

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique  
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran  
-Mohamed Boudiaf-  
USTO-MB  
Faculté de génie électrique  
Département d'Electronique



MEMOIRE DE PROJET FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION DU

**DIPLOME DE MAGISTER ELECTRONIQUE**

Option : **A**utomatique, **R**obotique et **P**roductique

THEME

---

Modélisation et planification de trajectoire d'un  
robot humanoïde dans un environnement virtuel

---

**Présenté par**

M<sup>elle</sup> **Meriem MENAD.**

**Soutenu le 14/01/2013**

**devant le jury composé de**

Président : M. MIDOUN.

(Professeur, USTO. Oran).

Encadreur : M. Z. AHMED-FOITIH.

(Professeur, USTO. Oran).

Examineur : M..A.ZERIKAT

(Professeur, ENST. Oran).

Examineur : M. K.M.ZEMALACHE

(Maître de conférences, USTO. Oran).

## *Dédicace*

*À ma chère Maman, les lignes ou tout un livre ne me suffiront pas  
à t'exprimé mon amour et le soutien que tu me porte.*

*À mon chère Papa, je te dois tout.*

*À mon frère Bouziane, voila je viens de réalisé un de tes rêves,  
merci de m'avoir poussé à continuer mes études, de m'avoir interdit  
d'abandonné le poste de graduation, merci de croire en moi quand  
moi-même je doute.*

*À mon frère Mohamed, merci d'être mon frère, mon ami, mon  
confident.*

*À ma sœur Houda, je vais t'attendre à USTO ne tarde pas STP.*

*À ma belle sœur Amina, merci d'être toi qui as volé le cœur de mon  
frère.*

*À ma chère cousine Fatiha avec ses anges Yasmine, Safia + Yacine.*

*À ma grande famille.*

*À tous ceux qui, un jour ou l'autre m'ont offert leur amitié et des  
moments inoubliables : Amina, Akram, Aïcha, Houcine, Hakima,  
Nedjwa, Sara, ..... Je ne pourrai tous les citer.*

*À tous les gens qui m'aiment.*

*À mon beau pays, l'Algérie.*

*À mes ennemis.*

# *Remerciements*

*Je Remercie le bon Dieu le tout puissant pour tous ce qu'il m'a donné pour accomplir ce travail.*

*Je remercie mon encadreur M. Zoubir AHMED FOITIH, qui m'a aidé et fait confiance tout au long de cette mémoire. C'est grâce à ces connaissances conseils et sa grande facilité de communication que j'ai pu évoluer dans mon sujet de recherche. Qu'il trouve ici l'expression de mon respect et ma profonde reconnaissance.*

*Je remercie chaleureusement notre chef d'option M. Wahid NOUIBAT pour sa participation active dans le projet. J'ai toujours pu apprécier sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

*Je souhaite aussi témoigner toute ma reconnaissance à M<sup>elle</sup> Hakima DERMECHE « Magister en SS » ainsi que M. Houcine ZERFA et M. Akram ADNANE « Magister en ARP » pour l'aide permanente qu'ils m'ont apporté tout au long de ces trois années.*

*Je remercie l'ensemble des personnes du laboratoire ARP pour leurs aides, leurs gentillesse et leurs générosités ou tout simplement pour leurs amitiés.*

*Je tiens à exprimer toute ma gratitude aux membres du forum « <http://développez.com> », l'ensemble des membres du groupe « échange d'article et de publication algérien » sur facebook et M. D. CHAOUICHE enseignant à l'université de Mascara.*

*Je remercie M. MIDOUN, de m'avoir fait l'honneur de présidé le jury. Je remercie également M. ZEMALACHE & M. ZERIKAT qui m'ont honorées de leur participation au jury et ont eu la bonté d'examiner mon travail et de le juger à juste valeur.*

*Mes derniers remerciements vont à ma famille qui m'a appuyé et soutenu moralement pendant les bons et les mauvais moments. Par ce mémoire, je souhaite leur témoigner ma reconnaissance pour la confiance qu'ils ont placée en moi.*

# *Introduction générale & plan de travail.*

---

Les robots à pattes et en particulier les robots humanoïdes sont amenés à se développer très fortement dans les dix prochaines années. Leur capacité à se mouvoir dans un environnement conçu pour les êtres humains constitue leur principal atout face à d'autres structures robotiques comme celles à roues.

Il est nécessaire au robot humanoïde de maîtriser les modes de déplacement de marche dans un environnement d'habitation. Car ils sont de plus en plus souvent cités comme une solution potentielle pour répondre aux problèmes liés au vieillissement de la population (aides à la personne).

Les chercheurs imaginent qu'un robot capable de se déplacer dans un environnement initialement conçu pour les humains et capable de réaliser des tâches de service à domicile, est une solution économiquement très intéressante pour répondre aux besoins. La mise au point d'un tel robot humanoïde répond dès lors, non seulement à ce problème d'aide et de service à la personne, mais permet également l'utilisation de ce même robot pour des applications de surveillance et d'intervention en milieux dangereux ou en situation de catastrophes.

Les travaux, présentés dans ce mémoire, s'intéressent à la modélisation d'un robot humanoïde à 18 ddl et la planification de son trajectoire par la méthode de champ de potentiel dans un environnement virtuel.

Le mémoire est organisé de la manière suivante.

Dans **le premier chapitre**, nous présentons une généralité sur la robotique et le robot humanoïde.

**Le deuxième chapitre** nous avons mis à la portée des lecteurs notre essai de modéliser le robot HRP2, sous réserve d'avoir de nouveaux éléments afin de terminer nos travaux à partir d'un robot réel.

# *Introduction générale & plan de travail.*

---

Dans **le chapitre trois**, nous avons réalisé un état de l'art sur la modélisation des robots humanoïdes et développé les techniques utilisées pour modéliser notre prototype.

**Le quatrième chapitre**, décrit en détail la description géométrique et cinématique des robots à bras manipulateurs.

**Le cinquième chapitre** nous avons donné un état de l'art et le principe de la planification de trajectoire par la méthode de champ de potentiel sur le robot humanoïde.

**Le dernier chapitre** consiste à mettre en oeuvre les résultats de modélisation et la simulation de trajectoire.

Sommaire.....	i
Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux.....	vi
Problématique.....	vii
Introduction général et plan de travail.....	viii

## **CHAPITRE I-Généralités sur la robotique & le robot humanoïde**

I.1.Introduction.....	1
I.2.Définition de la robotique.....	1
I.2.1.Définition du robot .....	1
a.La versatilité.....	1
b.L'auto-adaptativité.....	1
I.2.2. Historique.....	1
I.3.Type & classification des robots.....	1
I.3.1. Par type.....	1
a) Les manipulateurs.....	1
b) Les télémanipulateurs.....	3
c) Les robots.....	3
d) Les robots manipulateurs industriels.....	3
e) Les robots didactiques :.....	3
f) Les robots mobiles autonomes.....	3
I.3.2. Par génération.....	3
a) Le robot passif.....	3
b) Le robot actif .....	3
c) Le robot intelligent .....	3
I.4.Robot humanoïde .....	4
I.4.1. Définition du robot humanoïde.....	6
I.4.2. Les intérêts de la robotique humanoïde .....	7
I.4.3. Les types des robots humanoïdes et leurs applications .....	8
a. Les robots semi - passifs associant à une marche cyclique.....	9
b. Les robots humanoïdes de loisir.....	10
c. Les robots de service de taille humaine.....	11
d. I.5.conclusion.....	12
e.	

## **CHAPITRE II-Etat de l'art sur la modélisation des robots humanoïdes**

II1.Introduction.....	13
II.2.Différentes méthodes de modélisation a chaine ouvertes simples .....	13
II.3.Différentes approches de raccordement d'un robot humanoïde .....	14
II.3.1.Synthèse des travaux précédents .....	14
II.4.1. L'approche proposée.....	18
II .4.1.La modélisation de robot humanoïde RH-ARP .....	18
II .4.2.Structure du robot humanoïde.....	19
II .4.3.Structure du RH-ARP .....	20
II .4.4.Spécification du RH-ARP.....	20
a. Degrée de liberté.....	20
b. La taille du RH-ARP.....	21
c. Plages des DDL et leurs blocages.....	21

II .5.Méthode de la modélisation du robot proposée.....	21
II .6. Conclusion.....	22

### **CHAPITRE III-Description géométrique des robots à bras manipulateurs**

III.1.Introduction .....	23
III.2.Modèle géométrique direct.....	23
III.3.Notations de denavit-hartenberg (d&h) .....	24
III.3.1.Les règles générales de la méthode .....	24
III.3.2.Autres formes de définition des paramètres de d&h (les paramètres de d&h modifiés).....	27
III.3.2.1.Convention de khalil-kleifinger .....	27
III.3.2.2.Convention de paul .....	28
III.3.3.Espace de description de la cinématique des robots.....	29
III.4.Modèle géométrique inverse .....	29
III.4.1.La méthode de pieper.....	30
III.4.2.La méthode de paul.....	30
III.4.3.Méthode de lee.....	30
III.4.4.La méthode de raghavan et roth .....	30
III.4.5.Les méthodes numériques.....	31
III.5.Modèle géométrique inverse pour des cinématiques particulières .....	32
III.5.1.Robot possédant plus de six degrés de liberté .....	32
III.5.2.Robots possédant moins de six degrés de liberté .....	32
III.6.Modèle cinématique directe.....	33
III.6.1.Le modèle cinématique direct .....	33
III.6.2.Le jacobien de base .....	34
III.6.2.1.Par dérivation du modèle géométrique direct.....	34
III.6.2.2.En utilisant les lois de composition des vitesses.....	35
a. Théorème de composition des vitesses .....	36
b. Expression de la vitesse d'un point $p$ du corps $c_i$ .....	37

III.7. Conclusion.....	38
------------------------	----

## **CHAPITRE IV-Planification de trajectoire par champs de potentiel en robotique humanoïde**

IV.1.Introduction.....	39
IV.2.Méthode du champ de potentiels.....	39
IV.2.1.Historique.....	39
IV.2.2.Principe de la méthode.....	39
IV.3.Les différents champs.....	41
IV.3.1.Champ de forces circulaire autour des robots.....	41
IV.3.2.Champ de forces linéaire aux bords du terrain.....	41
IV.3.3.Champ de forces du à l'objectif.....	42
IV.3.4.Champ de forces tournant.....	42
IV.4.Inconvénient de la méthode.....	43
IV.4.1.Gestion des minima locaux.....	44
IV.5.Synthèse des travaux précédents.....	44
IV.6.Conclusion.....	44

## **CHAPITRE V-Résultats et simulations**

V.1.INTRODUCTION.....	46
LA MODELISATION .....	47

---

V.1.MODELISATION GEOMETRIQUE DU RH-ARP.....	47
V.1.1.Modèle géométrique direct du RH-ARP.....	48
V.1.2.Tableau de Denavit-Hartenberg .....	49
V.1.3.Les matrices.....	50
V.2.Le modèle géométrique inverse .....	53
V.2.1. Le calcul du modèle géométrique inverse.....	55
V.3.MODELE CINEMATIQUE.....	56
V.3.1.Les matrices.....	56
La planification de trajectoire.....	67

---

V.4.CHAMPS DE POTENTIEL.....	67
V.4.1.Description de l'environnement.....	67
V.4.2.Champ de potentiel attractif.....	68
SIMULATION .....	71

---

V.5.CONCLUSION.....	76
---------------------	----

<b>Conclusion général &amp; perspectives.....</b>	<b>77</b>
---	-----------

Production scientifiques .....	80
--------------------------------	----

Annexe.....	81
-------------	----

Bibliographie.....	82
--------------------	----



## Liste des figures

---

<b>CHAPITRE I.1 : Etat de l'art sur la robotique &amp; le robot humanoïde</b>	
<b>Figure I.1:</b> Un robot industriel Kawasaki FS-03N, robot de soudage.....	3
<b>Figure I.2:</b> La ressemblance des robots avec l'être humain dépend des objectifs et de la recherche menée.....	6
<b>Figure I.3:</b> a) Rabbit, b) Robot marcheur passif 3D, c) Robot marcheur actionné 3D d) Toddler. e) Denise.....	9
<b>Figure I.4:</b> Robot de loisir de petit taille.....	11
<b>Figure I.5:</b> Robots de taille similaire aux humains.....	12
<b>Chapitre II : Etat de l'art sur la modélisation des robots humanoïdes.</b>	
<b>Figure II.1:</b> représentation d'un bras humaine par la notion DH.....	27
<b>Figure II.2:</b> Modèle du robot humanoïde avec la position et l'orientation de l'articulation rotationnel.....	28
<b>Figure II. 3:</b> cadres de coordonner associés aux articulations du robot .....	28
<b>Figure II.4:</b> La base de coordonnée B1 au centre de cou.....	29
<b>Figure II.5:</b> le robot humanoïde HuboKHR-4.....	30
<b>Figure II.6:</b> Configuration de RH-0, structures cinématique.....	30
<b>Figure II.7:</b> RH-0 sagittal cinématiques division (SKD).....	31
<b>Figure II.8:</b> Symbole de l'articulation rotoïde.....	33
<b>Figure II.9:</b> longueurs des segments du corps exprimées par la hauteur H d'une personne .....	34
<b>Figure II.10:</b> Longueurs des segments du robot exprimé par rapport à une hauteur de la personne égale à 170 cm.....	35
<b>Figure III.11:</b> Chaîne d'articulations.....	37
<b>Figure II.12:</b> Modèle proposé pour le prototype RH-ARP.....	38
<b>Chapitre III : Description géométrique des robots à bras manipulateurs</b>	
<b>Figure III.1:</b> paramètre de Denavit-Hartenberg.....	43
<b>Figure III.2:</b> paramètre de Khalil-Kleifinger.....	44
<b>Figure III.3:</b> les paramètres de Paul.....	45

<b>Figure III.4:</b> Repérage utilisé en robotique.....	49
 <b>Chapitre IV : Planification de trajectoire par champ de potentiel en robotique humanoïde</b>	
<b>Figure IV.1:</b> Principe de la méthode champ de potentiel.....	61
<b>Figure IV.2:</b> exemple de minimum local.....	64
 <b>Chapitre V : Résultats &amp; simulation</b>	
<b>Figure V.1:</b> Représentation géométrique du RH-ARP.....	68
<b>Figure V.2:</b> Représentation de changement de repère.....	71
<b>Figure V.3:</b> représentation géométrique du pied.....	75
<b>Figure V.4:</b> Environnement sous forme de grille d'occupation.....	90
<b>Figure V.5:</b> Construction de la table des distances.....	91
<b>Figure V.6:</b> Organigramme général de la stratégie.....	92
<b>Figure V.7:</b> interface du programme.....	93
<b>Figure V.8:</b> La structure du robot.....	94
<b>Figure V.9:</b> MGD de la chaine 1.....	95
<b>Figure V.10:</b> MGD de la chaine 2 .....	95
<b>Figure V.11:</b> l'évitement de l'obstacle du robot RH-ARP.....	96
<b>Figure V.12:</b> Vue de haut de la simulation de la planification sous vrml.....	97
<b>Figure V.13:</b> vue de coté de la simulation de trajectoire.....	98

## Liste des tableaux

---

### **Chapitre II** : Etat de l'art sur la modélisation des robots humanoïdes

<b>Tableau II.1:</b> Degré de liberté.....	35
<b>Tableau II.2:</b> La taille du RH-ARP.....	36
<b>Tableau II.3:</b> Plages des DDL et leurs blocages.....	36

### **Chapitre V** : Résultats & simulation

<b>Tableau V.1:</b> Paramètres de Denavit-Hartenberg.....	69
---	----

# PROBLEMATIQUE

---

La réalisation d'un tel système ou robot nécessite en premier lieu d'établir son modèle mathématique.

La modélisation du robot humanoïde était et reste à nos jours un modèle ambiguë, plusieurs travaux ont été faits par plusieurs approches et méthodes.

Certains travaux ont considéré les articulations du robot humanoïde comme une structure arborescente, d'autre comme chaîne articulaire, fermée ou ouverte.

Les méthodes de modélisation sont aussi différentes ; la méthode de Denavit Hartenberg, la notion de modélisation (père-enfant) utilise l'équation de Rodrigues et la méthode d'espace d'état.

Dans ce présent travail nous avons fait une étude sur toutes ces méthodes, et nous avons proposé une telle approche basée sur la synthèse des travaux précédents.

Nous avons établi le modèle géométrique direct, le modèle géométrique inverse et le modèle cinématique directe du prototype RH-ARP « Robot Humanoïde Automatique Robotique Productique ».

Les méthodes de planification/navigation de trajectoire d'un robot mobile, dans notre cas, robot mobile à deux pattes plus précisément le robot humanoïde sont très vastes. Parmi eux c'est la méthode de navigation par champ de potentiel.

La méthode de champ de potentiel proposé par Oussama Khatib dans les années 80 a été inventé en premier lieu pour les bras manipulateur puis elle a été généralisée pour les robots mobiles. Puisque le robot humanoïde est un robot mobile constitué d'un ensemble des chaînes articulaires qui peuvent être décrites mathématiquement comme des bras manipulateurs. Nous l'avons choisi.

Le prototype réalisé est un robot humanoïde à 18 degrés de liberté (ddl), trois ddl dans chaque bras et six ddl par pieds.

# *CHAPITRE*

## *I*

## **I.1.INTRODUCTION**

Avec l'évolution des technologies, les robots gagnent petit à petit des aptitudes à réaliser des gestes de plus en plus complexes. Ces développements conduisent à des machines hautement perfectionnées qui peuvent réaliser des tâches de plus en plus sophistiquées, mais trop souvent, la difficulté à maîtriser ces robots augmente avec la complexité du système.

Dans le présent chapitre nous donnons une généralité sur la robotique et le robot humanoïde.

## **I.2.DEFINITION DE LA ROBOTIQUE**

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

### **I.2.1.définition du robot**

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.

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 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.

En fait, l'image que chacun s'en fait 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 :

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

#### I.2.2. Historique

- ❖ 1947 : Premier manipulateur électrique télé-opéré.
- ❖ 1954: Premier robot programmable.
- ❖ 1961:Utilisation d'un robot industriel, commercialisé par la société UNIMATION (USA), sur une chaîne de montage de General Motors.
- ❖ 1961 : Premier robot avec contrôle en effort.
- ❖ 1963 : Utilisation de la vision pour commander un robot. [1].

### I.3.TYPE & CLASSIFICATION DES ROBOTS

#### I.3.1. Par type

##### a) Les manipulateurs

- ❖ Les trajectoires sont non quelconques dans l'espace.
- ❖ Les positions sont discrètes avec 2 ou 3 valeurs par axe.
- ❖ La commande est séquentielle.

#### b) Les télémanipulateurs

Appareils de manipulation à distance (pelle mécanique, pont roulant), apparus vers 1945 aux USA.

- ❖ Les trajectoires peuvent être quelconques dans l'espace.
- ❖ Les trajectoires sont définies de manière instantanée par l'opérateur.
- ❖ généralement à partir d'un pupitre de commande (joystick).

#### c) Les robots

- Les trajectoires peuvent être quelconques dans l'espace.
- L'exécution est automatique.
- Les informations extéroceptives peuvent modifier le comportement du robot.

On peut distinguer:

#### d) Les robots manipulateurs industriels :



**Figure I.1:** Un robot industriel Kawasaki FS-03N, robot de soudage.

**e) Les robots didactiques :** qui sont des versions au format réduit des précédents robots. La technologie est différente, de même que les constructeurs. Ils ont un rôle de formation et



d'enseignement, ils peuvent aussi être utilisés pour effectuer des tests de faisabilité d'un poste robotisé.

**f) Les robots mobiles autonomes:** Les possibilités sont plus vastes, du fait de leur mobilité. Notamment, ils peuvent être utilisés en zone dangereuse (nucléaire, incendie, sécurité civile, déminage), inaccessible (océanographie, spatial).

De tels robots font appel à des capteurs et à des logiciels sophistiqués. On peut distinguer deux types de locomotion : Les robots marcheurs qui imitent la démarche humaine, et les robots mobiles qui ressemblent plus à des véhicules.

#### I.3.2. Par génération

A l'heure actuelle, on peut distinguer trois générations de robots

##### a) Le robot passif

Il est capable d'exécuter une tâche qui peut être complexe, mais de manière répétitive, il ne doit pas y avoir de modifications intempestives de l'environnement. L'auto-adaptativité est très faible, de nombreux robots sont encore de cette génération.

##### b) Le robot actif

Il devient capable d'avoir une image de son environnement, et donc de choisir le bon comportement (sachant que les différentes configurations ont été prévues). Le robot peut se calibrer tout seul.

##### c) Le robot intelligent

Le robot est capable d'établir des stratégies, ce qui fait appel à des capteurs sophistiqués, et souvent à l'intelligence artificielle.

### I.4.ROBOT HUMANOÏDE

Les études récentes de l'impact de la robotique dans la société ont clairement établi qu'il sera nécessaire d'utiliser des robots pour effectuer dans un proche avenir des tâches de service et d'aide dans les domaines industriels, de l'inspection en milieux

difficiles et dangereux, de sécurité et de surveillance et de service aux personnes âgées et/ou dépendantes.

Les robots à pattes et en particulier les robots humanoïdes sont amenés à se développer très fortement dans les dix prochaines années. Leur capacité à se mouvoir dans un environnement conçu pour les êtres humains constitue leur principal atout face à d'autres structures robotiques comme celles à roues. Il est nécessaire au robot humanoïde de maîtriser les modes de déplacement de marche dans un environnement d'habitation avec des escaliers et des sols inclinés. Car ils sont de plus en plus souvent cités comme une solution potentielle pour répondre aux problèmes liés au vieillissement de la population (aides à la personne). Les chercheurs imaginent qu'un robot capable de se déplacer dans un environnement initialement conçu pour les humains et capable de réaliser des tâches de service à domicile, est une solution économiquement très intéressante pour répondre aux besoins. La mise au point d'un tel robot humanoïde répond dès lors, non seulement à ce problème d'aide et de service à la personne, mais permet également l'utilisation de ce même robot pour des applications de surveillance et d'intervention en milieux dangereux ou en situation de catastrophes. [2]

#### **I.4.1. Définition du robot humanoïde**

Le terme humanoïde signifie « de forme humaine », il évoque principalement la bipédie, la présence de deux bras et d'une tête. Il s'agit donc uniquement d'un critère phénotypique et plus précisément morphologique.

