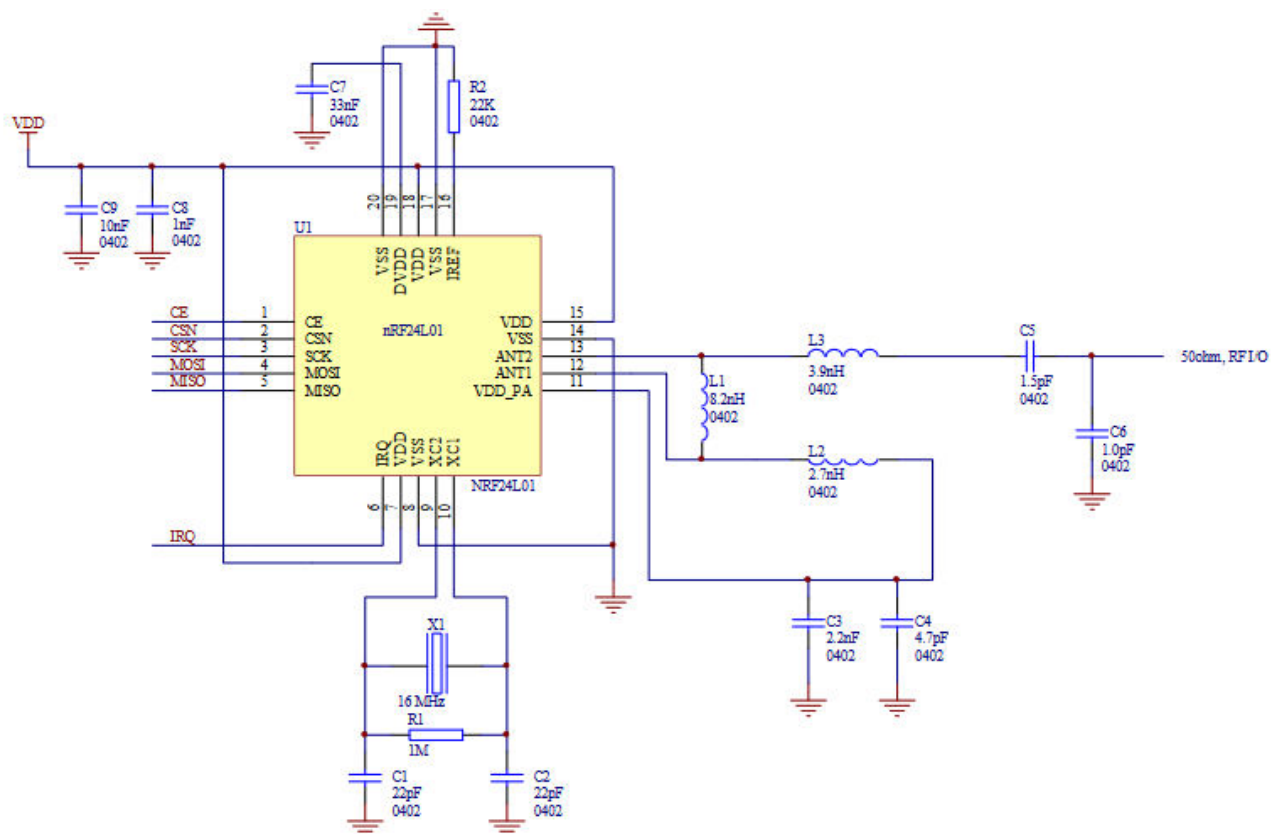


Figure 3.5. Schéma électrique de nRF24L01+.

2.4. Le servomoteur

Un servomoteur est un moteur mais avec quelques spécificités. Contrairement à un moteur classique qui est utilisé pour tourner avec une vitesse proportionnelle à un courant ou à une tension, pour obtenir une position. Il effectue une rotation suivant un angle déterminé. Le plus souvent l'angle est compris entre 0° et 180° , puis il garde cette position. Un servomoteur est un système qui a pour but de produire un mouvement précis en réponse à une commande externe. C'est un actionneur qui mélange l'électronique, la mécanique et l'automatique [Richa, 2017].

Un servomoteur est composé :

- d'un moteur à courant continu.
- d'un axe de rotation.
- un capteur de position de l'angle d'orientation de l'axe (potentiomètre).
- une carte électronique pour le contrôle de la position de l'axe et le pilotage du moteur à courant continu.

Un servomoteur est capable d'atteindre des positions prédéterminées dans les instructions qui lui ont été données, puis de les maintenir. Il a l'avantage d'être asservi en position angulaire, cela signifie que l'axe de sortie du servomoteur respectera la consigne d'instruction envoyée à son entrée [Bouyekhf, 2017]. Même si un obstacle lui bloque et lui change l'orientation de sa trajectoire, le servomoteur essaiera de conserver la position. Pour un ajustement précis de la position, le moteur et son réglage sont équipés d'un système de mesures qui détermine la position courante.

Les servomoteurs sont pilotés par un fil de commande et alimentés par deux autres fils. D'habitude, ces 3 fils sont rassemblés dans une prise au format standard :

- Un fil rouge est relié à l'alimentation positive (+5V ou +6 V selon le servo).
- Le fil marron est relié à la masse (GND).
- Le fil jaune est utilisé pour la commande.

Le mode de commande d'un servomoteur est standardisé :

- on envoie sur son fil de commande une impulsion dont la durée correspond à l'angle désiré.
- Avec la programmation de l'Arduino, une bibliothèque dédiée, la bibliothèque «servo» permet de piloter un servomoteur en lui transmettant simplement l'angle sur lequel il souhaite se positionner.

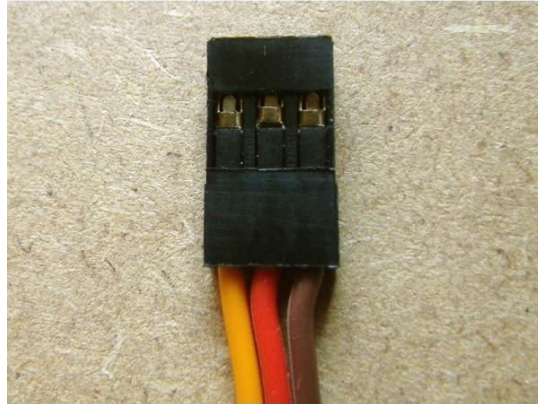


Figure 3.6. Fiche de commande d'un servomoteur.

3. Algorithme de chauve-souris

L'algorithme des chauves-souris, dont l'appellation d'origine est Bat Algorithm (en anglais), est une méta-heuristique très récente inventée par Xin-She Yang en 2010. L'algorithme est basé sur le comportement d'écholocation des chauves-souris utilisée dans le vol de ces dernières. Ce mécanisme peut trouver et sectionner les différents types d'insectes et éviter les obstacles, cela même dans l'obscurité totale [Benmostafa , 2012].

3.1. Echolocation

L'écholocation consiste à envoyer des sons et à écouter leur écho pour localiser, et dans une moindre mesure identifier, les éléments d'un environnement [Zatout, 2016].

3.2. Comportement des chauves-souris

La chauve-souris est l'un des mammifères les plus méconnus. Elle a fasciné les plus grands chercheurs et intéresse aujourd'hui encore les scientifiques. Sa capacité de vol actif, unique chez les mammifères, lui permet de voler la nuit en évitant les obstacles, même à grande vitesse, grâce à son système d'écholocation très perfectionné. C'est l'un des animaux dont le nombre d'espèces est très élevé, où il existe environ 996 espèces. Leurs tailles varient entre la petite chauve-souris dite microchiroptère ou «microbat» d'un poids d'environ 1,5g à 2g jusqu'à la chauve-souris géante, dite mégachiroptère ou «megabat» avec une longueur d'environ 2 mètres et un poids jusqu'à 1 kg.

La plupart des chauves-souris de type microbat disposent d'une capacité d'écholocation très avancée et la majorité sont des insectivores. Elles émettent des pulsations sonores très fortes par la bouche ou le nez (ultrason). Dès que cet ultrason rencontre un obstacle (proie, végétation, etc.), il rebondit vers la chauve-souris. Celle-ci capte l'écho grâce à ses oreilles.

Son cerveau va alors calculer la distance, la vitesse, la position et la forme de l'objet détecté [Richa, 2017].