Un robot humanoïde est un robot dont l'apparence générale rappelle celle d'un corps humain. Généralement, les robots humanoïdes ont un torse avec une tête, deux bras et deux jambes, bien que certains modèles ne représentent qu'une partie du corps, par exemple à partir de la taille. Certains robots humanoïdes peuvent avoir un « visage », avec des « yeux » et une « bouche ». [3]

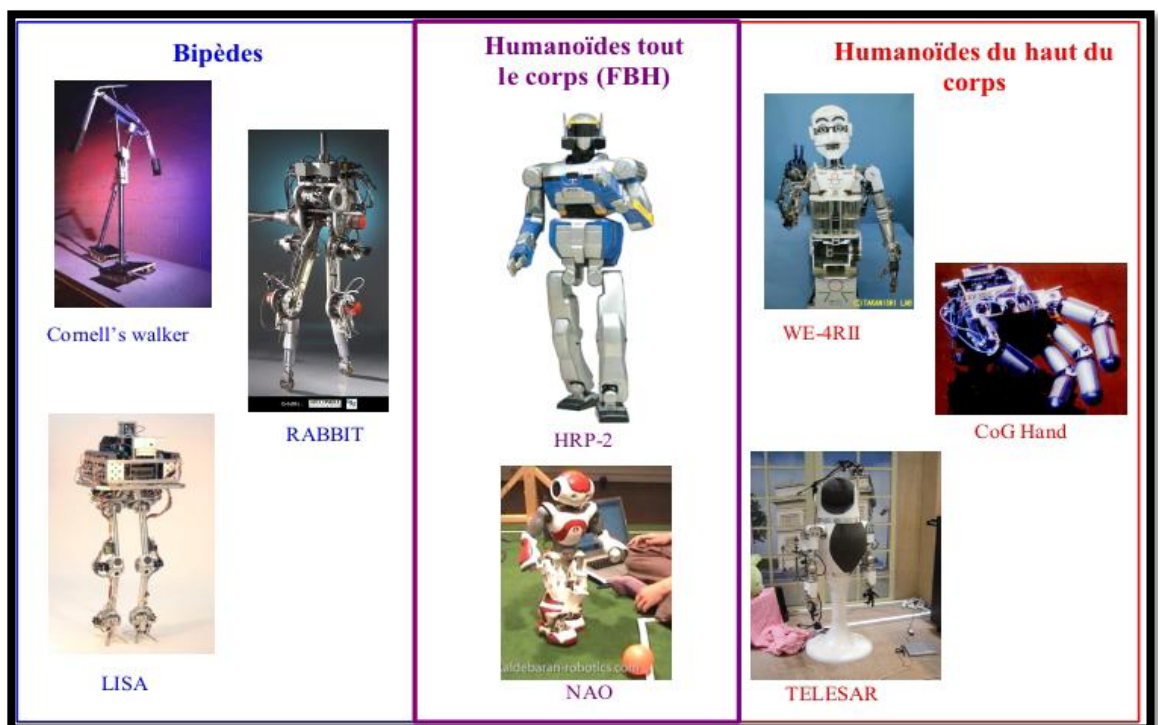
## CHAPITRE I

### Généralité sur la robotique & le robot humanoïde

La robotique humanoïde étudie donc les robots qui ressemblent à l'être humain. Cette ressemblance dépend des objectifs de la recherche effectuée. Par exemple les travaux qui portent sur la manipulation des objets, l'interaction homme-machine et l'intelligence artificielle utilisent souvent des robots dont seul le haut du corps ressemble à celui des humains. Le robot TETESAR le projet COG du MIT, et le WE-4RII, illustrent ce type de recherches.

D'autre part, les robots bipèdes sont utilisés depuis les années 70 pour la recherche sur la locomotion des machines et des personnes. Les travaux sur les exosquelettes, les marcheurs semi-passifs et les mécanismes bipèdes capables de porter une personne sont quelques exemples de cette catégorie de robots.

Récemment, les progrès technologiques ont permis l'émergence d'humanoïdes complets (Full Body Humanoïd FBH). **La figure I.2** illustre la diversité des robots utilisés en robotique humanoïde.



**Figure I.2:** La ressemblance des robots avec l'être humain dépend des objectifs et de la recherche menée.

L'étude de la marche bipède a progressé jusqu'à ce qu'en 1996, Honda présente à la communauté scientifique les résultats spectaculaires issus de travaux internes sur son robot P2, capable de marcher, de monter un escalier et de manipuler et porter des objets .

Le développement des robots humanoïdes s'est accéléré depuis l'an 2000. Beaucoup d'institutions se sont investies en recherche sur ces robots avec des perspectives et des objectifs différents.

#### **I.4.2. Les intérêts de la robotique humanoïde**

La robotique humanoïde s'intéresse à une catégorie bien précise de robots dont la caractéristique essentielle est la ressemblance morphologique avec l'être humain.

Ces machines doivent s'apparenter au fonctionnement de l'homme d'un point de vue mécanique et aussi social. Nous considérons qu'il existe trois intérêts majeurs qui motivent l'étude et le développement de ces machines.

Le premier objectif de la robotique humanoïde est de comprendre le mieux possible le fonctionnement des humains qui demeurent les entités dont le fonctionnement, en particulier mécaniques, sont les plus complexes que nous ayons eu à examiner. La construction d'un robot avec des capacités similaires et même supérieures sur certains aspects, demeure un des rêves de nombreux chercheurs dans ce domaine.

Un autre intérêt au développement des robots humanoïdes réside dans le fait qu'ils peuvent élargir la présence d'une personne. De la même façon que le téléphone permet d'augmenter la portée de notre voix, nous pouvons demander à un robot humanoïde de réaliser une tâche spécifique. Amener une boisson du réfrigérateur, jeter les poubelles ou faire des courses sont quelques exemples de cette idée de présence élargie qu'un robot

humanoïde peut offrir. Ceci a une application immédiate pour des tâches dangereuses ou peu appropriées aux humains.

Les robots humanoïdes servent aussi de plate-forme de recherche d'intégration commune pour le développement scientifique et technologique. Parmi les thématiques abordées, on peut citer, la planification et la génération de mouvements, la coordination perception action/locomotion, l'optimisation mécatronique de robots complexes, l'intelligence artificielle, etc. Cette richesse due à l'interaction de chercheurs de domaines différents qui fait de la robotique humanoïde un sujet passionnant et en progrès rapide. [4]

En effet, on peut considérer qu'un robot humanoïde peut constituer une plateforme idéale pour unifier des recherches très avancées dans le domaine de la robotique.

Enfin et surtout, la complexité du système entier vient de la multitude de degrés de liberté d'un humanoïde. Cette complexité nécessite une méthode de contrôle sophistiquée pour générer des mouvements où le robot est capable à la fois d'accomplir les tâches précises et de garder son équilibre dans des environnements encombrés.

La forme anthropomorphe de l'humanoïde facilite l'interaction avec l'homme, en utilisant différents modes de communication, y compris le mouvement du corps. La collaboration avec des neuroscientistes et des biomécaniciens s'initie afin d'établir et de vérifier des théories et des lois de commande. [5]

#### I.4.3. Les types des robots humanoïdes et leurs applications

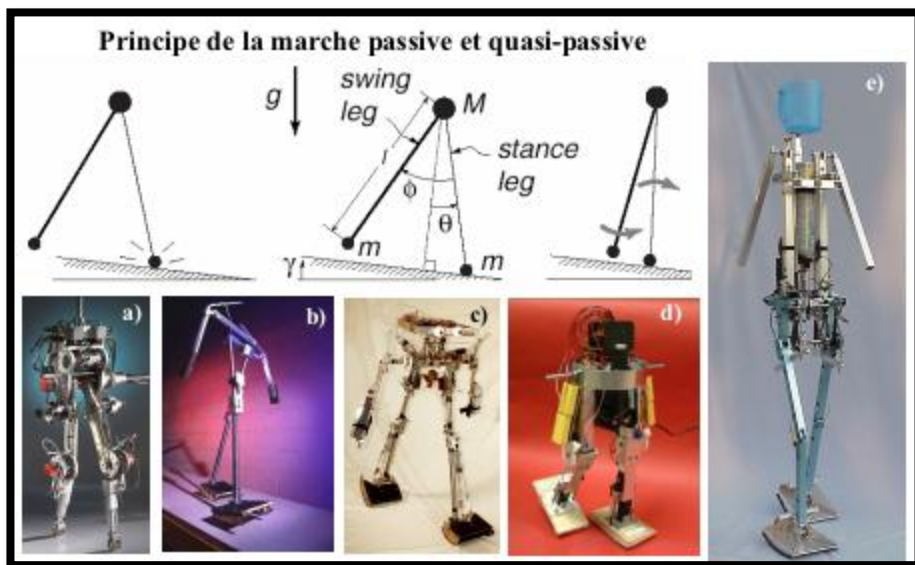
Une classification des robots humanoïdes existants est difficile à faire du fait de la diversité croissante de projets et modèles. Pourtant on peut distinguer trois types de robots qui ont

des tailles et une structure différentes. Les objectifs de recherche et les applications possibles associées sont alors aussi distincts.

Les robots marcheurs dynamiques ont des applications en réhabilitation et prothèses ; les robots de loisirs peuvent servir comme compagnons ou comme jouets et finalement les robots de service ont une taille similaire aux humains et peuvent les assister.

#### a. Les robots semi - passifs associant à une marche cyclique

Une première catégorie de robots anthropomorphes est les robots passifs et semi- passifs. La recherche en locomotion sur ces bipèdes et humanoïdes s'appuie sur la nécessité de comprendre et de profiter de la dynamique naturelle de la marche humaine qui est vue comme un processus cyclique. A la différence des robots complètement actionnés, ces machines dépendent un minimum d'énergie



**Figure I.3:** a) Rabbit, b) Robot marcheur passif 3D, c) Robot marcheur actionné 3D d) Toddler. e) Denise.

Une des principales motivations pour l'étude de ce type de mécanismes et de robots est l'amélioration de la compréhension de la marche humaine avec des applications, par exemple en prothèses robotisées pour personnes handicapées.

Une autre application est la création de machines capables de marcher des longues distances en dépensant un minimum d'énergie.

L'application des résultats de ces recherches pourra aussi certainement contribuer à améliorer la commande des humanoïdes actionnés.

Du point de vue de la structure, une caractéristique fondamentale de ce type de robots dédiés à la marche sont les pieds de forme arrondie. Bien que bénéfiques pour la marche, cette forme de pieds ne permet pas à ces robots de tenir debout statiquement. D'autre part, la direction de marche est difficile à changer à cause du sous-actionnement.

#### **b. Les robots humanoïdes de loisir**

Depuis son robot chien AIBO, Sony Corp. a présenté QRIO en 2004. Ce robot de loisir est devenu une référence par rapport à la rapidité et à la souplesse de ces mouvements. En 2006, Sony a annoncé la suspension de la recherche sur AIBO et QRIO. Pourtant, les possibilités commerciales et de recherche sur ce type de robots humanoïdes pour le loisir avaient déjà attiré l'attention des entreprises et universités. Ces robots comprennent des tailles à partir d'une quinzaine de cm jusqu'à une cinquantaine. Des exemples de ce type de robots sont NAO, qui va remplacer les robots AIBO dans la Robocup, HOAP-1, Robosapiens, Chroin et Choromet.

L'application principale de ces humanoïdes est d'être utilisée comme jouet ou compagnon disposant de capacités multimédia et d'accès à internet. Du point de vue de la locomotion, la marche et parfois la danse sont étudiées. Ces ordinateurs mobiles, autonomes et intelligents, représentent des marchés potentiels importants à court terme et des recherches sont menées sur l'interface homme-machine, la locomotion ou encore l'apprentissage.



Ces robots ont des moteurs à chaque articulation et la majorité aux pieds plats et rigides. **La Figure I.4** montre quelques exemples de robots humanoïdes de loisir. Ces robots sont capables des mouvements les plus rapides et les plus dynamiques.



**Figure I.4:** Robot de loisir de petite taille.

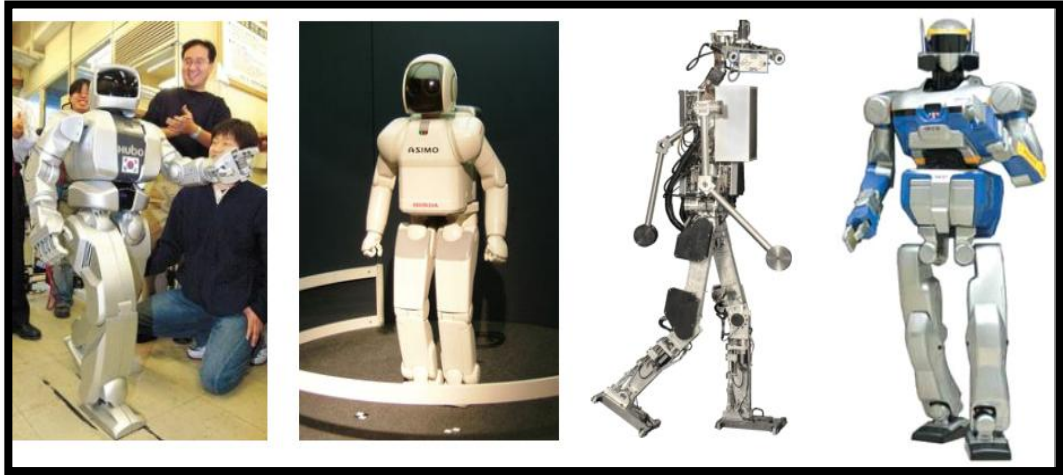
#### c. Les robots de service de taille humaine

Les robots les plus complets et performants sont ceux de taille humaine. Ces robots sont étudiés depuis les années 70. Actuellement ils sont capables, grâce à des méthodes de locomotion couplées à des systèmes de vision, de naviguer dans des environnements humains tels qu'une maison et même de modifier cet environnement pour augmenter leurs capacités de déplacement.

La recherche sur cette famille d'humanoïdes est une des plus importantes. Un des points-clés repose sur l'idée que le travail de groupes de recherche différents sur une même plate-forme de robot humanoïde peut accélérer son développement en termes d'amélioration de hardware et software ainsi qu'en termes de capacités de locomotion.



Divers projets sur des robots humanoïdes de taille proche de celle des humains sont menés dans plusieurs universités du monde. Quelques exemples de ce type d'humanoïdes sont HUBO, ASIMO, Johnnie, et HRP-2. Ces machines qui sont complètement actionnées et possèdent des pieds plats sont présentées sur **la figure I.5.**



**Figure I.5:** Robots de taille similaire aux humains.

Une de principales applications de ces robots est l'assistance de personnes handicapées et âgées, ainsi que la substitution des personnes pour des tâches dangereuses ou pénibles. Pour cela, ces robots humanoïdes doivent être capables d'évoluer et d'effectuer des tâches dans un environnement conçu pour les humains. Ils doivent aussi être performants au niveau de l'interaction avec l'homme. [4]

### I.5.CONCLUSION

La conception et la commande des robots nécessitent le calcul de certains modèles mathématiques, tels que les modèles de transformation entre l'espace opérationnel (dans lequel est définie la situation de l'organe terminal) et l'espace articulaire (dans lequel est définie la configuration du robot).

Dans le chapitre suivant nous montrerons nos travaux sur la modélisation du robot HRP2.

# *CHAPITRE*

## *II*

#### II.1.INTRODUCTION

La modélisation de Système poly-articulé a pour but de représenter au mieux le robot dans son environnement pour ensuite lui programmer des trajectoires avec la Planification de mouvement.

On donnera dans ce chapitre un état de l'art sur la modélisation des robots humanoïdes et les méthodes de modélisation.

#### II.2.DIFFERENTES METHODES DE MODELISATION A CHAINE OUVERTES SIMPLES

Le calcul symbolique de modèle géométrique cinématique et dynamique par ordinateur a fait l'objet d'un grand nombre de travaux.

La plus répandue est celle de **Denavit Hartenberg**, mais cette méthode développée pour des structures ouvertes simples, présente des ambiguïtés lorsqu'elle est appliquée sur des robots ayant des structures fermées ou arborescentes. C'est pourquoi, nous utilisons la notation de **Khalil & Kleifinger** (DH-M) qui permet la description homogènes, et avec un nombre minimum de paramètres, des architectures ouvertes simples et complexes de systèmes mécaniques articulés.

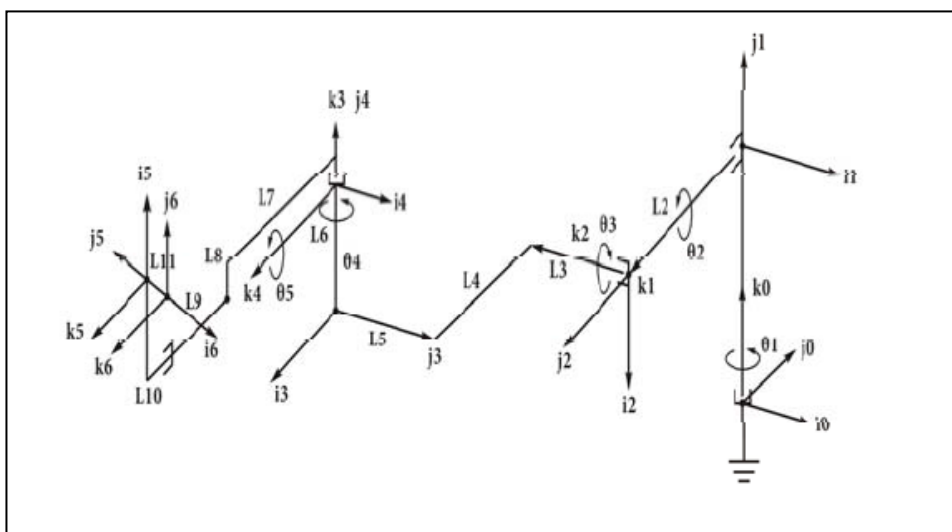
La modélisation des robots de façon systématique et automatique exige une méthode adéquate pour la description de leur morphologie. Plusieurs méthodes de notations ont été proposées **Denavit, Sheth, Renaud, Khalil** [7] et l'équation de **Rodrigues** [8], [9], [10].

### II.3.DIFFERENTES APPROCHES DE RACCORDEMENT D'UN ROBOT HUMANOÏDE

Dans cette section, nous nous sommes inspirés des articles [11, 12, 13, 14, 15] pour le développement de notre travail.

#### II.3.1.Synthèse des travaux précédents

Concernant la modélisation géométrique et la cinématique d'un robot humanoïde les auteurs [11] ont considéré chaque patte du robot comme un bras manipulateur indépendant, et ils ont calculé son modèle géométrique et son modèle cinématique .Pour cela nous avons considéré le robot humanoïde comme chaîne articulatoire simple.



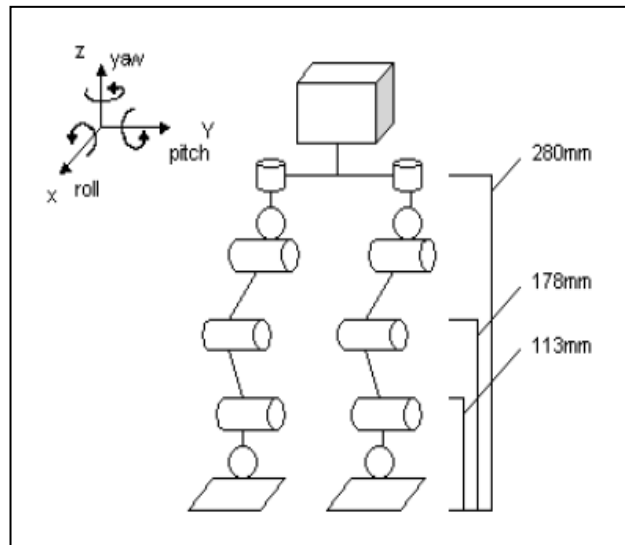
**Figure II.1 :** représentation d'un bras humaine par la notion DH.

La cinématique directe du robot en ce qui concerne la position relative et l'orientation d'un pied par rapport à l'autre a été résolue facilement [12] considérant le modèle comme chaîne robotique des liens reliés ensemble à un autre par des articulations.

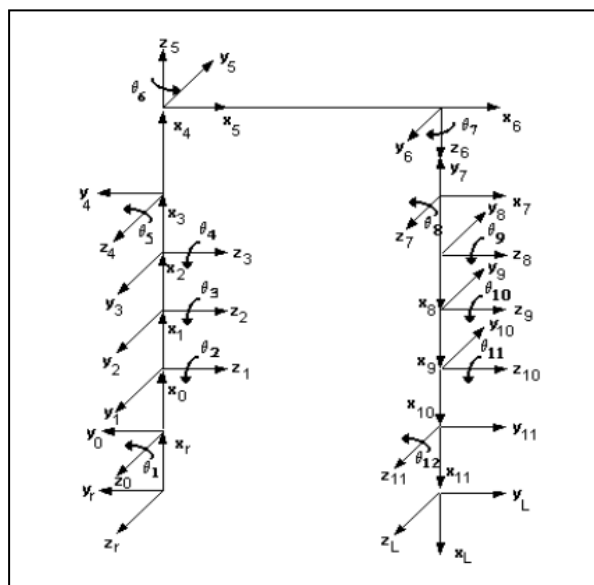
## CHAPITRE II

### Etat de l'art sur la modélisation des robots humanoïdes

Le premier lien, l'armature du même rang basse, est le pied droit du robot. Ils ont fixé à la terre pour une position ou un mouvement finale donnée, où l'armature du même rang globale de robot a été placée. Le dernier lien est le pied gauche, qui était libre pour se déplacer. L'attribution des armatures du même rang aux joints de robot illustré dans la **Figure II.2**.



**Figure II.2:**Modèle du robot humanoïde avec la position et l'orientation de l'articulation rotationnel.



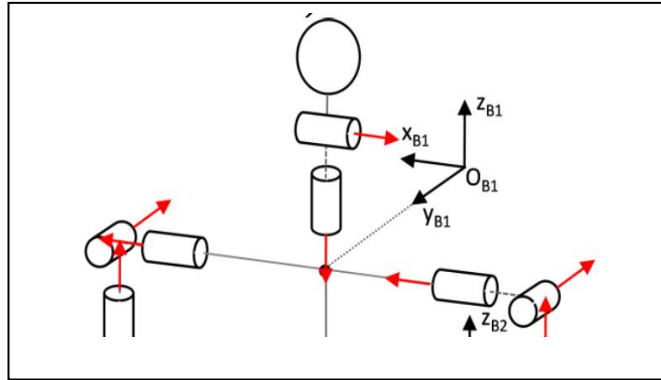
**Figure II.3 :** cadres de coordonner associés aux articulations du robot.