Les types et les modes d'émission des ultrasons sont très variables suivant les genres et même les espèces. Il arrive que les chauves-souris émettent des cris audibles par l'homme, il ne s'agit alors évidemment pas d'ultrasons, mais de cris que l'on qualifie de «cris sociaux».

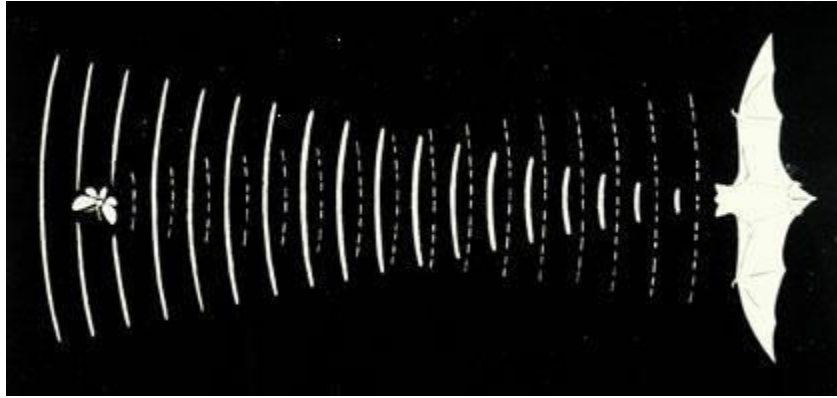


Figure 3.7. Exemple d'écholocalisation

Bien que chaque pulsation ne dure que quelques millièmes de seconde (De 8 à 10 ms), elles ont des fréquences constantes qui sont habituellement dans la région 25kHz et 100 kHz pour la plus part des espèces des chauves-souris. Chaque cri ultrasonique peut durer moyennement 5 à 20 ms et les chauves-souris émettent de 10 à 20 cris par seconde. En cas de chasse, le taux d'émission peut être accéléré jusqu'à environ 200 pulsations par seconde quand celles-ci volent à proximité de leurs proie [Benmostafa ,2012]. Ces cris sonores trop courts marquent la capacité étonnante du traitement puissant du signal des chauves-souris.

Les études ont prouvé que les microchiroptères utilisent le délai entre l'émission et la détection de l'écho, la différence de temps entre leurs deux oreilles, et les variations d'intensité des échos afin de construire un scénario tridimensionnel de l'environnement. Elles peuvent détecter la distance d'orientation de la cible, le type de la proie, et même la vitesse de mouvement de la proie telles que les petits insectes [Benmostafa , 2012]. Bien évidemment, quelques chauves-souris ont une bonne vue, et la plupart d'entre elles ont une très grande sensibilité pour l'odorat. En réalité, elles emploient ses sens en combinaison afin de maximiser le coefficient de détection de proie et la navigation minutieuse, particulièrement en obscurité totale.

Le comportement d'écholocation des chauves-souris est associé à une fonction objective à optimiser nous permettant de formuler un nouvel algorithme d'optimisation appelé Algorithme des chauves-souris [Zatout, 2016].

3.3. Optimisation par l'algorithme des chauves-souris

L'algorithme des chauves-souris tente de modéliser le comportement d'écholocation. Il repose essentiellement sur le scénario suivant: des chauves-souris volent aléatoirement en vue de trouver de la nourriture, celles-ci n'ont aucune connaissance sur l'endroit où se trouvent leurs proies, cependant elles peuvent calculer la distance qui sépare chacune d'elles de la cible au moyen de l'écholocation. Leur objectif commun est non seulement d'atteindre leurs proies mais aussi de trouver la meilleure stratégie de chasse. La stratégie la plus efficace consiste à suivre la chauve-souris la plus proche de la volée. L'algorithme des chauves-souris est une méthode d'optimisation où toutes les chauves-souris collaborent en population dans le but d'atteindre un but collectif. Ce dernier est formulé par une fonction dite fonction objective. Chacune des chauves-souris volantes est considérée comme une solution dans l'espace de recherche appelée solution candidate ou locale. Celle-ci sera évaluée à chaque itération de l'algorithme en calculant sa fitness par la fonction objective et mise à jour en ajustant sa position, sa vitesse et sa fréquence, en fonction de la meilleure position qu'elle a atteint et celle trouvée par toute la population [Richa, 2016].