## CHAPITRE II

### Etat de l'art sur la modélisation des robots humanoïdes

Les auteurs du travail [13] ont établi deux bases de coordonnées **B1** et **B2**.

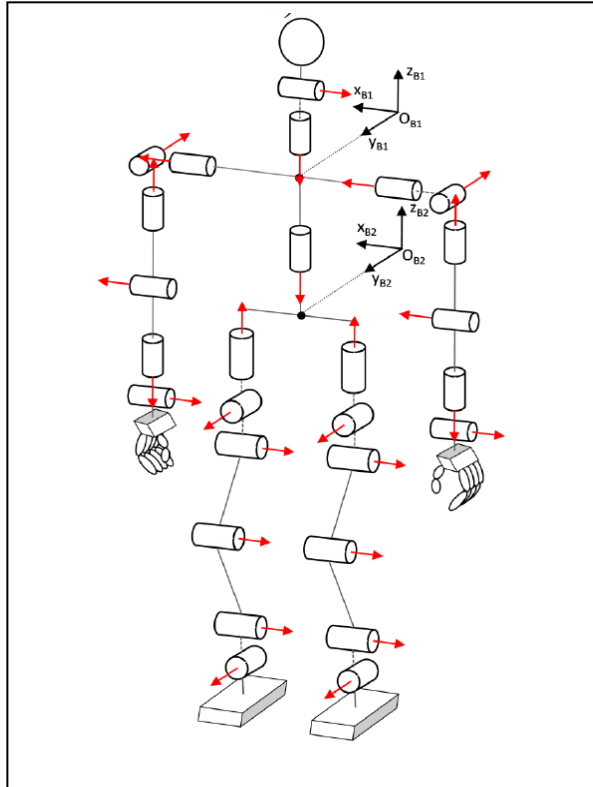
**B1** est établi au centre de cou dont il est la référence de coordonnées pour les bras et la tête.



**Figure II.4** :La base de coordonnée **B1** au centre de cou.

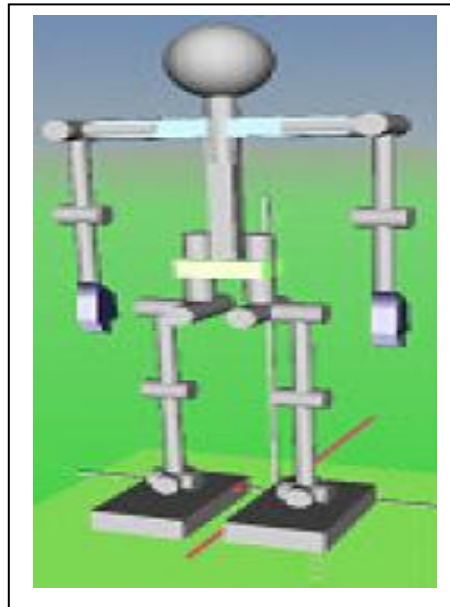
**B2** est le cadre de référence de coordonnées, il est liée à **B1** par un point de cadre de taille et possède une simple transformation (simple lien entre **B1** et **B2**).

En conséquence, **B1** est considéré comme le châssis de base mondiale de coordonnée pour l'ensemble du robot.

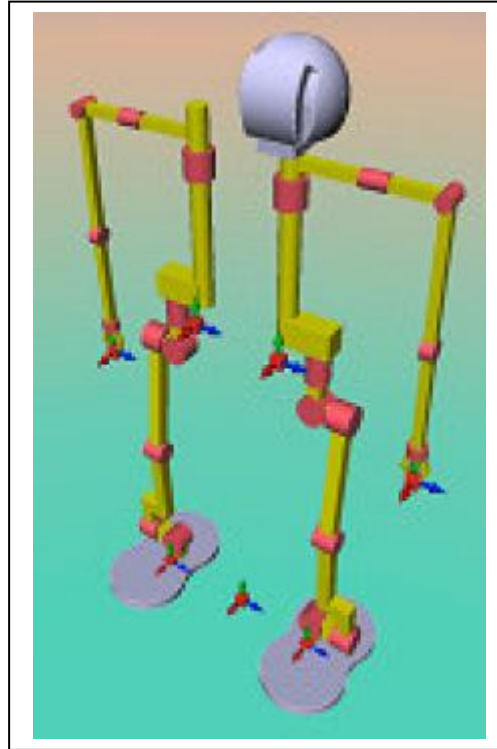


**Figure II.5 :** le robot humanoïde **HuboKHR-4**.

Les auteurs ont divisé le corps du robot en deux partis indépendants (demi-humoïde) manipulateurs. [12], [14]



**Figure II.6:** Configuration de RH-0, structures cinématique.



**Figure II.7 :** RH-0 sagittal cinématiques division (SKD).

l'objectif est de soumettre aux contraintes suivantes à tout moment: garder l'équilibre de la ZMP(zéro moment point) et d'imposer la même position et l'orientation pour les parties communes(bassin; thoracique; cervical) de l'humanoïde manipulateurs gauche et à droite puis ils ont considéré la demi-humanoïde comme une chaîne manipulateur ouvert et ils ont généraliser le modèle cinématique du jambe avec 12ddl (O1. ..O12). On voulait des mouvements finaux les plus humains possibles pour donner un maximum de gestualité au robot.

#### **II.4.L'APPROCHE PROPOSEE :**

##### **II .4.1.La modélisation de robot humanoïde RH-ARP**

Pour concevoir, simuler ou commander un robot humanoïde, il est nécessaire, entre autres, de disposer de modèles du mécanisme. Plusieurs niveaux de modélisation sont possibles. Ils dépendent des spécifications du cahier des charges de l'application envisagée ; il en découle des modèles géométriques, cinématiques

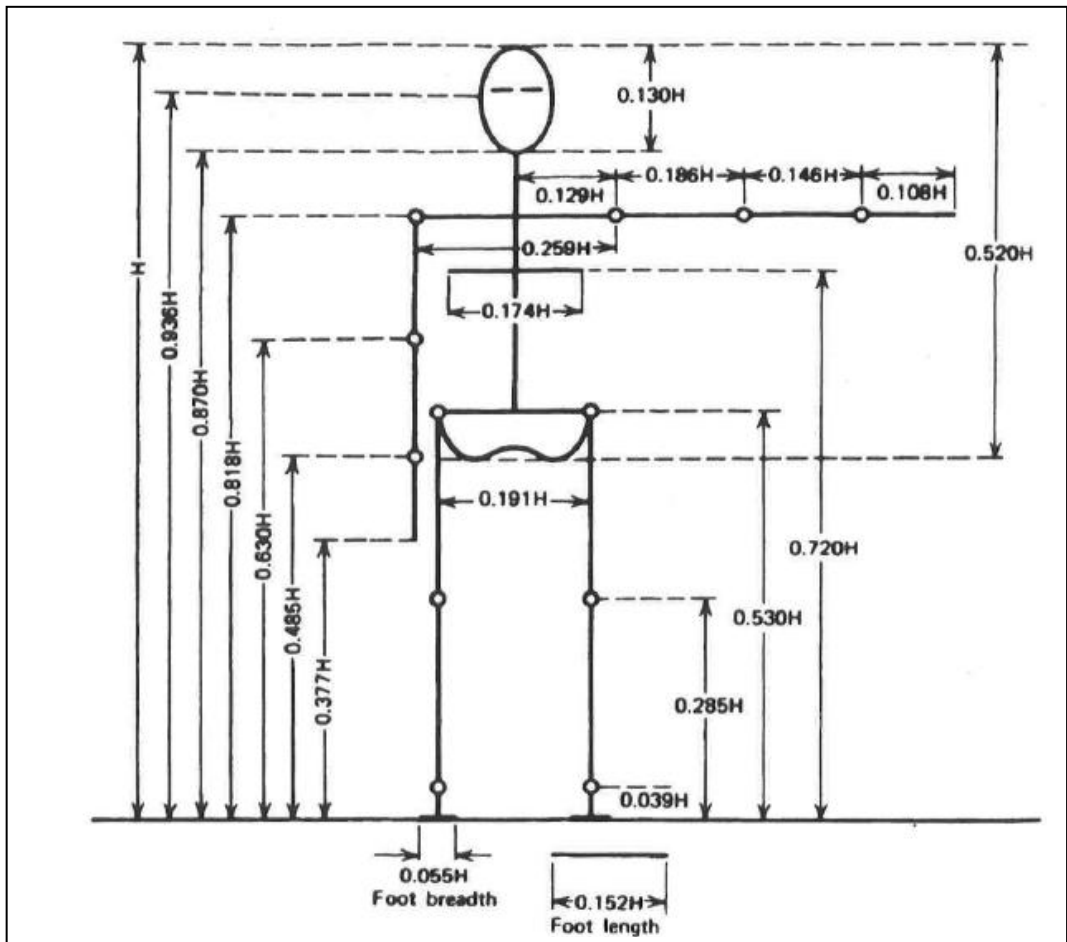


et dynamiques à partir desquels peuvent être engendrés les mouvements du robot, ou bien des modèles statiques qui décrivent les interactions du mécanisme avec son environnement.

L'obtention de ces différents modèles n'est pas aisée, la difficulté variant selon la complexité de la cinématique de la chaîne articulée. Entrent en ligne de compte le nombre de degrés de liberté, le type des articulations mais aussi le fait que la chaîne peut être ouverte simple, arborescente ou fermée. [1]

**II .4.2.Structure du robot humanoïde**

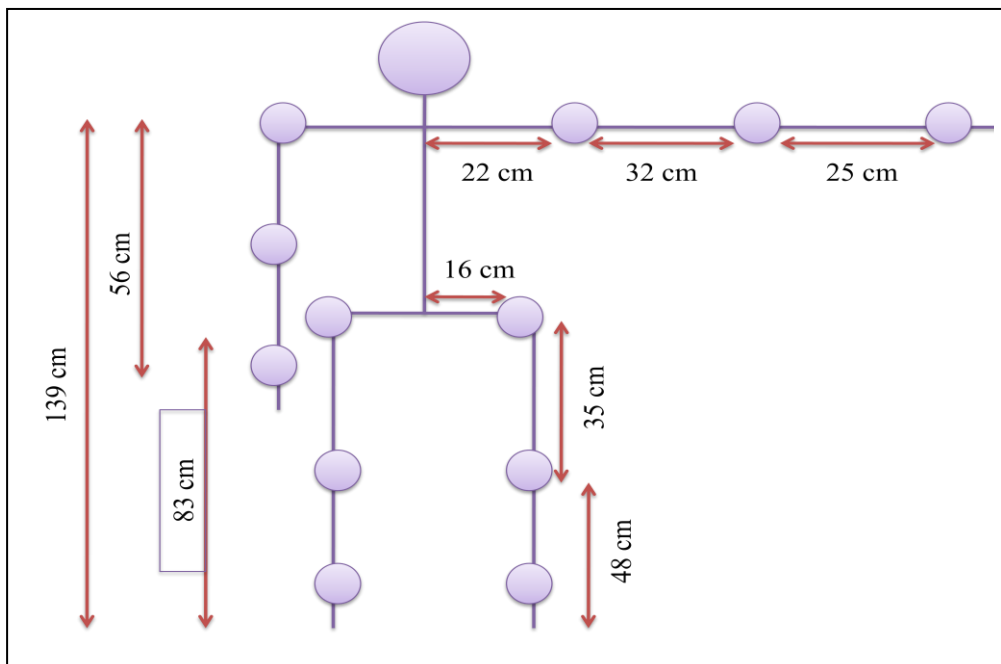
La figure II.9 Présente les dimensions moyennes du corps humain par rapport à la hauteur de la personne. Ces données peuvent être utilisées pour dimensionner un modèle correctement



**Figure II.9:** longueurs des segments du corps exprimées par la hauteur H d'une personne [3].

**II .4.3.STRUCTURE DU RH-ARP**

La taille du prototype RH-ARP conçu est égale à 172 cm.



**Figure II.10:** Longeurs des segments du robot exprimées par rapport à une hauteur de la personne égale à 170 cm.

**II .4.4.Spécification du RH-ARP**

**a. Degré de liberté**

Nous avons fixé le nombre de degré de liberté de notre prototype RH-ARP à 18 DDL.

Trois degrés par bras répartis par des rotations d'un angle  $\theta$ : au niveau de l'épaule du coude et du poignet.

Six degrés par jambe répartis par trois au niveau de la hanche (rotation d'un angle  $\psi$ , rotation d'un angle  $\theta$  et rotation d'un angle  $\phi$ ), une au niveau du genou (rotation d'un angle  $\theta$ ) et deux au niveau de la cheville (rotation d'un angle  $\theta$  et  $\phi$ ).

D.D.L	Head		
	Bras	3 DOF/bras (x2)	6
	Epaule	1 (x2)	
	Coude	1 (x2)	
	Poignet	1 (x2)	
Jambe	6 DOF/Jambe(X2)	12	
	Hanche	3 (x2)	
	Genoux	1 (x2)	
	Cheville	2 (x2)	
<b>Totale</b>			<b>18</b>

**b. La taille du RH-ARP**

La taille du robot humain conçu est égale à 170 cm, concordant avec celui de la **figure 2**, nous obtenons ainsi une longueur du bras égal à 32 cm, celle de l'avant-bras égal à 25 cm, une longueur égal à 42 cm pour la cuisse et de 43 cm pour la jambe.

Dimension	taille	170	cm
	bras	32	cm
	Avant-bras	25	cm
	Cuisse	42	cm
	jambe	43	cm

**c. Plages des DDL et leurs blocages.**

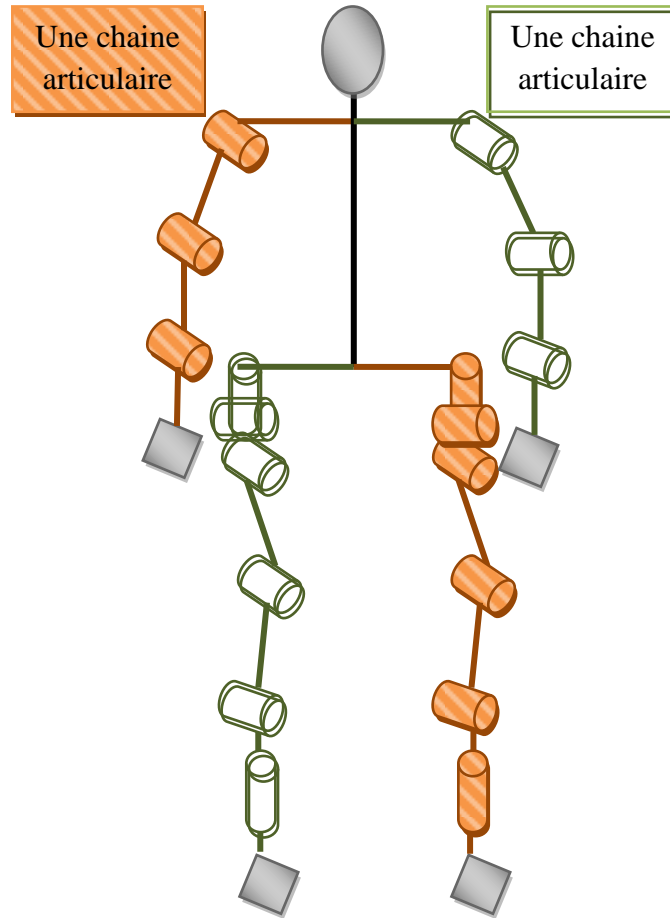
En se basant sur quelques configurations préétablies [6], nous avons établi pour notre prototype les blocages représentés sur le tableau ci-contre.

	Joint	blocage
Bras	Epaule	-180° à 60°
	Coude	-90° à 0°
	Poignet	-70 à 90°
Jambe		-12° à 12°
		-80 ° à 80 °
	Hanche	-15 ° à 15 °
	Genou	0° à 180 °
	Cheville	-12° à 12°
		-25° à 25°

**II .5.METHODE DE LA MODELISATION DU ROBOT PROPOSEE**

Depuis plusieurs années, de nombreuses recherches ont été menées dans le but de modéliser l'être humain. De nos jours il existe plusieurs modèles, chacun d'eux présente une avancée dans la modélisation de l'homme. Dans ce qui suit, un modèle de robot humanoïde (bras, main, jambe, pied) sera proposé.

Par le fait que la main gauche et le pied droit soient en mouvement simultanément et vise versa, et que nous voulions avoir la position et l'orientation de l'organe terminal (pied droit main gauche-pied gauche main droite). Nous avons établi le modèle suivant :



**Figure II.12:** Modèle proposé pour le prototype RH-ARP.

Considérant que la main gauche et le pied droit comme une seule chaîne articulaire, et la main droite avec pied gauche comme une deuxième chaîne articulaire simple.

## II .6. CONCLUSION

La modélisation du robot humanoïde était et reste à nos jours un modèle ambiguë, plusieurs travaux ont été faits par plusieurs approches et méthodes.

Le chapitre suivant est une description géométrique des robots à bras manipulateurs.

# *CHAPITRE*

## *III*

**III.1.INTRODUCTION**

Pour concevoir, simuler ou commander un robot on est amené, entre autre, à décrire, sous forme d'équations mathématiques le comportement du système physique en question, soit ainsi à rechercher divers modèles (modèles géométriques, cinématiques, dynamiques,...etc.) permettant d'engendrer les mouvements du robot nécessaires pour remplir une tâche dans un environnement donné.

L'obtention de ces différents modèles n'est pas aisée, la difficulté varie selon la complexité de la cinématique de la chaîne articulée, entrant en ligne de compte le nombre de degrés de liberté, le type d'articulations, ainsi que le type de la chaîne cinématique qui peut être ouverte simple, arborescente ou fermée. La description que nous présentons dans le présent chapitre est fondée sur des conventions qui permettent d'avoir la même approche quelle que soit le type de la structure.

**III.2.MODELE GEOMETRIQUE DIRECT**

Pour analyser le comportement de la structure mécanique d'un robot ou d'un bras manipulateur, il est nécessaire de lier un repère orthonormé à chacun de ces corps et un référentiel  $\{R_0\}$  attaché à la base du robot ou du bras manipulateur. L'étude des mouvements des corps revient alors à l'étude des mouvements des repères.

Etant donnés  $1+ n$  repères  $\{R_0\}, \{R_1\}, \dots, \{R_n\}$  et un point  $P$  défini relativement au repère  $\{R_n\}$  par :

$$\overrightarrow{O_n P} = \begin{pmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{pmatrix}$$

De la relation  ${}^0P_p = {}^0T_n \cdot {}^n P_p$ , la connaissance de la position de  $P$  relativement à  $\{R_0\}$  revient à connaître la matrice de transformation :

$${}^0T_n = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot \dots \cdot {}^{n-2}T_{n-1} \cdot {}^{n-1}T_n$$

Qui renvoie elle-même sur la connaissance de la position et de l'orientation de chaque repère  $\{R_i\}$   $i=1\dots n$  par rapport au repère  $\{R_{i-1}\}$ . Plusieurs méthodes et notations ont été proposées : la notation de *Denavit- Hartenberg*, la notation de *Paul*, la notation de *Khalil-Kleifinger*, La méthode *C-B* proposée par *Livitin* et la méthode de *Megahed*. La plus répandue est celle de *Denavit- Hartenberg*.

### III.3. Notations de DENAVIT-HARTENBERG (d&h)

Ce paragraphe introduit les notations de *Denavit- Hartenberg*, qui sont utilisées pour décrire la structure géométrique des robots et qui, par conséquent, sont à la base de la mise en équations de tous les modèles de robots.

#### III.3.1. Les règles générales de la méthode

La méthode est basée sur les règles et les conventions suivantes:

- La variable de l'articulation  $A_j$  notée  $q_j$ .
- Le corps  $j$  est noté  $C_j$ .
- Les corps sont supposés parfaitement rigides, ils sont connectés par des articulations considérées comme idéales (pas de jeu mécanique, pas d'élasticité), rotoïdes ou prismatiques.
- Le repère  $\{R_j\}$  est lié au corps  $C_j$ .
- L'axe  $z_j$  du repère  $\{R_j\}$  est porté par l'axe de l'articulation  $A_j$ .

Dans ce chapitre nous nous intéressons à des robots à chaîne cinématique ouverte simple de  $n$  corps, le premier corps est en liaison avec le bâti et avec le deuxième corps ; le  $k^{\text{ième}}$  corps est en liaison avec le  $(k - 1)^{\text{ième}}$  corps et avec le  $(k+1)^{\text{ième}}$  corps ; le  $n^{\text{ième}}$  corps est en liaison avec le  $(n-1)^{\text{ième}}$  corps. Il comporte

Description géométrique des robots à bras manipulateurs

généralement un organe de préhension qui lui permet d'effectuer une tâche déterminée. Les liaisons entre les différents corps sont à un degré de liberté, liaison pivot (rotoïde) ou liaison glissière (prismatique).

Le repère  $\{R_j\}$  lié au corps  $C_j$  est défini selon les règles et les notations de Denavit- Hartenberg par :

- L'axe  $\mathbf{z}_j$  est porté par l'axe de l'articulation  $A_j$ .
- L'axe  $\mathbf{x}_j$  est porté par la perpendiculaire commune aux axes  $\mathbf{z}_j$  et  $\mathbf{z}_{j+1}$ . Si les axes  $\mathbf{z}_j$  et  $\mathbf{z}_{j+1}$  sont parallèles ou colinéaires, le choix n'est pas unique : des considérations de symétrie ou de simplicité permettent alors un choix rationnel.

Le passage de  $\{R_{j-1}\}$  à  $\{R_j\}$  s'exprime en fonction des quatre paramètres suivants

$\alpha_{j-1}$  : angle entre les axes  $\mathbf{z}_{j-1}$  et  $\mathbf{z}_j$  correspondant à une rotation autour de  $\mathbf{x}_{j-1}$ .

$L_{j-1}$  : distance entre les deux axes  $\mathbf{z}_{j-1}$  et  $\mathbf{z}_j$  le long de  $\mathbf{x}_{j-1}$ .

$\theta_j$  : angle entre les axes  $\mathbf{x}_{j-1}$  et  $\mathbf{x}_j$  correspondant à une rotation autour de  $\mathbf{z}_j$

$r_j$  : distance entre les deux axes  $\mathbf{x}_{j-1}$  et  $\mathbf{x}_j$  le long de  $\mathbf{z}_j$

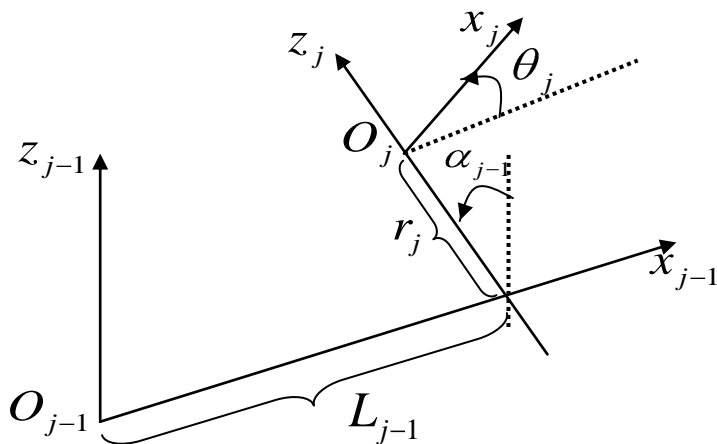


Figure III.1: parametre de Denavit-Hartenberg.

$\mathbf{z}_{j-1}$



**Description géométrique des robots à bras manipulateurs**

La variable articulaire  $q_j$  associée à la  $j^{\text{ième}}$  articulation est soit  $\theta_j$  ou  $r_j$ , selon que l'articulation est de type rotoïde ou prismatique. Ceci se traduit par la relation :

$$q_j = \bar{\sigma}_j * \theta_j + \sigma_j * r_j$$

Avec

$\sigma_j = 0$  si l'articulation  $A_j$  est rotoïde.

$\sigma_j = 1$  si l'articulation  $A_j$  est prismatique.

$$\bar{\sigma}_j = 1 - \sigma_j.$$

La matrice de transformation définissant le repère  $\{R_j\}$  dans le repère  $\{R_{j-1}\}$  est donnée par :

$${}^{j-1}T_j = Rot(x_{j-1}, \alpha_{j-1}) * Trans(x_{j-1}, L_{j-1}) * Rot(z_j, \theta_j) * Trans(z_j, r_j). \Rightarrow$$

$${}^{j-1}T_j = \begin{pmatrix} C\theta_j & -S\theta_j & 0 & L_{j-1} \\ C\alpha_{j-1}S\theta_j & C\alpha_{j-1}C\theta_j & -S\theta_{j-1} & -r_j * S\alpha_{j-1} \\ S\alpha_{j-1}S\theta_j & S\alpha_{j-1}C\theta_j & C\alpha_{j-1} & r_j * C\alpha_{j-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

On remarque que la matrice d'orientation  ${}^{j-1}R_j$  peut être obtenue par :

$${}^{j-1}R_j = Rot(x_{j-1}, \alpha_{j-1}) * Rot(z_j, \theta_j)$$

La matrice de transformation définissant  $\{R_{j-1}\}$  dans  $\{R_j\}$  est donnée par :

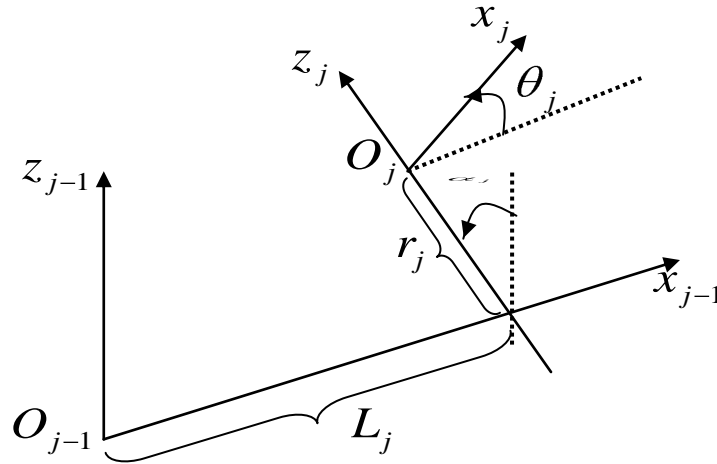
$${}^{j-1}T_j = \begin{pmatrix} {}^jR_{j-1} = ({}^{j-1}R_j)^t & \vdots & -({}^{j-1}R_j)^t \cdot {}^{j-1}P_j \\ \dots & \vdots & \dots \\ 0 & \vdots & 1 \end{pmatrix}$$

Ce paramétrage est largement répandu, pour ne pas dire qu'il est systématiquement adopté dans les modèles géométriques, cinématique et dynamique des bras manipulateurs.

**III.3.2. Autres formes de définition des paramètres de d&h (les paramètres de d&h modifiés) :**

**III.3.2.1 Convention de Khalil-Kleifinger**

Les notions de cette nouvelle convention, conviennent aussi bien pour les chaînes continues ouvertes simples que pour les chaînes complexes arborescentes ou fermées.



**Figure III.2:** paramètre de Khalil-Kleifinger.

La matrice de transformation définissant le repère  $\{R_j\}$  dans le repère  $\{R_{j-1}\}$  est donnée par :

$${}^{j-1}T_j = Rot(x_{j-1}, \alpha_{j-1}) * Trans(x_{j-1}, L_{j-1}) * Rot(z_j, \theta_j) * Trans(z_j, r_j). \Rightarrow$$

$${}^{j-1}T_j = \begin{pmatrix} C\theta_j & -S\theta_j & 0 & L_j \\ C\alpha_j S\theta_j & C\alpha_j C\theta_j & -S\theta_j & -r_j * S\alpha_j \\ S\alpha_j S\theta_j & S\alpha_j C\theta_j & C\alpha_j & r_j * C\alpha_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

III.3.2.2 Convention de Paul

La convention proposée par Paul est aussi basée sur la notation de Denavit et Hartenberg. Dans cette convention la description d'un repère par rapport à un autre est définie par les quatre transformations élémentaires suivantes :

1. une rotation autour de  $\mathbf{z}_{j-1}$  par un angle  $\theta_j$ .
2. une translation le long de  $\mathbf{z}_{j-1}$  par une distance  $r_j$ .
3. une translation le long de  $\mathbf{x}_j$  par une distance  $L_j$ .
4. une rotation autour de  $\mathbf{x}_j$  par un angle  $\alpha_j$ .

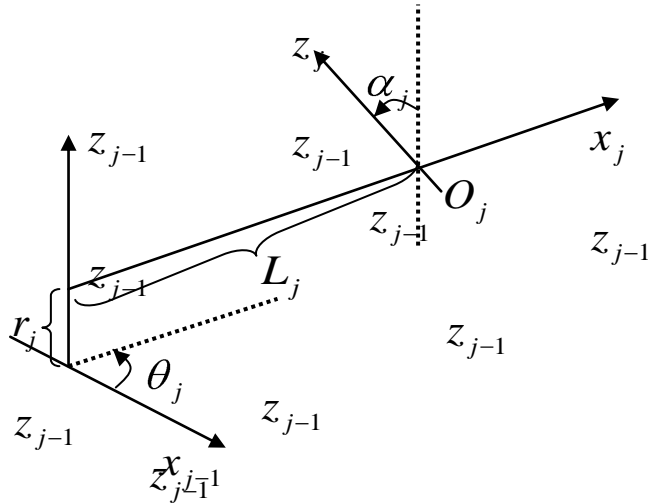


Figure III.3: les paramètres de Paul.

La matrice de transformation définissant le repère  $\{R_j\}$  dans le repère  $\{R_{j-1}\}$  est donnée par :

$${}^{j-1}T_j = Rot(z_{j-1}, \theta_j) * Trans(z_{j-1}, r_j) * Rot(x_j, L_j) * Trans(x_j, \alpha_j). \Rightarrow$$

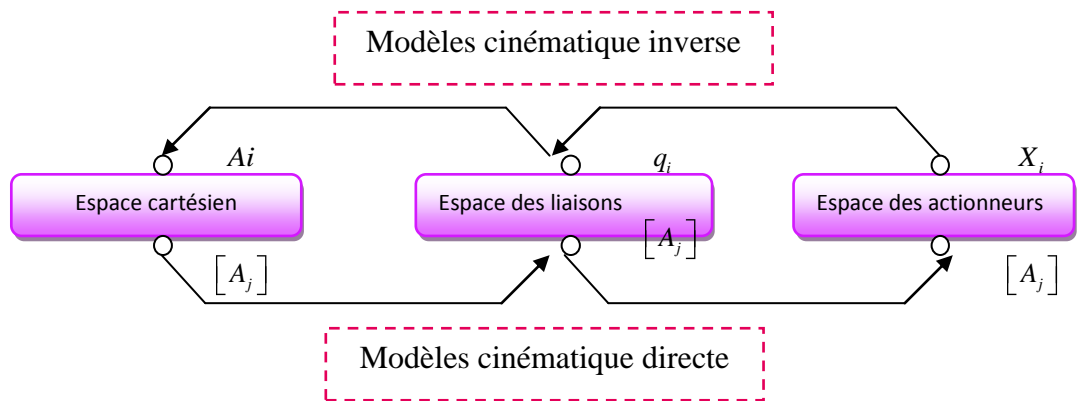
$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} K_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & K_2 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & & K_n \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{bmatrix}$$

III.3.3. Espace de description de la cinématique des robots

Trois espaces de description de la cinématique des robots :

- Espace cartésien (espace opérationnel, espace des tâches).
- Espace des liaisons (ou des variables articulaires)
- Espace des actionneurs.

Les trois espaces sont entièrement liés



Dans la majorité des cas la relation entre l'espace des actionneurs et l'espace des variables articulaires est simple

$$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} K_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & K_2 & & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & & K_n \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \end{bmatrix}$$

Avec :

$K_i$  : Rapport de transformation du réducteur de l'articulation  $A_i$ .

$\lambda_i$  : Offsets codeurs.

III.4. MODELE GEOMETRIQUE INVERSE

Le modèle géométrique inverse (MGI) est l'ensemble des relations inverses à celles du modèle direct. Ce modèle permet d'exprimer les variables articulaires  $\mathbf{q}$  du bras manipulateur en fonction des coordonnées opérationnelles  $\mathbf{X}$  exigées pour l'exécution d'une tâche donnée.

$$q = F^{-1}(X)$$

Il n'existe pas une méthode analytique générale qui permet de résoudre le MGI. Cependant un certain nombre de méthodes, adaptées à des classes de cinématiques particulières permettent de traiter le problème :

#### **III.4.1. La méthode de Pieper**

Elle est adaptée aux bras manipulateurs à six degrés de liberté possédant trois articulations rotoïde d'axes concourants ou trois articulations prismatiques. Elle est largement utilisée car la quasi-totalité des bras manipulateurs possèdent un poignet à 3 axes concourants.

#### **III.4.2. La méthode de Paul**

Elle laisse à l'utilisateur le choix des équations à résoudre, est applicable à un grand nombre de cinématiques des robots.

Elle traite séparément chaque cas particulier et convient pour la plupart des bras manipulateurs industriels. C'est une méthode heuristique qui n'admet pas une procédure déterministe.

#### **III.4.3. méthode de LEE**

Permet de donner le modèle géométrique inverse des robots à six degrés de liberté sous forme d'un polynôme de degré 16.

#### **III.4.4. La méthode de Raghavan et Roth**

Donne la solution pour un robot 6R à partir d'un polynôme caractéristique de degré 16 (16 solutions), qu'on résout en utilisant une méthode baptisée élimination dialytique.

**III.4.5. Les méthodes numériques**

La transformation des coordonnées peut être obtenue par des procédures numériques, par itérations successives (résolution d'un système d'équations non linéaires).

Sur le plan pratique, le modèle géométrique inverse présente un intérêt indéniable aussi bien pour les bras manipulateurs programmés par apprentissage que pour ceux programmés par langage de haut niveau. Il permet de transcrire les besoins de positionnement et d'orientation de l'effecteur face à une tâche donnée dans le système des variables articulaires utilisés par la commande. Pour les bras manipulateurs utilisés en mode apprentissage, le modèle géométrique inverse permet de préparer le travail de l'opérateur en dégageant par simulation les configurations optimales qui permettent d'atteindre les points d'arrêt nécessaires au besoin de la tâche. Il facilite ainsi le travail de l'opérateur qui est guidé dans sa tâche d'apprentissage. En effet on admet facilement qu'il n'est pas aisé d'amener un bras manipulateur à six degrés de libertés sur une position exigée de l'effecteur par des actions discrètes sur les différents moteurs agissant sur les liaisons. La préparation du travail par la résolution du (MGI) assure par ailleurs une optimisation des déplacements articulaires entre les points d'une tâche désirée.

${}^f T_E$  : La matrice de transformation du repère effecteur au repère atelier donnée par :

$${}^f T_E = {}^f T_0 \cdot {}^0 T_n \cdot {}^n T_E$$

${}^f T_E^d$  : La matrice de transformation homogène qui représente la situation finale désirée du repère effecteur par repère atelier, donnée par :

$${}^f T_E^d = {}^f T_E = {}^f T_0 \cdot {}^0 T_n \cdot {}^n T_E.$$

${}^fT_0$  et  ${}^nT_E$  : matrice de transformations fixes ne dépendent pas de la configuration du robot.

En regroupant à droite les termes connus, on a alors la relation :

$$U_0 = {}^0T_n = {}^0T_f \cdot {}^fT_E \cdot {}^E T_n$$

Le problème consiste à trouver les variables articulaires pour que  ${}^0T_n$  soit égal à  $U_0$ .

### III.5.MODELE GEOMETRIQUE INVERSE POUR DES CINEMATIQUES PARTICULIERES

#### III.5.1.Robot possédant plus de six degrés de liberté :

Lorsqu'un robot possède plus de six degrés de liberté, le système à résoudre contient plus d'inconnues que de paramètres décrivant la tâche. Il manque (n-6) relations pour pouvoir le résoudre. Deux stratégies sont possibles :

- **La première** consiste à fixer (n-6) articulations, on se ramène alors au problème à six degrés de liberté. Le choix de ces articulations est dicté par les spécifications de la tâche et par la morphologie du robot. On peut en suite reconfigurer le robot autour des valeurs obtenues en vue de satisfaire des critères d'optimisation supplémentaires.
- **La deuxième** stratégie consiste à introduire (n-6) relations supplémentaires décrivant la redondance.

#### III.5.2.Robots possédant moins de six degrés de liberté

Pour les robots comportant moins de six degrés de liberté, l'espace accessible du robot est de dimension inférieure à six. Il n'est pas possible de faire coïncider le repère  $\{R_E\}$  lié à l'outil avec le repère  $\{R_E\}^d$  qui décrit la tâche, définie par la transformation  ${}^fT_E^d$ , sauf lorsque les repères  $\{R_E\}$  et  $\{R_E\}^d$  sont conditionnés de façon bien particulière pour s'adapter au manque de degrés de liberté. On est alors amené à résoudre un système de six équations

à  $n$  inconnues avec  $n < 6$ . On parlera dans ce cas de liaison repère sur repère.

Lorsque ce type de liaisons n'est pas réalisable, on peut réduire le nombre d'équations en ne considérant que certains éléments des repères  $\{R_E\}$  et  $\{R_E\}^d$  : on essaie de rechercher alors des liaisons telle que point sur point (3 équations), droite sur droite (4 équations), ou point droite sur point droite (5 équations).

### **III.6.MODELE CINEMATIQUE DIRECTE**

La modélisation cinématique c'est la modélisation qui permet d'exprimer la cinématique de l'organe terminal (vitesses et accélérations opérationnelles) en fonction de la cinématique de la configuration articulaire (vitesses et accélérations articulaires) du bras manipulateur et inversement, on distingue :

- Le modèle cinématique direct.
- Le modèle cinématique inverse.
- Le modèle cinématique direct du second ordre.
- Le modèle cinématique inverse du second ordre.

#### **III.6.1.Le modèle cinématique direct**

Le modèle cinématique (différentiel) direct exprime les vitesses de translation et d'orientation de l'effecteur  $\dot{\mathbf{X}}$  d'un bras manipulateur (les variations élémentaires  $d\mathbf{X}$  des coordonnées opérationnelles) en fonction des vitesses articulaires  $\dot{q}$  (des variations élémentaires  $dq$  des coordonnées articulaires), il est noté:

$$\dot{\mathbf{X}} = J(q) * \dot{q}$$

Avec 
$$\dot{\mathbf{X}} = [V_E, w_E]^T, \dot{q} = [\dot{q}_1 \quad \dot{q}_2 \quad \dots \quad \dot{q}_n]^T$$



**Description géométrique des robots à bras manipulateurs**

Où  $J(q)$  désigne la matrice Jacobienne de dimension  $(m \times n)$  du bras manipulateur, égale à  $\frac{\partial X}{\partial q}$  et fonction des variables articulaires  $q$ .

L'intérêt du calcul de la matrice Jacobienne, est multiple :

- a) En statique, on utilise le Jacobien pour établir la relation liant les efforts exercés sur l'organe terminal aux forces et couples des actionneurs.
- b) En cinématique, on utilise la matrice Jacobienne pour établir les relations liant les vitesses opérationnelles aux vitesses articulaires.
- c) Elle facilite le calcul des singularités et de dimension de l'espace opérationnel accessible au robot.

**III.6.2. Le JACOBIEN de base**

Le calcul de la matrice Jacobienne peut être mené de plusieurs façons :

III.6.2.1. Par dérivation du modèle géométrique direct

Une première méthode consiste à calculer les éléments du vecteur vitesse opérationnel  $\dot{X}$ , par dérivation par rapport au temps des éléments du vecteur des coordonnées opérationnelles  $X$ , obtenus par le modèle géométrique direct :

$$X = F(q)$$

Avec  $F(q) = F_1(q) \quad F_2(q) \quad \dots \quad F_m(q)$

$$\Rightarrow \frac{dX}{dt} = \left[ \frac{\delta F_1(q)}{\delta q_1} \cdot \frac{dq_1}{dt} + \frac{\delta F_1(q)}{\delta q_2} \cdot \frac{dq_2}{dt} + \frac{\delta F_1(q)}{\delta q_n} \cdot \frac{dq_n}{dt} \dots \dots \dots \right]$$

$$\left[ \frac{\delta F_m(q)}{\delta q_1} \cdot \frac{dq_1}{dt} + \frac{\delta F_m(q)}{\delta q_2} \cdot \frac{dq_2}{dt} + \dots + \frac{\delta F_m(q)}{\delta q_n} \cdot \frac{dq_n}{dt} \right]$$

En mettant ce système sous forme matricielle et en l'identifiant à la relation on obtient l'expression suivante :

$$\frac{dX}{dt} = \dot{X} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1 q}{\partial q_1} & \frac{\partial F_1 q}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial F_1 q}{\partial q_n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial F_m q}{\partial q_1} & \frac{\partial F_m q}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial F_m q}{\partial q_n} \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow \dot{X} = [J_n] \cdot \begin{bmatrix} \dot{q} \end{bmatrix} \text{ avec } J_{ij} = \left. \frac{\partial F_i}{\partial q_j} \right|_{\substack{i=1\dots m \\ j=1\dots n}}$$

### III.6.2.2. En utilisant les lois de composition des vitesses

Dans une seconde méthode le calcul du vecteur vitesse  $\dot{X}$  de l'organe terminal s'effectue en utilisant une formulation récurrente (minimisation du temps de calcul et génération automatique des équations nécessaires) basée sur le théorème de composition des vitesses ; par la suite on déduit le Jacobien de la relation matricielle suivante :

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} V_n \\ w_n \end{bmatrix} = [J_n] \cdot \begin{bmatrix} \dot{q} \end{bmatrix}$$

Où

$V_n$  : le vecteur vitesse de l'organe terminal relativement au repère  $\{R_0\}$

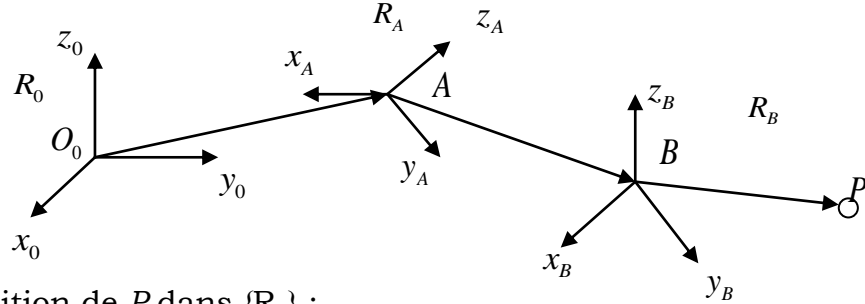
$w_n$  : le vecteur vitesse de rotation instantanée de l'organe terminal relativement au repère  $\{R_0\}$

On exprime en général  $V_n$  et  $w_n$  soit dans le repère  $\{R_n\}$ , ou dans le repère  $\{R_0\}$ .

La matrice Jacobienne correspondante est notée  ${}^n[J_n]$  ou  ${}^0[J_n]$  respectivement.

**a. Théorème de composition des vitesses**

Etant donnés trois repères  $\{R_A\}$ ,  $\{R_B\}$  et  $\{R_0\}$  ( $\{R_0\}$  un repère fixe), et un point  $P$  dans l'espace



La position de  $P$  dans  $\{R_0\}$  :

$$\overline{O_0P} = \overline{OA} + \overline{AB} + \overline{BP}$$

La vitesse absolue du point  $P$  :

$$V_p = \frac{d^0 \overline{O_0P}}{dt} = \frac{d^0 \overline{OA}}{dt} + \frac{d^0 \overline{AB}}{dt} + \frac{d^0 \overline{BP}}{dt}$$

Soit

$\Omega_{R_A/R_0}$  La vitesse de rotation instantanée du repère  $\{R_A\}$

relativement au repère  $\{R_0\}$ .

$w_A = \Omega_{R_A/R_0}$  La vitesse de rotation instantanée du repère  $\{R_B\}$

relativement au repère  $\{R_0\}$ .