Formellement, Les chauves-souris volent aléatoirement avec une vitesse V_i à une position X_i avec une fréquence fixée f_{min} . En variant la longueur d'onde λ et l'intensité A_0 de recherche de proie. Elles peuvent ajuster automatiquement la longueur d'onde (ou la fréquence) ainsi que le taux d'émission de pulsation $\tau \in [0, 1]$, selon la proximité de leurs proies [Amraoui, 2015].

Bien que l'intensité puisse varier de plusieurs manières, l'algorithme suppose que $A \in [A_0, A_{min}]$.

L'algorithme des chauves-souris, est essentiellement composé des trois étapes qui seront répétées jusqu'à atteindre un certain nombre d'itérations :

1. Evaluer la fitness de chaque chauve-souris.
2. Mettre à jour les meilleures solutions locales et globales.
3. Mettre à jour les positions, les vitesses et les fréquences de chacune des chauves-souris.

Les deux premières étapes sont assez simples. L'évaluation de la fitness de chacune des chauves-souris s'effectue à l'aide de la fonction objective. Tandis que la mise à jour des meilleures solutions locales et globales s'effectue en comparant la fitness courante de chacune des chauves-souris avec la fitness de la meilleure solution qu'elle a rencontré jusqu'ici, puis de choisir la meilleure d'entre elles [Zatout ,2016]. Quant à la recherche de la solution globale, il suffira de comparer toutes les meilleures solutions locales et garder la meilleure.

La troisième étape est la plus convaincante, en effet, le mouvement des chauves-souris est responsable de l'efficacité de l'algorithme. Les règles définissant la nouvelle solution et

mettant à jour la position et la vélocité de chacune des chauves-souris dans un espace de dimensions sont les suivantes :

$$f_i = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min}) \cdot \beta \quad (1)$$

$$v_i^t = v_i^{t-1} + (x_i^t - x^*) \cdot f_i \quad (2)$$

$$x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t \quad (3)$$

Sachant que f_i est la fréquence d'émission de la chauve-souris X_i , et qui appartient à la gamme $[f_{\min}, f_{\max}]$ correspondant à la gamme de longueurs d'ondes $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$.

Afin de simplifier l'implémentation, il a été supposé que $f \in [0, f_{\max}]$. Sachant que les hautes fréquences correspondent aux courtes longueurs d'ondes. Pour les chauves-souris, les gammes typiques sont de quelques mètres. Par conséquent le taux d'émission de pulsations peut être de la gamme $[0, 1]$ ou 0 signifie qu'il n'a aucune pulsation, et 1 signifie le taux maximale d'émission de pulsations.

- $B \in [0, 1]$ est un vecteur aléatoire tiré à partir d'une distribution uniforme.
- X^* est la meilleure location (solution) courante globale, qui sera calculée par comparaison de toutes les solutions obtenues par chacune des chauves-souris.
- Pour la recherche locale, une fois une solution est sélectionnée parmi les meilleures solutions courantes, une nouvelle solution pour chaque chauve-souris est générée localement en utilisant le parcours aléatoire.

$$X_{\text{new}} = X_{\text{old}} + \varepsilon \cdot A^t \quad (4)$$

Avec $\varepsilon \in [-1, 1]$ est un nombre aléatoire, A^t est la moyenne d'intensité de toutes les chauves-souris à l'instant t .

En se basant sur ces règles et ces explications, les étapes basiques de l'algorithme des chauves-souris peuvent être résumées tel qu'il est montré sur la figure suivante.

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le robot bipède Kheirobot dans sa 2^{ème} version dotée de 8 DDLs. Le robot est opensource et est basé sur une carte Arduino, des servos moteurs MG958 et une carte nRF24L01+ pour la transmission. Nous avons présenté également l'algorithme des chauves-souris (Bat Algorithm) qui est un algorithme d'optimisation. L'algorithme est utilisé pour le contrôle automatique de la locomotion et la génération automatique des angles de rotation.