En appliquant la loi de composition des vitesses :

$$w_A = \Omega_{R_A/R_0} \frac{d^0 \overline{AB}}{dt} = \frac{d^A \overline{AB}}{dt} + w_A \wedge \overline{AB}$$

$$w_B = \Omega_{R_B/R_A} + \Omega_{R_A/R_0} \frac{d^0 \overline{AB}}{dt} = \frac{d^A \overline{AB}}{dt} + w_B \wedge \overline{AB}$$

Ou :  $w_A$  et  $w_B$  sont le vitesse de rotation instantanée des repères  $\{R_A\}$  et  $\{R_B\}$  relativement au repère  $\{R_0\}$ .

## CHAPITRE III

### Description géométrique des robots à bras manipulateurs

On s'intéresse uniquement aux origines des repères :

Repère  $\{R_0\}$  :

$$w_0 = \Omega_{R_0/R_0} = \vec{0} \quad V_0 = \frac{d^0 \overrightarrow{O_0 O_0}}{dt} = \vec{0}$$

Repère  $\{R_A\}$  :

$$w_A = \Omega_{R_A/R_0} \quad V_A = \frac{d^0 \overrightarrow{O_0 A}}{dt}$$

Repère  $\{R_B\}$  :

$$w_B = \Omega_{R_A/R_0} + \Omega_{R_B/RA} = w_A + \Omega_{R_B/RA}$$

$$V_B = \frac{d^0 \overrightarrow{O_0 A}}{dt} + \frac{d^A \overrightarrow{AB}}{dt} + w_A \wedge \overrightarrow{AB} = V_A + \frac{d^A \overrightarrow{AB}}{dt} + w_A \wedge \overrightarrow{AB}$$

Soit :

$$\Omega_{R_B/RA} = \dot{\theta}_B \cdot z_B$$

$$\left. \begin{aligned} \overrightarrow{AB} = {}^A P_B \Rightarrow \frac{d^A \overrightarrow{AB}}{dt} = {}^A \dot{P}_B \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\left\{ \begin{aligned} w_B &= w_A + \dot{\theta}_B \cdot z_B \\ V_B &= V_A + {}^A \dot{P}_B + w_A \wedge {}^A P_B \end{aligned} \right.$$

$$\left\{ \begin{aligned} {}^B w_B &= {}^B R_A \cdot {}^A w_A + \dot{\theta}_B \cdot z_B \\ {}^B V_B &= {}^B R_A ({}^A V_A + {}^A \dot{P}_B + {}^A w_A \wedge {}^A P_B) \end{aligned} \right.$$

#### **b. Expression de la vitesse d'un point $p$ du corps $C_i$**

En appliquant le théorème de composition des vitesses :

$$V_{P \in C_i}^0 = V_{P \in C_i}^i + V_i + w_i \wedge \overrightarrow{O_i P}$$

Le corps  $C_i$  du bras manipulateur est un corps rigide  $\Rightarrow V_{P \in C_i}^0 = \vec{0}$

$$V_{P \in C_i}^0 = V_i + w_i \wedge \overrightarrow{O_i P} \text{ avec } \left\{ \begin{aligned} V_i &= \sum_{j=1}^i \overline{\sigma}_j \cdot \dot{q}_j \cdot z_j \wedge {}^j P_j \cdot \dot{q}_j \cdot z_j \\ w_i &= \sum_{j=1}^i \overline{\sigma}_j \cdot \dot{q}_j \cdot z_j \end{aligned} \right.$$

$$\Rightarrow V_{P \in C_i}^0 = \sum_{j=1}^i \overline{\sigma}_j \cdot \dot{q}_j \cdot z_i \wedge \overline{O_i P} + \sigma_j \cdot \dot{q}_j \cdot z_i \quad [15]$$

### III.7. CONCLUSION

Nous, avons dans ce chapitre, montré comment calculer les matrices de transformations homogènes associées à quelques représentations usuelles de la situation d'un corps dans l'espace. Nous avons aussi donné les expressions inverses permettant de calculer les paramètres de ces représentations en fonction des coordonnées homogènes. Nous avons présenté les méthodes de description géométrique, cinématique les plus utilisées en robotique. A la fin nous avons exposé la méthode explicite de calcul du modèle géométrique, cinématique direct et les deux méthodes de calcul du modèle géométrique inverse.

Le chapitre suivant traitera de l'état de l'art sur la planification de trajectoire en robot humanoïde par champs de potentiel.

# CHAPITRE

## IV

#### IV.1.INTRODUCTION

Dans le présent chapitre nous parlerons du principe de la planification de trajectoire par champs de potentiel et nous donnons un état de l'art des travaux précédent.

#### IV.2.METHODE DU CHAMP DE POTENTIELS

La méthode des champs de potentiel est bien connue comme outil pour la navigation des robots mobiles. Cette méthode est très intuitive, elle est efficace dans le sens où elle permet de contrôler la vitesse du robot pour qu'il atteigne sa position finale, et ce, relativement facilement, en additionnant les différents effets intervenant sur le robot.

##### IV.2.1.Historique

La méthode du potentiel a été initialement introduite par Oussama. Khatib [19] pour des robots manipulateurs. Elle diffère sensiblement des autres méthodes, car elle ne résulte pas d'un raisonnement purement géométrique. Par ailleurs, elle est peu satisfaisante en termes de planification, parce qu'elle n'est pas complète, ce qui signifie qu'il peut exister une solution sans que l'algorithme ne la trouve. Ceci étant, elle fournit une technique de navigation simple et compatible avec les exigences du temps réel.

##### IV.2.2.Principe de la méthode

Elle permet de considérer les robots comme des points sous l'influence d'un champ de potentiel artificiel. Celui-ci est créé par l'ensemble des objets présents sur le terrain (les murs, le robot, les obstacles et le point but (**B**)). Ce concept engendre un mouvement pour le robot qui est semblable à celui d'une balle qui dévalerait une colline en évitant les divers obstacles qui se présenteraient sur sa route (**O**<sub>1</sub> & **O**<sub>2</sub>). Ainsi, l'objectif (point but (**B**)) du robot sera modélisé par une force attractive (**F**<sub>A</sub>), alors que les obstacles sur le

## Chapitre IV

### Planification de trajectoire par champs de potentiel en robotique humanoïde

terrain seront caractérisés par une force répulsive ( $\mathbf{F}_{R1}$  &  $\mathbf{F}_{R2}$ ); De même, les bords du terrain joueront le rôle d'obstacles (force répulsives) vis-à-vis du robot.

Afin de déterminer le potentiel en un point, il faut établir le rôle de chaque objet sur le terrain, sommer ponctuellement l'effet de chacun, et finalement transformer cet effet en une force ( $\mathbf{F}_B$ ) qui sera celle qui agira sur le robot et le fera bouger selon une direction bien précise.

Vous retrouvez dans la figure 100 un schéma explicatif du principe

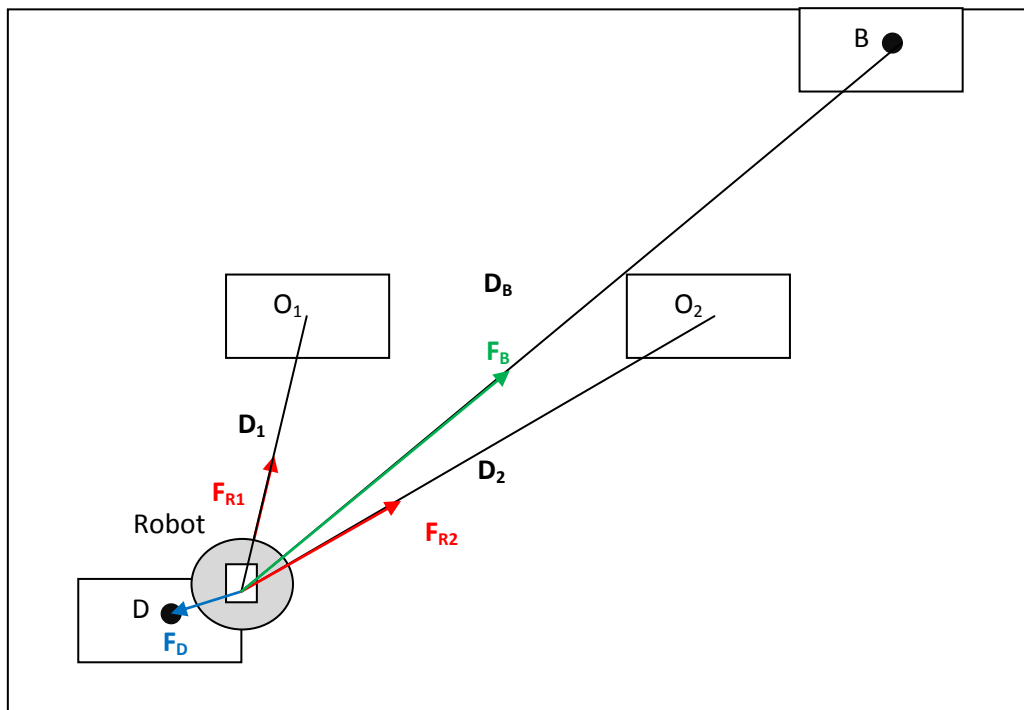


Figure IV.1 : Principe de la méthode champ de potentiel.

$F_B = D_B$  : force d'attraction du but

$F_{R1} = 1/D_1$  : force de répulsion de l'obstacle 1

$F_{R2} = 1/D_2$  : force de répulsion de l'obstacle 2

$F_D = 1/D$  : force de répulsion de point de départ



**Planification de trajectoire par champs de potentiel en robotique humanoïde**

Dans notre étude théorique, on ne travaillera plus avec un champ de potentiels  $U$  mais avec un champ de force  $F$ , la force étant obtenue en prenant le gradient du potentiel.

$$F(p) = -\nabla U(p) \text{ Avec } P(x, y) \text{ et } \nabla U(p) = \begin{bmatrix} \frac{\partial U}{\partial x} \\ \frac{\partial U}{\partial y} \\ \frac{\partial U}{\partial z} \end{bmatrix}$$

Il est plus simple de travailler directement en terme de forces que de dériver le potentiel ; les propriétés d'addition restant vraies. Les temps de calculs s'en trouvent ainsi accélérés.

**IV.3.LES DIFFERENTS CHAMPS**

**IV.3.1.Champ de forces circulaire autour des robots**

Chaque obstacle génère autour de lui un champ de force répulsif qui incite le robot à l'éviter. La nécessité d'obtenir une force qui soit faible loin du robot mais de plus en plus forte quand on s'approche de ce dernier débouche sur le choix d'un modèle en  $1/x$ .

$$F_{obstacle} = \begin{cases} k_1 \frac{(k_2 - \text{distance}(\text{robot}; \text{obstacle}))}{\text{distance}(\text{robot}; \text{obstacle})} & \text{si } \text{distance}(\text{robot}; \text{obstacle}) < 50 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$\text{avec : } \begin{cases} k_1 = 25 \\ k_2 = 80 \end{cases}$$

**IV.3.2.Champ de forces linéaire aux bords du terrain**

Les bords du terrain engendrent une force de répulsion qui leur est perpendiculaire. Par souci de simplicité et aussi de temps de calcul, un modèle linéaire a été choisi.

$$f_{bord} = \begin{cases} -k_3 \text{distance}(\text{robot}; \text{bord}) + h & \text{si } \text{distance}(\text{robot}; \text{bord}) < R_0 \\ 0 & \text{si non} \end{cases}$$

### IV.3.3. Champ de forces du à l'objectif

Le robot est attiré par son objectif. Cette fois, la force est attractive. Le modèle de la force est linéaire et s'amplifie avec l'éloignement du robot vers le point bu.

$$f_{goal} = \begin{cases} -k_4 \cdot \text{distance}(\text{robot}; \text{goal}) & \text{si } \text{distance}(\text{robot}; \text{goal}) < \text{max} \\ -k_4 & \text{sinon} \end{cases}$$

### IV.3.4. Champ de forces tournant

Autour de l'objectif (le point but), un champ de force tournant oblige le robot à se placer du bon côté de celui-ci.

Le principe de fonctionnement de ce champ est le suivant :

De part et d'autre de l'objectif, nous créons deux tourbillons V1 et V2 qui auront pour rôle d'entraîner le robot dans sa course.

La somme des effets de chaque tourbillon engendre une force qui guide le robot vers son objectif.

La réalisation du champ tournant est faite de la façon suivante :

Une force inversement proportionnelle à la distance entre le robot et chaque tourbillon est calculée ; on obtient F1 et F2.

F1 subit une rotation de  $-90^\circ$ , on obtient  $F1^\perp$ , tandis que F2 subit une rotation de  $+90^\circ$  et donne  $F2^\perp$ .

La force totale résultante est obtenue en sommant  $F1^\perp$  et  $F2^\perp$ , on obtient  $F_{rot}$ .

Afin de donner au robot le comportement souhaité, la somme du champ de forces tournant et du champ de forces du à l'objectif est en permanence effectuée.

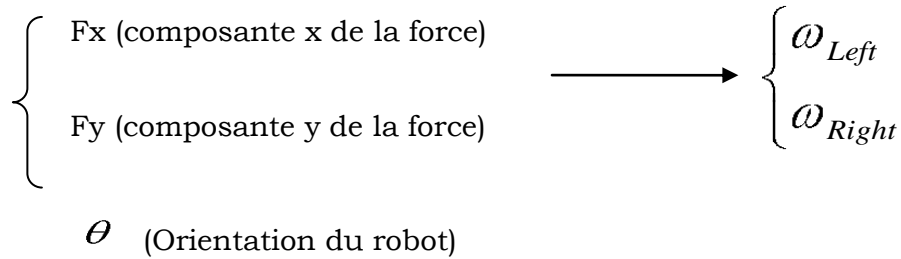
La somme de cette différente force (attractive, répulsive et tournante) induit un comportement pour le robot qui est fonction

**Planification de trajectoire par champs de potentiel en robotique humanoïde**

de son environnement et de son objectif. Le passage de la force aux mouvements du robot s'effectue selon le procédé suivant :

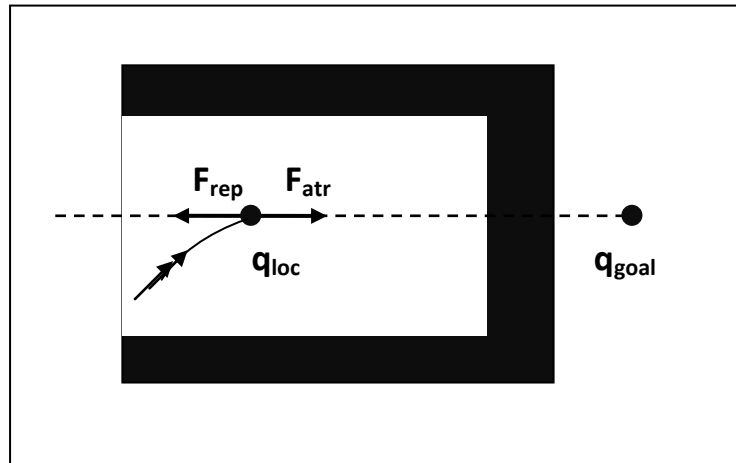
Entrée

Sortie



**IV.4.INCONVENIENT DE LA METHODE**

Le champ de forces est un outil puissant mais sa grande faiblesse est qu'il entraine des problèmes de minima locaux comme c'est le cas dans la figure ci-dessous :



**Figure IV.2:** Exemple de minimum local.

Ce problème est une cause sérieuse de l'inefficacité dans des méthodes potentielles. Il est au sujet de la possibilité à coller dans un minimum local de la fonction potentielle différente du configuration de but.

## Chapitre IV

### Planification de trajectoire par champs de potentiel en robotique humanoïde

Dans cette configuration (endroit de  $q$  le robot est fermé à clef tout le temps en même position, parce que la force d'attraction et de répulsion sont équivalentes mais avec la direction opposée ,c'est pourquoi toute la force résultante est égale à zéro et le robot ne peut pas changer en une autre position ).

#### IV.4.1.GESTION DES MINIMA LOCAUX

Il y a différentes manières de s'échapper d'un minimum local, mais il est possible de trouver trois différentes approches : le premier essaye de s'échapper avec les mouvements aléatoires, mais il est non accordé pour être réussi ; le second emploie des fonctions d'un potentiel avec seulement un seul minimum (le but à ; le dernier emploie des structures et des mécanismes pour retourner dans le chemin et prennent une autre direction. [16]

#### IV.5.SYNTHESE DES TRAVAUX PRECEDENTS

Les grands laboratoires en robotique ont utilisé la méthode de planification de trajectoire par champs de potentiel pour les robots humanoïdes car elle présente des avantages par rapport à d'autres méthodes.

La méthode de champs de potentiels pour la planification des robots humanoïdes a été choisie pour la planification du robot humanoïde franco-japonaise HRP-2 [17] le robot QRIO [18] le robot Nao [19] et le robot iCub [20] dans un environnement connu.

#### IV.6.CONCLUSION

Il y a de nombreuses méthodes pour résoudre le problème de la navigation d'un robot mobile dans un milieu connu. Cependant, il existe deux approches qui fournissent une solution au problème de planification : Approche globale et approche locale.

## Chapitre IV

### Planification de trajectoire par champs de potentiel en robotique humanoïde

La méthode des potentiels a été proposée à l'origine pour l'évitement d'obstacles en temps réel pour les manipulateurs. Le point représentant le robot dans l'espace des configurations est vu comme une particule au sein d'un champ de potentiels. La configuration finale a un potentiel attractif tandis que les obstacles ont un potentiel répulsif.

Pour une configuration donnée, l'opposé du gradient du potentiel total permet de calculer une force fictive appliquée au robot, dont la direction est considérée comme la plus prometteuse. L'intérêt de cette formulation est que le potentiel répulsif des obstacles est conçu pour s'annuler à une certaine distance des obstacles, traduisant l'idée intuitive que les obstacles lointains n'ont pas d'influence sur la trajectoire (d'où le nom de méthodes « locales » parfois donné à cette classe d'algorithmes).

Le principal problème est celui du minimum local : la méthode consiste essentiellement à suivre la plus grande pente, et le robot peut se trouver attiré par un minimum local différent de l'objectif (l'oscillation entre deux positions étant une autre possibilité).

Nous avons choisi la méthode de champs de potentiel pour la planification de notre prototype pour plusieurs raisons.

- Nous avons déjà pris des notions de base la concernant dans l'année théorique.
- Elle avait été initialement conçue pour les bras manipulateurs sachant que le robot humanoïde est composé d'un ensemble de ces bras.
- Nous avons pu constater dans notre recherche bibliographique en état de l'art que les grands laboratoires en robotique humanoïdes l'ont utilisé.

Le chapitre suivant sera un chapitre consacré aux résultats et simulations des deux parties de notre mémoire : la modélisation et la planification de robot RH-ARP.

# CHAPITRE

v

## **V.1.INTRODUCTION**

Construire un robot peut sembler un peu banal plutôt que de exotique, mais il est loin d'être anodin puisque de nombreuses technologies doivent être impliqués.

Dans la cinématique, la convention DH a été utilisé pour analyser le mouvement du robot et d'obtenir son expression analytique. Une difficulté de l'analyse de la cinématique d'un robot, c'est que la gestion de ses formules devient pénible que le degré de liberté augmente. Il est lourd à vérifier la correction des formules, même en utilisant des manipulateurs symboliques. Par conséquent, l'animation pourrait être une méthode complémentaire.

Bien que l'avantage d'utiliser l'animation en cinématique est indéniable, il ne peut pas faire confiance jusqu'à ce que le robot est réellement bâtie à cause de certains détails peuvent ne pas être à notre disposition à l'avance. En d'autres termes, la robotique est diversifiée dans sa nature. Dans ce chapitre nous avons présenté la cinématique, la planification et l'animation dans la construction d'un robot humanoïde supérieure.

# LA MODELISATION

## V.1. MODELISATION GEOMETRIQUE DU RH-ARP

Comme nous avons parlé dans le chapitre 4 La modélisation géométrique permet d'exprimer la situation de l'organe terminal en fonction de la configuration du mécanisme et inversement, on distingue deux modèles.

- Modèle géométrique direct.
- Modèle géométrique inverse.

### V.1.1. Modèle géométrique direct du RH-ARP

Dans la figure suivante nous montrerons la représentation du robot humanoïde par la méthode D-HM.

Nous avons considéré la main droite et le pied gauche comme une seule chaîne articulaire simple.

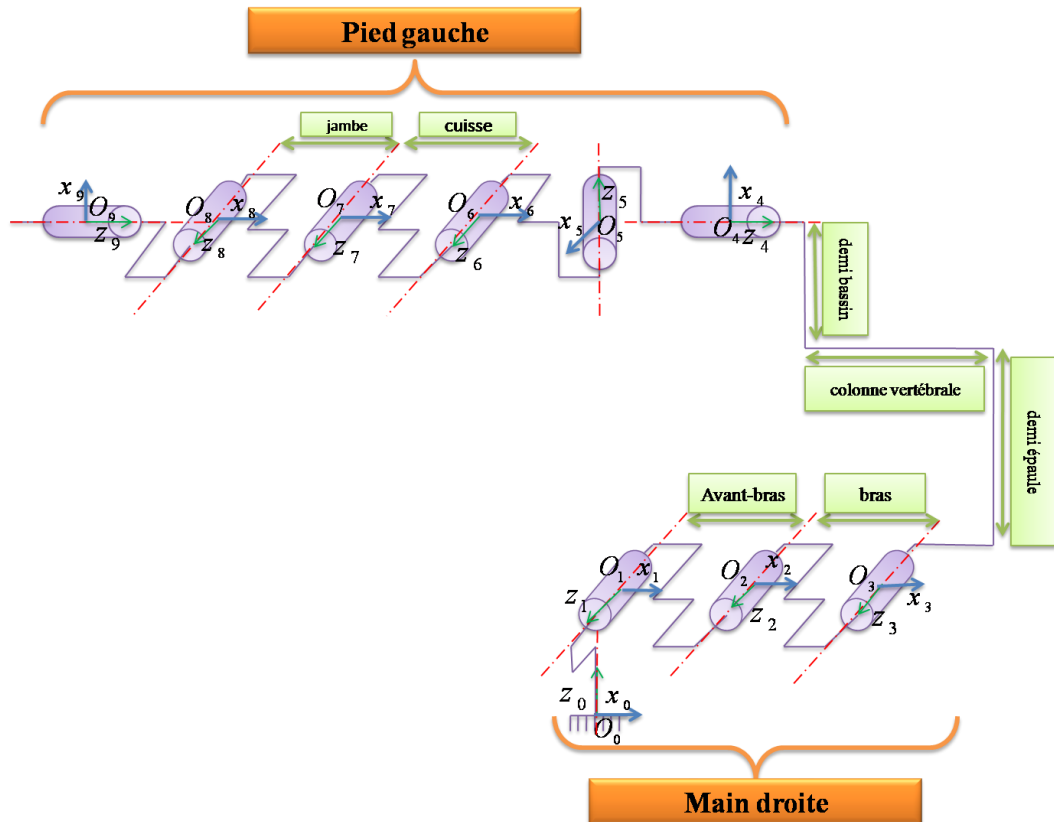


Figure V.1: Représentation géométrique du RH-ARP.



**Chapitre V**  
**Résultats et simulations**

---

La modélisation géométrique directe du robot **RH-ARP** est réalisée en utilisant les translations homogènes, selon la méthode de Denavit-Hartenberg

**V.1.2. Tableau de Denavit-Hartenberg**

**Tableau V.1:** Paramètres de Denavit-Hartenberg.

Articulation Paramètre	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\sigma_i$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\alpha_{i-1}$	$\pi/2$	0	0	0	$\pi/2$	$\pi/2$	0	0	$\pi/2$
$a_{i-1}$	0	$a_1$	$a_2$	0	0	0	$a_7$	$a_8$	0
$\Theta_i$	$\Theta_1$	$\Theta_2$	$\Theta_3$	$\Theta_4$	$\Theta_5$	$\Theta_6$	$\Theta_7$	$\Theta_8$	$\Theta_9$
$r_i$	0	0	0	0	0	0	0	0	0

$\sigma_i$  : Type d'articulation ,0 si l'articulation est rotoïde et 1 si elle est prismatique.

$\alpha_{i-1}$  : Angle entre  $z_{i-1}$  et  $z_i$  autour de  $x_{i-1}$ .

$a_{i-1}$  : Distance entre  $z_{i-1}$  et  $z_i$  autour de  $x_{i-1}$ .

$\Theta_i$  : Angle entre  $x_{i-1}$  et  $x_i$  autour de  $z_i$ .

$r_i$  : Distance entre  $x_{i-1}$  et  $x_i$  autour de  $z_i$ .

A partir du tableau et compte tenu de la matrice de passage élémentaire de Denavit-Hartenberg, on écrit les matrices des transformations homogènes  $T_i^{i-1}$  :

**V.1.3. Les matrices**

$$\left. \begin{aligned}
 T_1^0 &= \begin{pmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 T_2^1 &= \begin{pmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & a_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 T_3^2 &= \begin{pmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & a_3 \\ S_3 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow T_3^0 = T_1^0 * T_2^1 * T_3^2$$

$$T_3^0 = \begin{pmatrix} C_1 C_{2+3} & -C_1 C_{2+3} & S_1 & C_1(a_7 + a_8 C_2) \\ S_1 S_{2+3} & -S_1 S_{2+3} & -C_1 & S_1(a_7 + a_8 C_2) \\ S_{2+3} & C_{2+3} & 0 & a_8 S_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Nous possédons

$$C_i = \cos(\theta_i)$$

$$S_i = \sin(\theta_i)$$

Sachant que

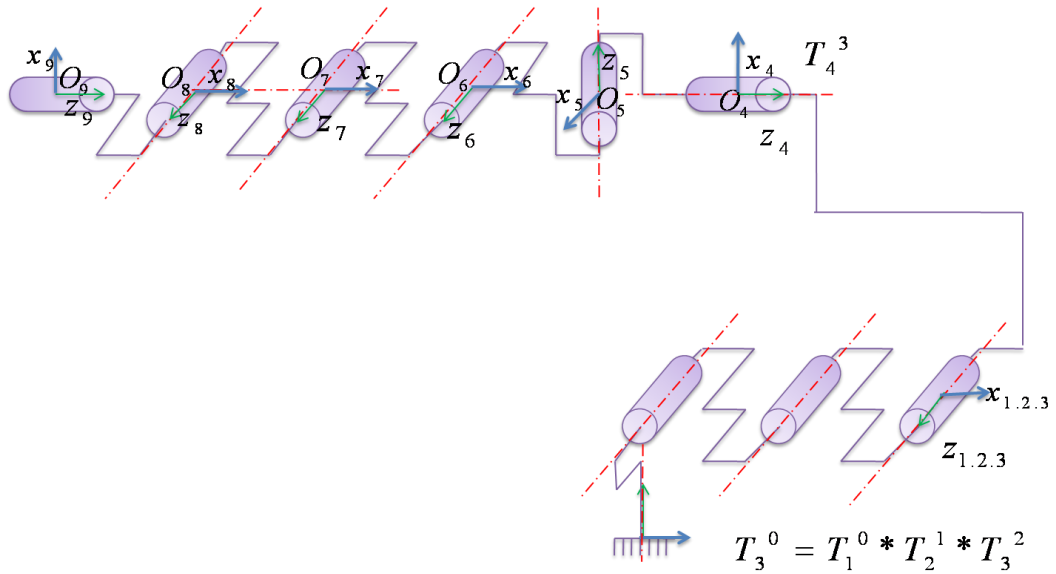
$$C_{i+j} = \cos(\theta_i) \cos(\theta_j) - \sin(\theta_i) \sin(\theta_j)$$

$$S_{i+j} = \cos(\theta_i) \sin(\theta_j) + \sin(\theta_i) \cos(\theta_j)$$

Dans le **la figure V.1** nous avons la matrice de transformation homogène  $T_3^0$  qui est la multiplication des matrices  $T_1^0$   $T_2^1$   $T_3^2$ .

Comment pouvons-nous passer mathématiquement de la matrice  $T_3^0$  à la matrice  $T_3^4$  ?

**Chapitre V**  
**Résultats et simulations**



**Figure V.2 :** Représentation de changement de repère.

Nous voyons bien que nous avons une longueur assez importante non négligeable de l'épaule, de la colonne vertébrale et de demi-bassin (revoir **figure V.1**). Comme nous avons aussi une rotation des axes  $\mathbf{x}$  et  $\mathbf{z}$ , le vecteur  $\mathbf{x}_{1.2.3}$  vers la droite et le vecteur  $\mathbf{x}_4$  vers le haut, le vecteur  $\mathbf{z}_{1.2.3}$  vers le bas et le vecteur  $\mathbf{z}_4$  vers la droite.

Nous concluons qu'on doit multiplier la matrice  $T^0_3$  par une telle matrice de translation et une autre de rotation.

A partir de **la figure V.10** du **chapitre III** nous avons dimensionné notre robot humanoïde et nous avons obtenu une longueur de l'épaule égale à 22 cm, à 50 cm pour la colonne vertébrale et de 32 cm Pour le demi-bassin.

Donc nous obtenons la matrice de translation

$$L = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & X \\ 0 & 1 & 0 & Y \\ 0 & 0 & 1 & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 22 \\ 0 & 1 & 0 & 50 \\ 0 & 0 & 1 & 32 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

L'angle de rotation du vecteur  $\mathbf{x}_{1.2.3}$  au vecteur  $\mathbf{x}_4$  est égal à  $90^\circ$   
La matrice de transformation de rotation autour des axes principaux est défini par :

$$ROT = rot(x, \theta) * rot(y, \theta) * rot(z, \theta)$$

$$A=rot(x, \theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$B=rot(y, \theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$C=rot(z, \theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

*La matrice de rotation*

$$R=A*B*C$$

$$R = \begin{pmatrix} \cos^2\theta & -\cos\theta*\sin\theta & \sin\theta & 0 \\ \cos\theta*\sin^2\theta + \cos\theta*\sin\theta & \cos\theta^2 - \sin^3\theta & -\cos\theta*\sin\theta & 0 \\ \sin\theta^2 - \cos\theta^2*\sin\theta & \cos\theta*\sin^2\theta + \cos\theta*\sin\theta & \cos\theta^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Nous avons pu comprendre que nous avons une multiplication par la matrice de translation et une matrice de rotation mais laquelle en premier ? Comme nous savons tous, que la multiplication dans les matrices n'est pas une opération changeable !!

Dans le livre de *wissama khalil & etienne dombre [15]* " multiplication à gauche de la transformation  $T_{ij}$  signifie que la transformation est faite par rapport au repère de référence  $R_i$ . La

**Chapitre V**  
**Résultats et simulations**

multiplication à gauche on applique la translation puis la rotation par rapport au repère  $R_i$  (lecture de droite à gauche de  $T_{ij}$ ) ".

Nous déduisons que la multiplication à gauche de la transformation  $T^0_9$  signifie que la transformation est faite par rapport au repère de référence  $R_0$  et on applique la translation puis la rotation par rapport au repère  $R_0$  (lecture de droite à gauche de  $T^0_9$ ).

E est la matrice de translation multiplié par la matrice de rotation

$$E=L*R$$

$$E=L*R=\begin{pmatrix} \cos^2\theta & -\cos\theta*\sin\theta & \sin\theta & X \\ \cos\theta*\sin\theta^2 + \cos\theta*\sin\theta & \cos^2\theta - \sin^3\theta & -\cos\theta*\sin\theta & Y \\ \sin^2\theta - \cos\theta^2*\sin\theta & \cos\theta*\sin\theta^2 + \cos\theta*\sin\theta & \cos^2\theta & Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Pour ramener la matrice  $T^0_3$  sur la matrice  $T^0_4$  nous multiplions  $T^0_3$  par E.

$$T^0_{33}=T^0_3*E$$

$$T^0_{33}=\begin{pmatrix} 0 & S_{1+2+3} & C_{1+2+3} & a_2C_1 + ZC_{1+2} - YS_{1+2+3} + XC_{1+2+3} \\ -1 & 0 & 0 & -Z \\ 0 & S_3S_{1+2} - C_3C_{1+2} & S_{1+2+3} & a_2S_1 + ZS_{1+2} + XS_{1+2+3} + YC_{1+2+3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Les matrices de transformations homogènes pour le pied sont :

$$T^3_4=\begin{pmatrix} C_4 & -S_4 & 0 & 0 \\ S_4 & C_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T^6_7=\begin{pmatrix} C_7 & -S_7 & 0 & 35 \\ S_7 & C_7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T^4_5=\begin{pmatrix} C_5 & -S_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S_5 & C_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T^7_8=\begin{pmatrix} C_8 & -S_8 & 0 & 48 \\ S_8 & C_8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_6^5 = \begin{pmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad T_9^8 = \begin{pmatrix} C_9 & -S_9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S_9 & C_9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Avec Ci : Cosinus de  $\theta_i$ , Si : Sinus de  $\theta_i$  pour les autres angles.

La matrice homogène total  $T_9^0$  correspond au passage du repère  $R_0$  au repère  $R_9$  est calculer par :

$$T_9^0 = T_{33}^0 * T_4^3 * T_5^4 * T_6^5 * T_7^6 * T_8^7 * T_9^8 * T_8^7 * T_9^8$$

Elle est représentée sous la forme suivante :

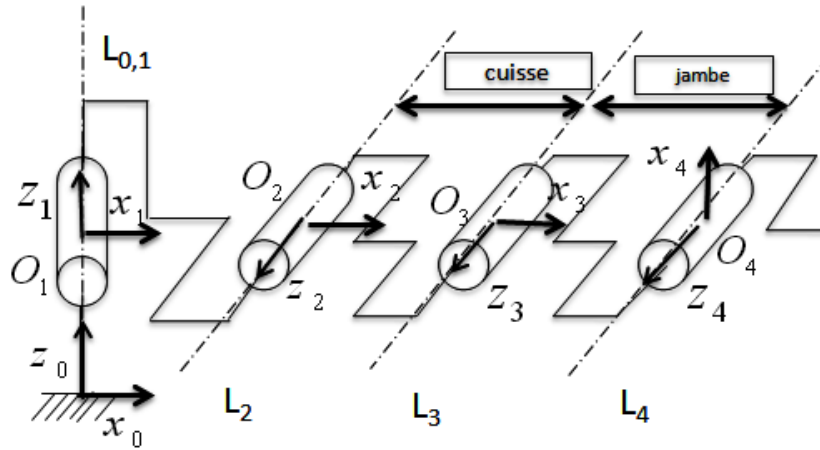
$$T_9^0 = \begin{pmatrix} x_x & y_x & z_x & p_x \\ x_y & y_y & z_y & p_y \\ x_z & y_z & z_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_x = 25C_1 + 32C_{1+2} + 22C_{1+2+3} - 50S_{1+2+3} + 35(C_6(S_5C_{1+2+3} + C_5S_4S_{1+2+3}) - C_4S_6S_{1+2+3}) \\ - 48(S_7(S_6(S_5C_{1+2+3} + C_5S_4S_{1+2+3}) + C_4C_6S_{1+2+3}) + C_7(C_6(S_5S_{1+2+3} - S_5S_4S_{1+2+3}) - C_4S_6S_{1+2+3})) \\ \\ P_y = -35(S_4S_6 + C_4C_5C_6) - 32 - 48(C_7(S_4S_6 + C_4C_5C_6) + S_7(C_6S_4 - C_4C_5S_6)) \\ \\ P_z = 22S_{1+2+3} + 32S_{1+2} + 50C_{1+2+3} + 25S_1 + 35(C_6(S_5S_{1+2+3} - C_5S_4C_{1+2+3}) + C_4S_6C_{1+2+3}) \\ - 48(S_7(S_6(S_5S_{1+2+3} + S_5C_4) + C_4C_6(C_6C_3S_{1+2} + S_3S_{1+2})) + C_7(C_6(S_5S_{1+2+3} - C_5S_4C_{1+2+3}) + C_4S_6C_{1+2+3})) \end{array} \right.$$

### V.2. Le modèle géométrique inverse

Nous avons établi le modèle géométrique inverse seulement pour les pieds.

Chaque pied est composé de 6 ddl nous avons limité les ddl à 4 seulement.



**Figure V.3** : représentation géométrique du pied.

La matrice de transformation homogène est :

$$T_4^0 = T_1^0 * T_2^1 * T_3^2 * T_4^3$$

Avec

$$T_1^0 = \begin{pmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_2^1 = \begin{pmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S_2 & C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_3^2 = \begin{pmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & a_2 \\ S_3 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_4^3 = \begin{pmatrix} C_4 & -S_4 & 0 & a_3 \\ S_4 & C_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

On réalisant le produit matriciel :  $T_{04} = T_{01} * T_{12} * T_{23} * T_{34}$ . On obtient le modèle géométrique direct qui représente la quatrième colonne de la matrice  $T_{04}$  qui permet de décrire la position de l'organe terminal :

$$T_4^0 = T_1^0 * T_2^1 * T_3^2 * T_4^3$$

$$T_4^0 = \begin{pmatrix} C_1 * C_{2+3+4} & S_1 & C_1(a_3 * C_{2+3} + a_2 * C_2) \\ S_1 * C_{2+3+4} & -C_1 & S_1 * (a_3 * C_{2+3} + a_2 * C_2) \\ S_{2+3+4} & 0 & a_3 * S_{2+3} + a_2 * S_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

**V.2.1. Le calcul du modèle géométrique inverse**

Ce modèle est le modèle inverse du précédent, pour chaque position nous avons quatre angles à calculer  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$  correspond à chaque articulation, où nous avons eu la possibilité de trouver plusieurs solutions

A partir du modèle géométrique direct de pied, nous obtenons

$$Xx = C_1 * C_{2+3+4} \dots\dots\dots(1)$$

$$Xy = -S_1 * C_{2+3+4} \dots\dots\dots(2)$$

$$Xz = S_{2+3+4} \dots\dots\dots(3)$$

$$Zx = S_1 \dots\dots\dots(4)$$

$$Zy = -C_1 \dots\dots\dots(5)$$

$$Zz = 0 \dots\dots\dots(6)$$

$$Px = C_1 * (a_3 * C_{2+3} + a_2 * C_2) \dots\dots\dots(7)$$

$$Py = S_1 * (a_3 * C_{2+3} + a_2 * C_2) \dots\dots\dots(8)$$

$$Pz = a_3 * C_{2+3} + a_2 * S_2 \dots\dots\dots(9)$$

*Le calcul de  $\theta_1$ :*

De (1) et (2) on obtient:

$$tg(\theta_1) = (Y / X) \dots\dots\dots(10)$$

Avec:

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctg (Y/X) \text{ si } X \geq 0 \\ \theta_1 = \arctg (Y/X) + \pi \text{ si } X < 0 \end{cases} \dots\dots\dots(11)$$

*Le calcul de  $\theta_3$ :*

On pose :

$$\begin{cases} A=(X/C_1) \\ B=Z \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = C_{2+3} + a_2 * C_2 \dots\dots\dots(12) \\ B = a_3 * S_{2+3} + a_2 * S_2 \dots\dots\dots(13) \end{cases}$$



De (12) et (13) au carrée on obtient:

$$C_3 = (A^2 + B^2 - a_2^2 - a_3^2) / (2 * a_2 * a_3) \Rightarrow S_3 = \pm(1 - C_3^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\theta_3 = ATAN2(\pm(1 - C_3^2)^{\frac{1}{2}}, C_3) \dots \dots (14)$$

Le calcul de  $\theta_2$ :

$$S_2 = ((a_2 + a_3 * C_3) * Z - a_3 * S_3 * (Y/S_1)) / (a_2^2 + a_3^2 + 2 * a_2 * a_3)$$

$$C_2 = ((a_2 + a_3 * C_3) * (Y/S_1) + a_3 * S_3 * Z) / (a_2^2 + a_3^2 + 2 * a_2 * a_3)$$

$$\theta_2 = ATAN2(S_2, C_2) \dots \dots (15)$$

Le calcul de  $\theta_4$ :

$$\theta_4 = \arctg(S_1 * X_z / X_y) - (\theta_2 + \theta_3) \dots \dots (16)$$

### V.3.MODELE CINEMATIQUE

Le calcul de la cinématique directe se fait soit on dérivant la matrice de transformation homogène lorsqu'on a 3DDL ou on utilisant la formule de composition de vitesse, dans le cas contraire.

Puisque nous avons 9 ddl nous avons utilisé celle de composition de vitesse.

#### V.3.1.Les matrices

Corps 0 :

$$\vec{w}_0 = \vec{0} \quad \text{Base de robot fixe.}$$

$$\vec{V}_0 = \vec{0}$$

Corps 1:

$$z_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} ; \overrightarrow{O_0 O_1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} .$$

$$\vec{w}_1 = \vec{w}_0 + \vec{\sigma}_1 \cdot \dot{q}_1 \cdot \vec{z}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{bmatrix} .$$

$$\vec{V}_1 = \vec{V}_0 + \vec{w}_0 \wedge \overrightarrow{O_0 O_1} + \sigma_1 \cdot \dot{q}_1 \cdot \vec{z}_1 = \vec{0} .$$

Corps 2 :

**Chapitre V**  
**Résultats et simulations**

---

$${}^1R_2 = \begin{pmatrix} C_2 & -S_2 & 0 \\ S_2 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \longrightarrow {}^2R_1 = \begin{pmatrix} C_2 & S_2 & 0 \\ -S_2 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$z_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} ; \overline{O_1O_2} = \begin{bmatrix} 25 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{w}_2 = \vec{w}_1 + \vec{\sigma}_2 \cdot \dot{q}_2 \cdot \vec{z}_2 = {}^2R_1 * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 + \dot{q}_2 \end{bmatrix}$$

$$\vec{V}_{2/R_1} = \vec{V}_1 + \vec{w}_1 \wedge \overline{O_1O_2} + \sigma_2 \cdot \dot{q}_2 \cdot \vec{z}_2 = \vec{0} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 \end{bmatrix} \wedge \begin{bmatrix} 25 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + 0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 25\dot{q}_1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{V}_{2/R_2} = {}^2R_1 * \vec{V}_{2/R_1} = \begin{bmatrix} 25\dot{q}_1 S_2 \\ 25\dot{q}_1 C_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

**Corps 3 :**

$${}^2R_3 = \begin{pmatrix} C_3 & -S_3 & 0 \\ S_3 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \longrightarrow {}^3R_2 = \begin{pmatrix} C_3 & S_3 & 0 \\ -S_3 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$z_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} ; \overline{O_2O_3} = \begin{bmatrix} 32 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{w}_3 = \vec{w}_2 + \vec{\sigma}_3 \cdot \dot{q}_3 \cdot \vec{z}_3 = {}^3R_2 * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 + \dot{q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 \end{bmatrix}$$

$$\vec{V}_{3/R_2} = \vec{V}_2 + \vec{w}_2 \wedge \overline{O_2O_3} + \sigma_3 \cdot \dot{q}_3 \cdot \vec{z}_3 = \begin{bmatrix} 25\dot{q}_1 S_2 \\ 25\dot{q}_1 C_2 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 + \dot{q}_2 \end{bmatrix} \wedge \begin{bmatrix} 32 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 25\dot{q}_1 S_2 \\ 32(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + 25\dot{q}_1 C_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{V}_{3/R_3} = {}^3R_2 * \vec{V}_{3/R_2} = \begin{bmatrix} S_3(32(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2 \\ C_3(32(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3 \\ 0 \end{bmatrix}$$