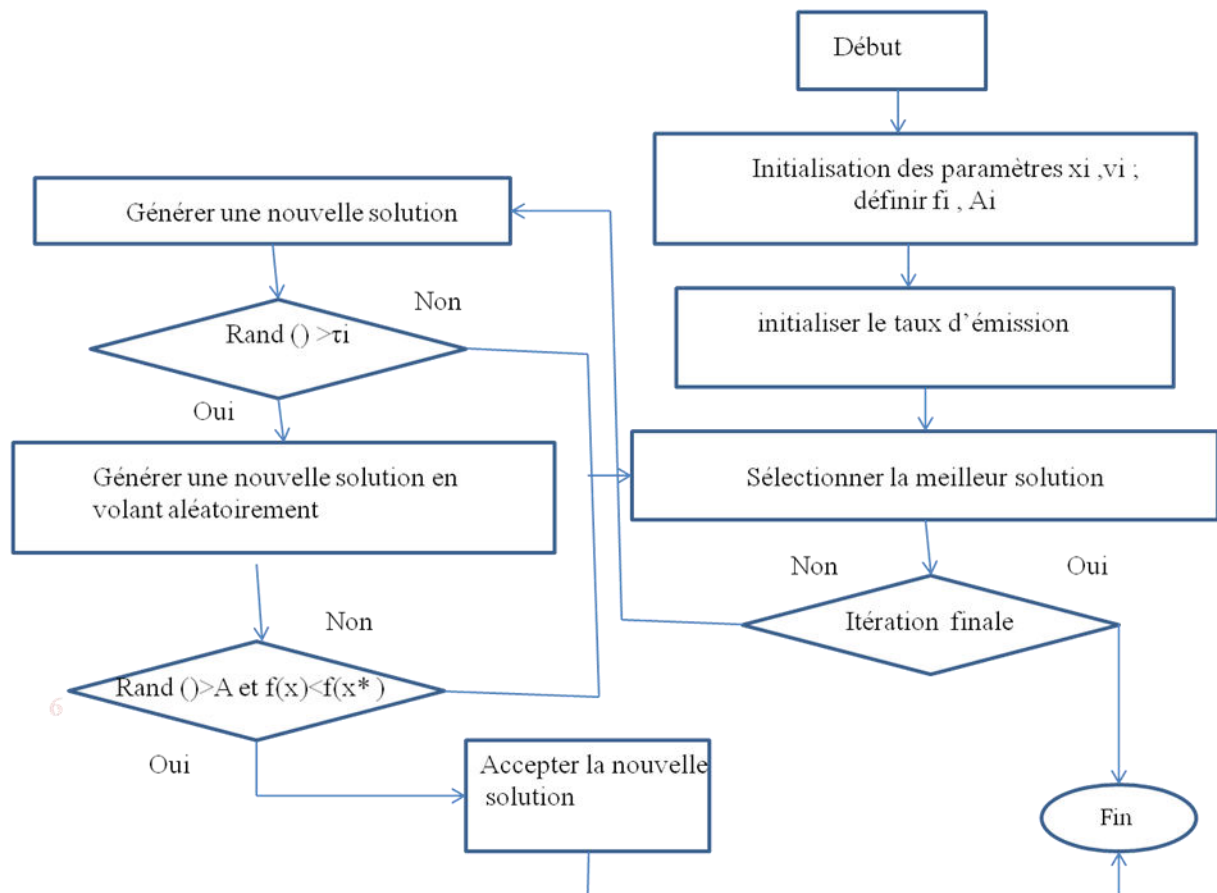


Figure 3.8. Organigramme de l'algorithme des chauves-souris.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, nous avons abordé un domaine de la robotique qui est le contrôle automatique de la locomotion d'un robot bipède. En fait, ce type de robot est un cas particulier des robots humanoïdes (ressemblent à l'homme), où il représente le bas de ces derniers (de la hanche jusqu'aux pieds).

Nous avons travaillé sur un robot bipède de fabrication locale, i.e. Kheirobot v2.0, qui a été réalisé par Kheireddine Abainia en 2017 (amélioration de la version antérieure de 2016). La planification de mouvement du robot a été faite manuellement, en cherchant les bonnes valeurs des angles de rotation tout en gardant la stabilité du robot (équilibre). En outre, le robot peut effectuer différents mouvements tels que la marche en avant, marche en arrière, frapper, faire un grand écart, etc. Toutefois, cette méthode de planification est ardue et plus couteuse en terme de temps (trouver les bons angles). Cette limite nous a motivé à investir dans ce domaine en proposant une méthode automatique de planification de mouvement.