**Chapitre V**  
**Résultats et simulations**

Corps 4 :

$${}^3R_4 = \begin{pmatrix} C_4 & -S_4 & 0 \\ S_4 & C_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \longrightarrow {}^4R_3 = \begin{pmatrix} C_4 & S_4 & 0 \\ -S_4 & C_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$z_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} ; \overrightarrow{O_3O_4} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{w}_4 = \vec{w}_3 + \bar{\sigma}_4 \cdot \dot{q}_4 \cdot \vec{z}_4 = {}^4R_3 * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4 \end{bmatrix}$$

$$\vec{V}_{4/R_3} = \vec{V}_3 + \vec{w}_3 \wedge \overrightarrow{O_3O_4} + \sigma_4 \cdot \dot{q}_4 \cdot \vec{z}_4 = \begin{bmatrix} S_3(32(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2 \\ C_3(32(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{V}_{4/R_4} = {}^4R_3 * \vec{V}_{4/R_3} = \begin{bmatrix} C_4S_3(32(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2 + S_4C_4(32(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2C_3 \\ C_4S_3(32(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3 - S_4C_4(32(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Corps 5:

$${}^4R_5 = \begin{pmatrix} C_5 & 0 & S_5 \\ -S_5 & 0 & C_5 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \longrightarrow {}^5R_4 = \begin{pmatrix} C_5 & -S_5 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ S_5 & C_5 & 0 \end{pmatrix}$$

$$z_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} ; \overrightarrow{O_4O_5} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{w}_5 = \vec{w}_4 + \bar{\sigma}_5 \cdot \dot{q}_5 \cdot \vec{z}_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{w}_5 = \vec{w}_4 + \bar{\sigma}_5 \cdot \dot{q}_5 \cdot \vec{z}_5 = {}^5R_4 * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{q}_5 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) \\ C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) \\ \dot{q}_5 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}\vec{V}_{5/R_4} &= \vec{V}_4 + \vec{w}_4 \wedge \overrightarrow{O_4O_5} + \sigma_5 \cdot \dot{q}_5 \cdot \vec{z}_5 \\ &= \begin{bmatrix} C_4(S_3(32\dot{q}_1+32\dot{q}_2+25\dot{q}_1C_2)+25\dot{q}_1C_3S_2) \\ C_4(S_3(32\dot{q}_1+32\dot{q}_2+25\dot{q}_1C_2)-25\dot{q}_1C_2S_3) \\ 0 \end{bmatrix} + \\ &\quad \begin{bmatrix} S_4(C_3(32\dot{q}_1+32\dot{q}_2+25\dot{q}_1C_2)-25\dot{q}_1S_2S_3) \\ -S_4(C_3(32\dot{q}_1+32\dot{q}_2+25\dot{q}_1C_2)+25\dot{q}_1C_3S_2) \\ 0 \end{bmatrix} .\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\vec{V}_{5/R_5} &= {}^5R_4 * \vec{V}_{5/R_4} = \\ &\quad \begin{bmatrix} C_5(C_4(S_3(32\dot{q}_1+32\dot{q}_2+25\dot{q}_1C_2) \\ -S_5(C_4(S_3(32\dot{q}_1+32\dot{q}_2+25\dot{q}_1C_2) \\ S_4(S_3(32\dot{q}_1+32\dot{q}_2+25\dot{q}_1C_2)+25\dot{q}_1C_3S_2)) \end{bmatrix} + \\ &\quad \begin{bmatrix} 25\dot{q}_1C_3S_2)+S_4(C_3(32\dot{q}_1+\dot{q}_2+25\dot{q}_1C_2)-25\dot{q}_1S_2S_3)) \\ 25\dot{q}_1C_3S_2)+S_4(C_3(32\dot{q}_1+\dot{q}_2+25\dot{q}_1C_2)-25\dot{q}_1S_2S_3)) \\ -C_4(C_3(32\dot{q}_1+32\dot{q}_2+25\dot{q}_1C_2)-25\dot{q}_1S_2S_3) \end{bmatrix} .\end{aligned}$$

Corps 6:

$${}^5R_6 = \begin{pmatrix} C_6 & 0 & S_6 \\ -S_6 & 0 & C_6 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \longrightarrow {}^6R_5 = \begin{pmatrix} C_6 & -S_6 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ S_6 & C_6 & 0 \end{pmatrix} .$$

$$z_6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} ; \overrightarrow{O_5O_6} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} .$$

$$\vec{w}_6 = \vec{w}_5 + \vec{\sigma}_6 \cdot \dot{q}_6 \cdot \vec{z}_6 = \begin{bmatrix} \dot{q}_5 S_6 + C_6 S_5 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) \\ \dot{q}_5 C_6 - S_6 S_5 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) \\ \dot{q}_6 - C_5 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) \end{bmatrix} .$$

$$\vec{V}_{6/R_5} = \vec{V}_5 + \vec{w}_5 \wedge \overrightarrow{O_5 O_6} + \sigma_6 \cdot \dot{q}_6 \cdot \vec{z}_6 =$$

$$\begin{bmatrix} C_5(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2) \\ -S_5(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2) \\ S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} S_4 C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3 \\ S_4 C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3 \\ -C_4 C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3 \end{bmatrix}$$

$$\vec{V}_{6/R_6} = {}^6R_5 * \vec{V}_{6/R_5} =$$

$$\begin{bmatrix} C_5(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2) \\ -S_5(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2) \\ S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} S_4 C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3 \\ S_4 C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3 \\ -C_4 C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3 \end{bmatrix}$$

Corps 7:

$${}^6R_7 = \begin{pmatrix} C_7 & S_7 & 0 \\ -S_7 & C_7 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \longrightarrow {}^7R_6 = \begin{pmatrix} C_7 & -S_7 & 0 \\ S_7 & C_7 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$z_7 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} ; \overrightarrow{O_6 O_7} = \begin{bmatrix} 35 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{w}_7 = \vec{w}_6 + \vec{\sigma}_7 \cdot \dot{q}_7 \cdot \vec{z}_7 = \begin{bmatrix} C_7(\dot{q}_5 S_6 + C_6 S_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) + S_7(\dot{q}_5 C_6 - S_5 S_6(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) \\ C_7(\dot{q}_5 S_6 - S_6 S_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) - S_7(\dot{q}_5 C_6 + C_5 S_6(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) \\ \dot{q}_6 + \dot{q}_7 - C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) \end{bmatrix}$$

**Chapitre V**  
**Résultats et simulations**

$$\vec{V}_{7/R_6} = \vec{V}_6 + \vec{\omega}_6 \wedge \vec{O_6O_7} + \sigma_7 \cdot \dot{q}_7 \cdot \vec{z}_7 =$$

$$\begin{bmatrix} C_5 C_6 C_4 S_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2 + 25\dot{q}_1 C_3 S_2) \\ 35\dot{q}_6 - C_6 (C_4 (C_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3)) \\ S_5 (C_4 (S_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2)) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} S_4 C_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3) - S_6 C_4 C_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3) \\ - S_4 (S_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2) - 35C_5 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) - C_5 S_6 C_4 (S_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 \\ + S_4 (C_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3)) - 35\dot{q}_5 C_6 + 35S_5 S_6 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} -S_4 S_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2) \\ + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2) + S_4 (C_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{V}_{7/R_7} = {}^7R_6 * \vec{V}_{7/R_6} =$$

$$\begin{bmatrix} -S_7 (C_6 (C_4 (C_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3) - S_4 (S_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) \\ S_7 (S_6 (C_4 (C_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3) - S_4 (S_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 \\ S_5 (C_4 (S_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2) + S_4 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 25\dot{q}_1 C_3 S_2) - 35\dot{q}_6 + 35C_6 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) + C_5 S_6 (C_4 (S_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) \\ + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2) - C_5 C_6 (C_4 (S_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2) \\ (C_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} + 25\dot{q}_1 C_3 S_2) + S_4 (C_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3) - C_7 (S_6 (C_4 (C_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 \\ + S_4 (C_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3) - C_7 (C_6 (C_4 (C_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3) - S_4 \\ 0 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3) - S_4 (S_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2) \\ (S_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2) - 35\dot{q}_6 \\ \dot{q}_1 S_2 S_3) - 35\dot{q}_5 C_6 + 35S_5 S_6 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} - C_5 C_6 (C_4 (S_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2) + S_4 (C_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3)) \\ + 35C_5 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) + C_5 S_6 (C_4 (S_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2) + S_4 (C_3 (32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3)) \\ 0 \end{bmatrix}$$

**Corps 8:**

$${}^7R_8 = \begin{pmatrix} C_8 & -S_8 & 0 \\ S_8 & C_8 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \longrightarrow {}^8R_7 = \begin{pmatrix} C_8 & S_8 & 0 \\ -S_8 & C_8 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$z_8 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \overrightarrow{O_7 O_8} = \begin{bmatrix} 48 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{w}_8 = \vec{w}_7 + \vec{\sigma}_8 \dot{q}_8 \vec{z}_8 =$$

$$\begin{bmatrix} C_8(C_7(\dot{q}_5 S_6 + C_6 S_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) + S_7(\dot{q}_5 C_6 - S_5 S_6(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4))) \\ C_8(C_7(\dot{q}_5 C_6 - S_5 S_6(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) - S_7(\dot{q}_5 S_6 + C_6 S_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4))) \\ \dot{q}_6 + \dot{q}_7 + \dot{q}_8 - C_5^*(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} S_8(C_7(\dot{q}_5 C_6 - S_5 S_6(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) - S_7(\dot{q}_5 S_6 + C_6 S_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4))) \\ -S_8(C_7(\dot{q}_5 S_6 + C_6 S_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) + S_7(\dot{q}_5 C_6 - S_5 S_6(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4))) \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{V}_{8/R_7} = \vec{V}_7 + \vec{w}_7 \wedge \overrightarrow{O_7 O_8} + \sigma_8 \dot{q}_8 \vec{z}_8 =$$

$$\begin{bmatrix} -S_7(C_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2)) - 35\dot{q}_6 + 35 \\ 48\dot{q}_6 + 48\dot{q}_7 - C_7(C_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2)) + \\ S_5(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2)) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) + C_5 S_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) \\ - 35\dot{q}_6 + 35C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) + C_5 S_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 \\ + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3)) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} -25\dot{q}_1 S_2 S_3))) - C_7(S_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2)) \\ 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3))) + S_7(S_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) \\ - 48C_7(\dot{q}_5 C_6 - S_5 S_6(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) - 35\dot{q}_5 C_6 \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} -C_5 C_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3)) \\ 25\dot{q}_1 C_3 S_2)) - C_5 C_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) + 25\dot{q}_1 C_3 S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1 C_2) - 25\dot{q}_1 S_2 S_3)) - 48C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) \\ + 48S_7(\dot{q}_5 S_6 + C_6 S_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) + 35S_5 S_6(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) \end{bmatrix}$$

**Chapitre V**  
**Résultats et simulations**

$$\vec{V}_{8/R_8} = {}^8R_7 * \vec{V}_{8/R_7} =$$

$$\left[ \begin{array}{l} S_8(48\dot{q}_6 + 48\dot{q}_7 - C_7C_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2))) \\ S_8(S_7(C_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2))) + 25\dot{q}_1C_3 \\ S_5(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) \end{array} \right] +$$

$$\left[ \begin{array}{l} 25\dot{q}_1C_3S_2)) - 35\dot{q}_6 + 35C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) + C_5S_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3 \\ S_2)) - 35\dot{q}_6 + 35C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) + C_5S_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) + \\ 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 \end{array} \right] +$$

$$\left[ \begin{array}{l} S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) + S_7(S_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3) \\ S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) + C_7(S_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2 \\ 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3)) \end{array} \right] +$$

$$\left[ \begin{array}{l} - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2)) - C_5C_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) \\ S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2)) - C_5C_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3 \\ - 48C_7(\dot{q}_5C_6 - S_5S_6(\dot{q}_1 \end{array} \right] +$$

$$\left[ \begin{array}{l} S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) - 48C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) - C_8(S_7(C_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 \\ S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) + C_8(48\dot{q}_6 + 48\dot{q}_7 - C_7(C_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 \\ \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) \end{array} \right] +$$

$$\left[ \begin{array}{l} 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3)) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2)) - 35\dot{q}_6 + 35C_5(\dot{q}_1 \\ 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_3)) - 35\dot{q}_6 + 35C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 \\ - 35\dot{q}_5C_6 + 48S_7 \end{array} \right] +$$

$$\left[ \begin{array}{l} \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) + C_5S_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) \\ \dot{q}_4) + C_5S_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) + \\ (\dot{q}_5S_6 + C_6S_5(\dot{q}_1 \end{array} \right] +$$

$$\left[ \begin{array}{l} - 25\dot{q}_1S_2S_3))) + C_7(S_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) \\ S_7(S_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_4) - 25\dot{q}_1S_2S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_4) + 25\dot{q}_1C_3S_2)) - C_5C_6(C_4 \\ \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) \end{array} \right] +$$

$$\left[ \begin{array}{l} 25\dot{q}_1C_3S_2)) - C_5C_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) \\ (S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_4) + 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_4) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) - 48C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) \\ 35S_5S_6(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) \end{array} \right]$$

**Corps 9:**

$${}^8R_9 = \begin{pmatrix} C_9 & 0 & S_9 \\ -S_9 & 0 & C_9 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} C_9 & -S_9 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ S_9 & C_9 & 0 \end{pmatrix}$$



$$z_9 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} ; \overrightarrow{O_8 O_9} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \vec{w}_9 &= \vec{w}_8 + \vec{\sigma}_9 \cdot \dot{q}_9 \cdot \vec{z}_9 = \\ & \begin{bmatrix} S_9(\dot{q}_6 + \dot{q}_7 + \dot{q}_8 - C_5) \\ C_9(\dot{q}_6 + \dot{q}_7 + \dot{q}_8 - C_5) \\ \dot{q}_9 - C_8(C_7(\dot{q}_5 C_6) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) + C_9(C_8) \\ (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) - S_9(C_8) \\ - S_5 S_6 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} (C_7(\dot{q}_5 S_6 + C_6) \\ (C_7(\dot{q}_5 S_6 + C_6) \\ - S_7(\dot{q}_5 S_6 + C_6) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) + S_7 \\ S_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) + S_7 \\ S_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} (\dot{q}_5 C_6 - S_5 S_6) \\ (\dot{q}_5 C_6 - S_5 S_6) \\ S_8(C_7(\dot{q}_5 S_6) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) + S_8(C_7) \\ (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) + S_8(C_7) \\ C_6 S_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3) \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} (\dot{q}_5 C_6 - S_5 S_6) \\ (\dot{q}_5 C_6 - S_5 S_6) \\ \dot{q}_4)) + S_7 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) - S_7(\dot{q}_5 S_6) \\ (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) - S_7(\dot{q}_5 S_6) \\ (\dot{q}_5 C_6 - S_5 S_6) \end{bmatrix} + \\ & \begin{bmatrix} C_6 S_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) \\ C_6 S_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) \\ (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

**Chapitre V**  
**Résultats et simulations**

$$\vec{V}_{9/R_8} = \vec{V}_8 + \vec{\omega}_8 \wedge \overrightarrow{O_8O_9} + \sigma_9 \cdot \dot{q}_9 \cdot \vec{z}_9 =$$

$$\left[ \begin{array}{l} S_8(48\dot{q}_6 + 48\dot{q}_7 - C_7(C_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) \\ S_8(S_7(C_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2)) + \\ S_5(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3)) \end{array} \right] +$$

$$\left[ \begin{array}{l} 25\dot{q}_1C_3S_2)) - 35\dot{q}_6 + 35C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) + C_5S_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) \\ - 35\dot{q}_6 + 35C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) + C_5S_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 \\ - 48C_7(\dot{q}_5C_6 - S_5S_6(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) - 35\dot{q}_5C_6 + 48S_7(\dot{q}_5S_6 + C_6S_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) \end{array} \right] +$$

$$\left[ \begin{array}{l} S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) + S_7(S_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3) \\ 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) + C_7(S_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 \\ 35S_5S_6(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) \end{array} \right] +$$

$$\left[ \begin{array}{l} - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2)) - C_5C_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) \\ 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2)) - C_5C_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 \\ 0 \end{array} \right] +$$

$$\left[ \begin{array}{l} S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) - 48C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) - C_8(S_7(C_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 \\ 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) + C_8(48\dot{q}_6 + 48\dot{q}_7 - C_7(C_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3) \\ 0 \end{array} \right] +$$

$$\left[ \begin{array}{l} 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2)) - 35\dot{q}_6 + 35C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 \\ - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2)) - 35\dot{q}_6 + 35C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) + C_5S_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 \\ 0 \end{array} \right] +$$

$$\left[ \begin{array}{l} \dot{q}_3 + \dot{q}_4) + C_5S_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) \\ 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) + S_7(S_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 \\ 0 \end{array} \right] +$$

$$\left[ \begin{array}{l} - 25\dot{q}_1S_2S_3))) + C_7(S_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) \\ 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2)) - C_5C_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 \\ 0 \end{array} \right] +$$

$$\left[ \begin{array}{l} 25\dot{q}_1C_3S_2)) - C_5C_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) \\ 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) - 48C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 \\ 0 \end{array} \right] +$$

$$\left[ \begin{array}{l} - 25\dot{q}_1S_2S_3))) \\ \dot{q}_4)) \\ 0 \end{array} \right]$$

**Chapitre V**  
**Résultats et simulations**

$$\vec{V}_{9/R_9} = {}^9R_8 * \vec{V}_{9/R_8} =$$

$$\left[ \begin{array}{l} C_9(S_8(48\dot{q}_6 + 48\dot{q}_7 - C_7(C_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 \\ C_9(S_5(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3)) \\ - S_8(S_7(C_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2))) \\ 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) - 35\dot{q}_6 + 35C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) + C_5S_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) \\ - 48C_7(\dot{q}_5C_6 - S_5S_6(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) - 35\dot{q}_5C_6 + 48S_7(\dot{q}_5S_6 + C_6S_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) \\ - 35\dot{q}_6 + 35C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) + C_5S_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 \\ 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) + S_7(S_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) \\ 35S_5S_6(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) - S_9(S_8(48\dot{q}_6 + 48\dot{q}_7 - C_7(C_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) \\ 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) + C_7(S_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 \\ - 25\dot{q}_1S_2S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2)) - C_5C_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) \\ - 25\dot{q}_1S_2S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2)) - 35\dot{q}_6 + 35C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) \\ 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) - C_5C_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 \\ 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) - 48C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) \\ C_5S_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) \\ 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) - C_8(48\dot{q}_6 + 48\dot{q}_7 - C_7(C_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3) \\ - C_8(S_7(C_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2)) \\ S_7(S_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2)) \\ - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2)) - 35\dot{q}_6 + 35C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) + C_5S_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 \\ - 35\dot{q}_6 + 35C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) + C_5S_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 \\ - C_5C_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) \\ 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) + S_7(S_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 \\ 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) + C_7(S_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 \\ - 48C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) - C_8(S_7(C_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 \\ 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2)) - C_5C_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 \\ 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2)) - C_5C_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 \\ 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2)) - 35\dot{q}_6 + 35C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4) + C_5S_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 \\ 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) - 48C_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) \\ 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) + S_9(S_5(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 \\ 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) + C_7(S_6(C_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 \\ 0 \\ 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3)) - 48C_7(\dot{q}_5C_6 - S_5S_6(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) - 35\dot{q}_5C_6 + 48S_7(\dot{q}_5S_6 \\ 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3) - S_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2)) - C_5C_6(C_4(S_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 \\ 0 \\ C_6S_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) + 35S_5S_6(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4)) \\ 25\dot{q}_1C_2) + 25\dot{q}_1C_3S_2) + S_4(C_3(32\dot{q}_1 + 32\dot{q}_2 + 25\dot{q}_1C_2) - 25\dot{q}_1S_2S_3))) \\ 0 \end{array} \right]$$

La matrice jacobéenne est composé de

$$J_9^9 = \begin{bmatrix} V_9 / R_9 \\ W_9 \end{bmatrix}$$

# La planification de trajectoire

---

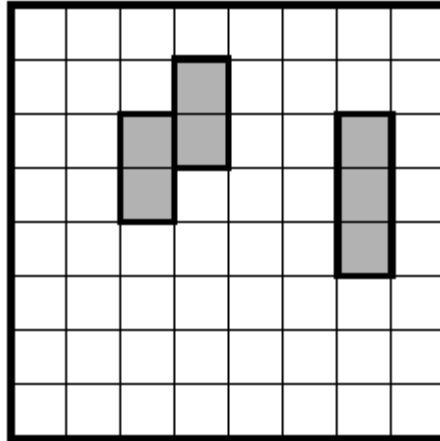
## **V.4.CHAMPS DE POTENTIEL**

### **V.4.1.Description de l'environnement**

Pour réaliser la planification de trajectoire, l'environnement du robot humanoïde doit être connu. Dans le contexte de ce projet, l'environnement est fixe pour une trajectoire donnée.

Le modèle de l'environnement en premier temps est une grille d'occupation. Dans la représentation par grille d'occupation, l'espace de travail est discrétisé en cubes de grandeur égale en carrés dont l'environnement est en 2D, que l'on appellera nœuds par la suite. Si un nœud est occupé en tout ou en partie par un obstacle, il est considéré occupé. Si un nœud est exempt de tout obstacle, il est considéré libre. Ce qui est à l'extérieur du cadre de l'espace de travail discrétisé est considéré occupé, puisque rien ne garantit l'absence d'obstacles dans cet espace inconnu. Le robot ne peut circuler que dans la zone constituée par les nœuds libres. Les dimensions de l'espace de travail discrétisé et le niveau de discrétisation de la grille d'occupation peuvent être choisis. Le choix est alors un compromis entre la qualité du modèle de l'environnement, qui augmente les chances de réussite de la stratégie, et le temps de calcul.

Ce mode de représentation des obstacles a l'avantage d'être très général et flexible, puisqu'il peut représenter n'importe quoi, en plus d'être très simple.



**Figure V.4** : Environnement sous forme de grille d'occupation.

Le simulateur a besoin d'obstacles pour vérifier les algorithmes. Pour obtenir rapidement des obstacles quelconques, il faut les créer artificiellement. Une partie du programme permettant d'aider à leur création a donc été faite. L'idée générale consiste à construire un environnement sous forme de grille d'occupation à l'aide de rectangle à angles droits (rectangles en 2D). L'utilisateur donne les coordonnées d'un coin et les dimensions de chaque rectangle qui compose les obstacles de la scène.

**La figure V.4** illustre un exemple simple en 2D d'un environnement sous forme de grille d'occupation dans laquelle les rectangles servent à créer les obstacles.

#### **V.4.2.Champ de potentiel attractif**

Par la suite, un champ de potentiel attractif sans minimums locaux est créé. Deux versions sont présentées. Une simple en 2D qui représente le robot comme un point dans une carte, et une autre plus évoluée sous VRML Matlab qui donne de meilleurs représentation de l'évitement de l'obstacle.