Nous avons choisi une méta-heuristique récente (ou algorithme évolutionnaire) pour répondre au problème adressé, et en particulier, nous avons utilisé l'algorithme des Chauves-souris (ou *Bat Algorithm* en anglais). Cette méta-heuristique a prouvé sa robustesse dans différents domaines de recherche (robotique, traitement d'image, classification, etc.) grâce à son mécanisme à base de population et sa fonction objective.

Ce mémoire est scindé en trois chapitres au total, où les deux premiers ont été consacrés pour définir le domaine traité en passant par un petit historique et les différents travaux existants. En outre, nous avons étudié la biomécanique de la marche humaine. Le troisième chapitre est dédié pour décrire le robot pour lequel ce travail a été fait, ainsi nous avons détaillé l'algorithme des Chauves-souris et comment l'adapter au problème traité.

Comme perspectives de futur travail, nous souhaitons appliquer l'algorithme proposé sur le robot réel, ainsi proposer une amélioration de l'algorithme original et publier un article scientifique.

Bibliographié

Nada Kherici & Yamina Mohamed Ben Ali. (Article de presse , 2014) Using PSO for a walk of a biped robot Nada

Sophie Sakka . (Livre , 2009) Introduction à la commande des robots humanoïdes

Gabriel Abba . (Article scientifique, 2003) Stable Walking of A 7-DOF Biped robot

Michel Taix. (Archives- ouvertes.fr ,2011) Contribution à la planification de mouvement en robotique

Abainia Kheireddine . (Thèse de Master ,2012) Planification de chemin et de mouvement pour un robot transporteur utilisant une combinaison entre Optimisation par Essaim de Particules et recherche Taboue

Fabien LYDOIRE. (Thèse de Doctorat, 2004) Génération de trajectoire pour la locomotion artificielle et commande à horizon fuyant avec l'arithmétique d'intervalles

Mathieu Hobon. (Thèse de Doctorat, 2013) Modélisation et optimisation de la marche d'un robot bipède avec genoux anthropomorphiques

Julien Fatoux. (Thèse de Doctorat, 2014) Mise en œuvre d'un robot humanoïde et contribution à la génération de marche dynamique optimale

Bassel KADDAR. (Thèse de Doctorat ,2013) Effet de balancement des bras sur la consommation énergétique durant la marche d'un robot bipède

Amraoui Ikram et Bengherra Waffa. (Thèse de Master, 2015) Allocation de ressources dans un réseau de radio cognitive en se basant sur les méta-heuristique : Bat inspired Algorithm et Bee Colony Algorithm

BENMOSTEFA Soumia . (Thèse da Magister ,2012) Conception de la technique des chauves-souris pour la classification automatique des images

RICHA Braham et BOUYEKHF mouhamed Redha (Thèse de Master ,2017) Etude et réalisation d'un bras robot à 2DDL

Jean-Luc Paillat (Thèse de Doctorat, 2010) Conception et contrôle de robots à géométrie variable : applications au franchissement d'obstacles autonome.

Ahmed Chemori (Archives- ouvertes.fr ,2007) Quelques contributions à la commande non linéaire des robots marcheurs bipèdes sous-actionnés

Sahab Omran (Thèse de Doctorat, 2013) Génération de trajectoires de marche de robots humanoïdes établies sur les modèles pendulaires bio-inspirés de l'humain

Rita Baddoura- gaugler (2014) L'homme et le robot humanoïde ; Transmission Résistance et Subjectivation

BOUZIANE Fatima Zohra (Thèse de Master, 2013) Rétro-conception du bras horizontal de robot manipulateur de la cellule flexible (Tlemcen)

Souhila BACHA (Rapport de stage , 2010) Conception et développement d'un générateur de trajectoire pour les allures de marche dynamique stable en robotique humanoïde

Jean Philippe Lepoutre (Archives- ouvertes.fr, 2008) Modélisation biomécanique du mouvement : vers un outil d'évaluation pour l'instrumentation en orthopédie

David Galdeano (Thèse de doctorat, 2015) Contribution à la commande corps-complet des robots humanoïdes: Du concept à l'implémentation temps-réel