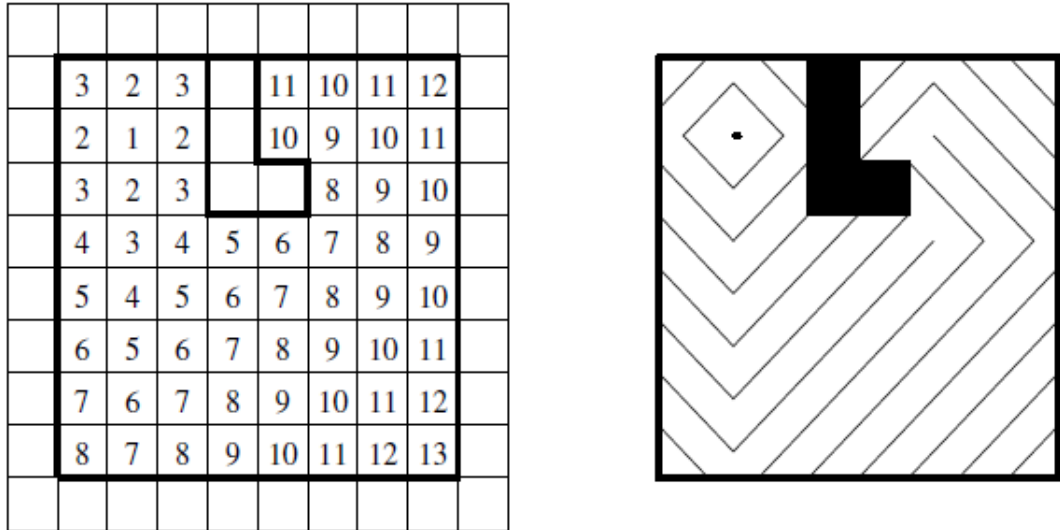
Le processus, illustré à **la figure V.5**, se répète jusqu'au traitement de tout l'espace de travail libre.

Si on demande itérativement au point de contrôle de se diriger vers une valeur de potentiel plus faible, il se rendra à son

**Chapitre V**  
**Résultats et simulations**

---

objectif, s'il existe un chemin. Cependant, le point aura tendance à frôler les obstacles, ce qui diminue les chances de trouver une configuration valide du robot lors de la génération de trajectoire.

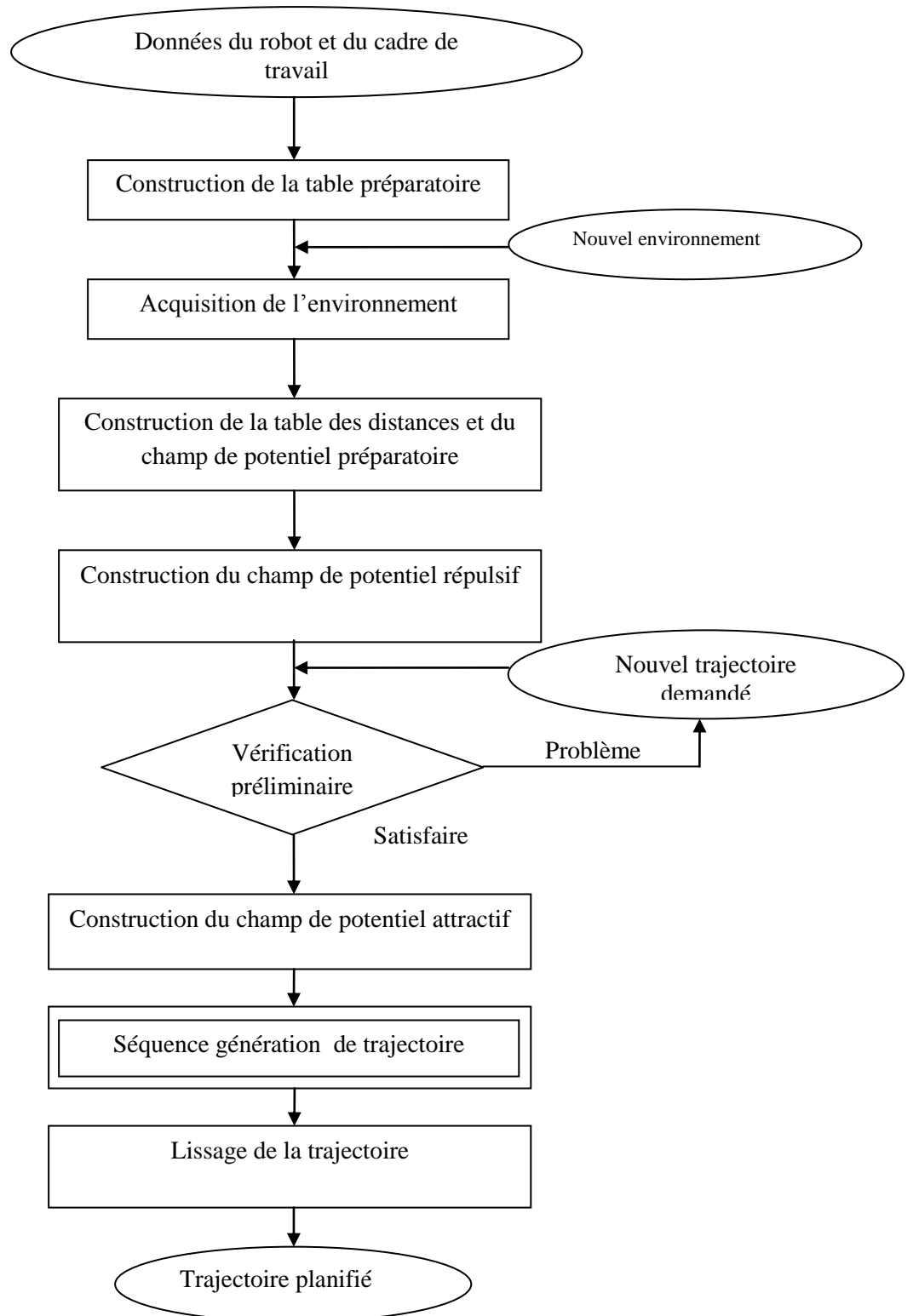


**Figure V.5** : Construction de la table des distances.

A **la figure V.6**, un organigramme général de la stratégie de planification de trajectoire illustre sa structure.

**Chapitre V**  
**Résultats et simulations**

---



**Figure V.6:** Organigramme général de la stratégie.

# SIMULATION

Nous avons choisi comme langage de programmation Matlab « matrix laboratory » pour la création des l'interfaces de modélisation et de planification de la trajectoire du robot RH-ARP.

**La figure V.7** nous montre une interface permettant de faire entrer les valeurs des angles de rotation des articulations du robot RH-ARP manuellement et par commande clavier, ainsi nous permettant de voir les blocages de ces derniers.



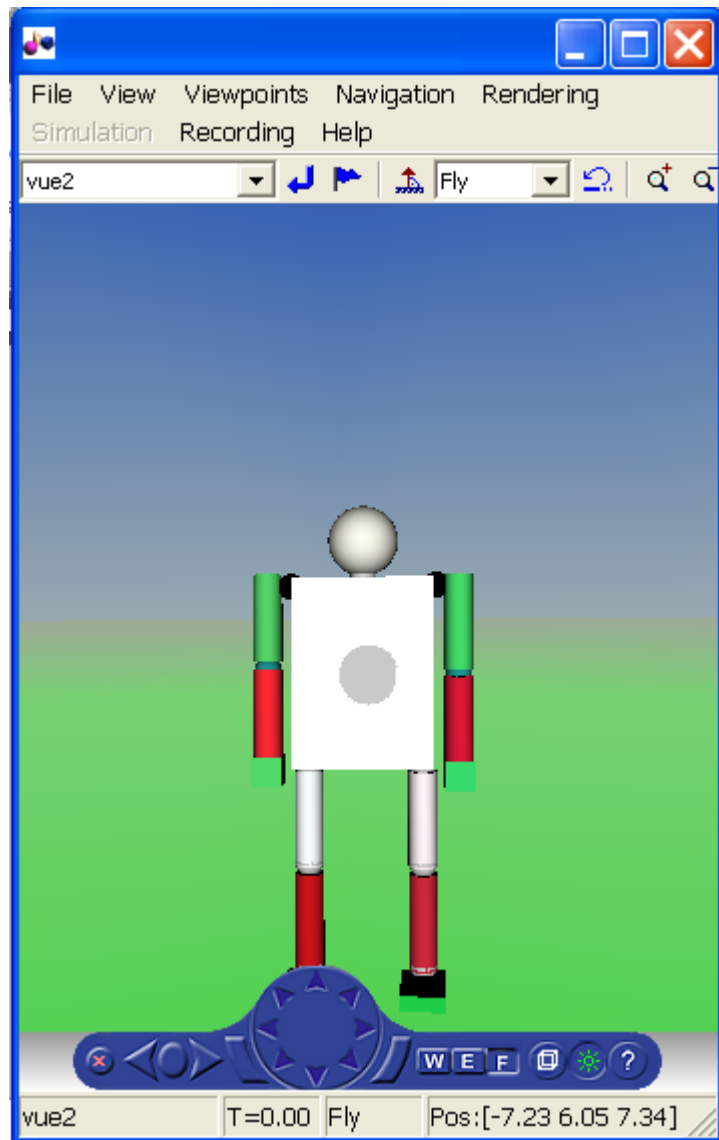
**Figure V.7** : interface du programme.



## Chapitre V

### Résultats et simulations

La **figure V.8** présente la structure du robot sous vrml (Virtual Reality Modeling Language).



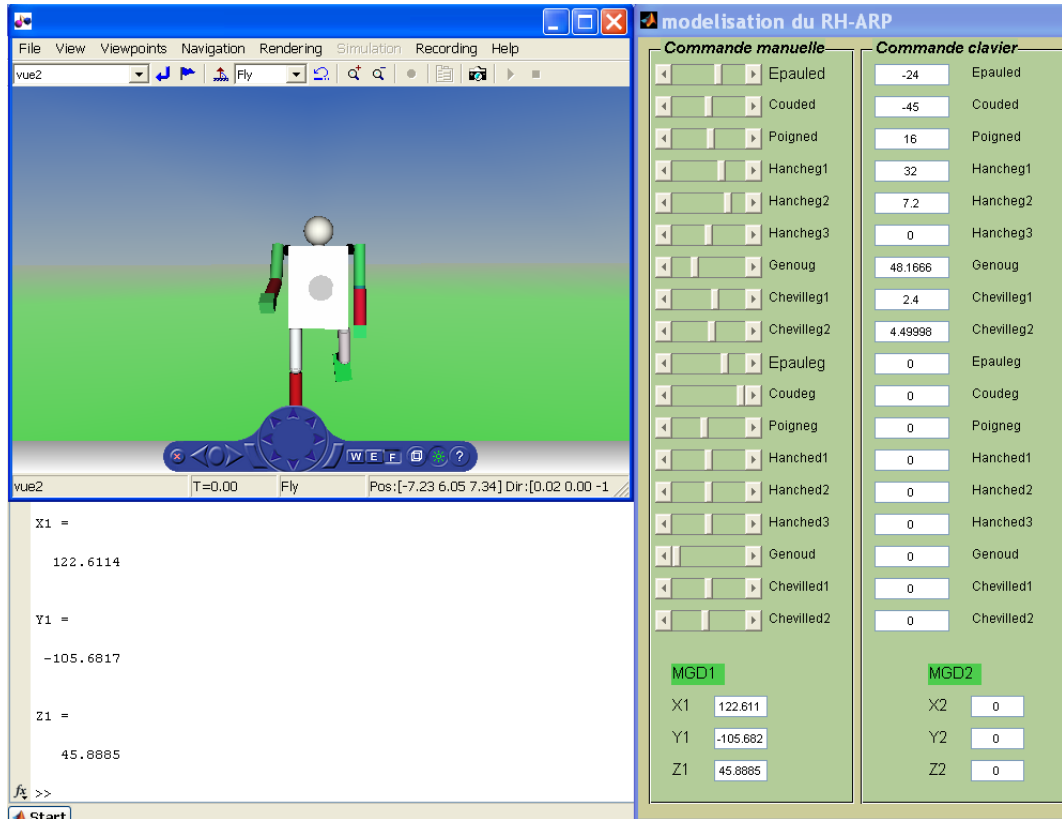
**Figure V.8** : La structure du robot.

Le changement des angles des articulations constituant la chaîne composée de main droite et pied gauche nous permettons de calculer le modèle géométrique directe (MGD) de la chaîne articulaire simple 1 (**la figure V.9**).

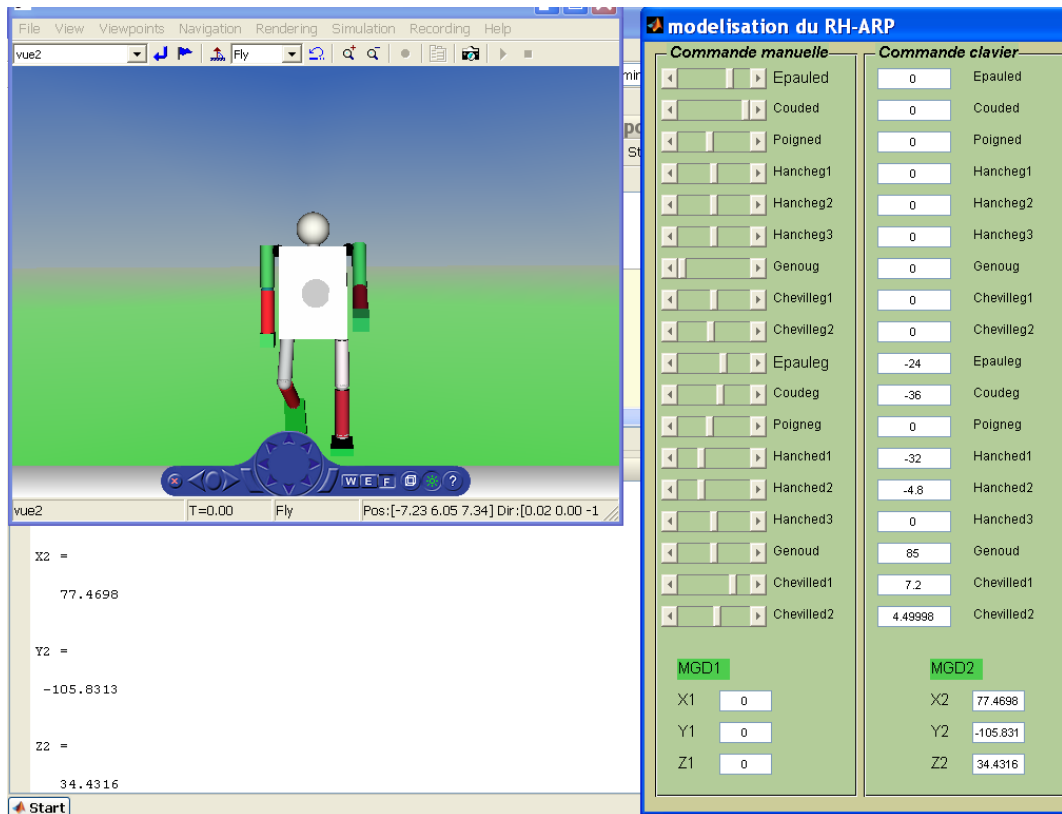
Et **la figure V.10** le calcul du MGD de la chaîne articulaire simple 2.

## Chapitre V

### Résultats et simulations



**Figure V.9** : MGD de la chaîne 1.

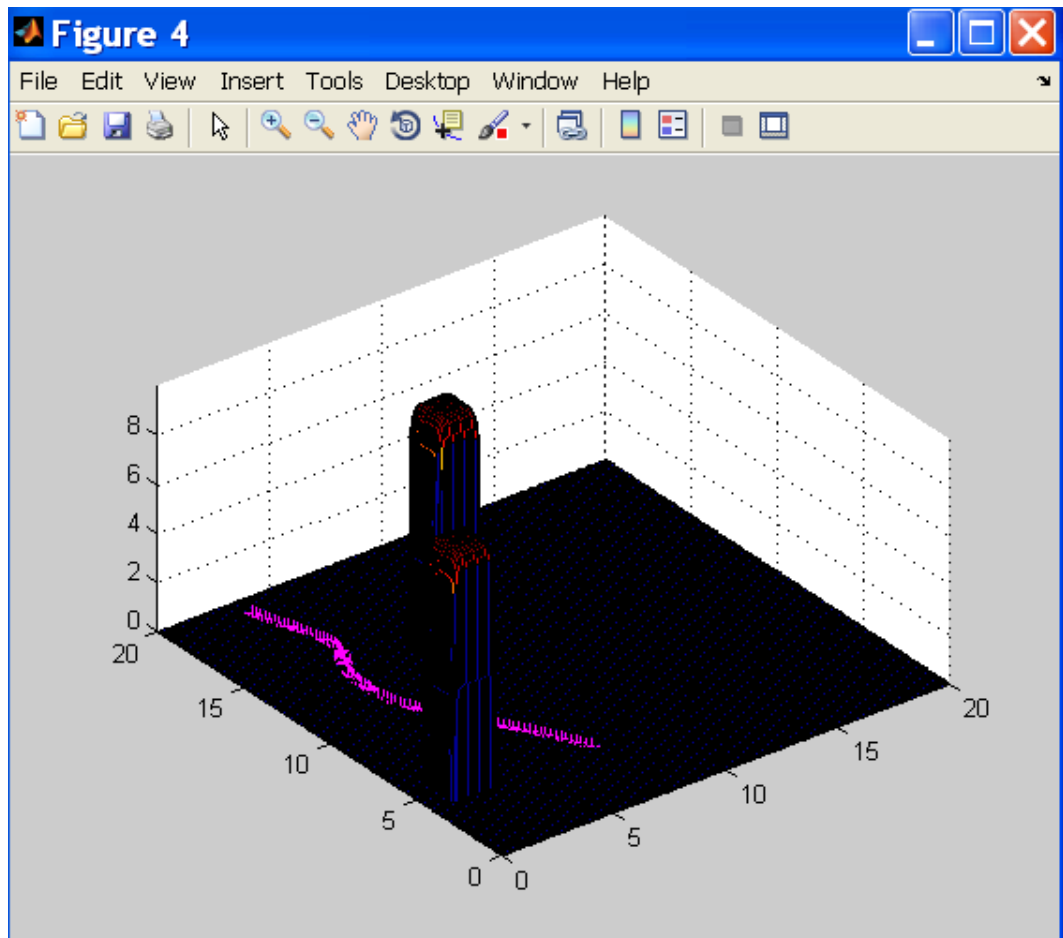


**Figure V.10** : MGD de la chaîne 2 .

## Chapitre V

### Résultats et simulations

Dans **la figure V.11** on voit voir la trajectoire du robot tout en évitant les obstacles.



**Figure V.11** : l'évitement de l'obstacle du robot RH-ARP.

**La figure V.11** nous montre une vue de haut de la simulation de l'évitement de l'obstacle sous vrml.

**Chapitre V**  
**Résultats et simulations**



**Figure V.12** : Vue de haut de la simulation de la planification sous vrml.

**La figure suivante** nous montre une vue de coté de la simulation.

## Chapitre V

### Résultats et simulations



**Figure V.13** : vue de coté de la simulation de trajectoire.

### V.5.CONCLUSION

Nous avons dans ce dernier chapitre présenté les résultats de la modélisation géométrique directe et inverse et la modélisation cinématique du robot.

Ensuite Nous avons mettre à votre disposition les résultats de la planification de trajectoire par champs de potentiel, et nous avons finissant le chapitre par donné les interfaces de simulation brièvement.

## Conclusion Générale et perspective

---

Ce mémoire s'inscrit dans le domaine de la robotique et plus particulièrement dans le domaine de la planification des mouvements et du contrôle des robots humanoïdes.

Nous proposons dans ce mémoire une modélisation mathématique du robot humanoïde et la génération de sa trajectoire dans un environnement en deux dimensions avec un évitement d'obstacles statiques.

Dans un état de l'art que nous avons développé, nous retrouverons plusieurs techniques de modélisation proposées par des différents auteurs :

« Min-Chan Hwang » de l'institut Ta Hwa de Taiwan a considéré chaque patte du robot comme un bras manipulateur indépendant, et il a calculé son modèle géométrique et son modèle cinématique.

Le groupe de recherche du département de l'intelligence artificielle à l'université Politécnica de Madrid ont considéré les pieds du robot humanoïde comme une seule chaîne articulaire simple supposant au premier lieu qu'un pied est relié au sol dont l'autre pied est l'organe terminal tout en appliquant le théorème de superposition.

Muhammed A. Ali, H. A. Park & C.S. George Lee dans l'article "Closed-Form Inverse Kinematic Joint Solution for Humanoid Robots" ont établi deux bases de coordonnées pour l'humanoïde, une au niveau du cou et autre au niveau du bassin en reliant entre ces deux bases de coordonnées par une matrice de transformation homogène.

## Conclusion Générale et perspective

---

Le groupe de recherche de laboratoire robotique à l'université Carlos III de Madrid ont divisé le corps du robot en deux parties indépendantes (demi-humanoïde) manipulateurs.

Mais les auteurs envisagent d'étendre leurs techniques à plusieurs ressources ou plusieurs parties.

Notre apport dans ce travail a été de proposer un modèle du raisonnement progressif pour la génération de mouvements d'un robot humanoïde.

Après une gestion de ressources multiples et après une synthèse nous apportons une nouvelle approche pour la modélisation et la commande de notre robot humanoïde ce qui fait l'originalité de nos travaux.

Pour cela nous avons modifié les modèles en introduisant de nouvelles résolutions pour la programmation de modèles géométriques directs et inverse, le modèle cinématique direct et la planification de la trajectoire.

Dans la dernière partie de ce travail, nous avons appliqué notre approche sur un système virtuel représentant un robot humanoïde. Une architecture basée sur le logiciel Matlab qui nous a permis de faire déplacer le robot avec un suivi de trajectoire.

## Conclusion Générale et perspective

---

Au terme de ces travaux, plusieurs axes de recherche se dégagent pour envisager, du point de vue des perspectives, de prolonger l'étude menée pendant les années à venir.

Nous suggérons la génération de la marche bipède et l'étude de la stabilité pratique de ce dernier. Ainsi nous proposons l'intégration de la vision artificielle pour la planification de trajectoire.



Ces travaux ont fait l'objet :

**Une communication internationale indexée IEEE**

M.MENAD. Z.AHMED FOITIH « **Modeling of a humanoid robot with 18 DOF in a virtual environnement** » Second International Conference on Innovative Computing Technology (technically co-sponsored by **IEEE**).Casablanca Morocco from September 18-20, 2012.

**Une publication:**

“**New Approach to the Modeling of a Humanoid Robot: Applied to Robot RH-ARP**” Meriem MENAD, Zoubir AHMED FOITIH. Progress in Computing Applications Volume 1 Number 2 September 2012. Page de 83 à 96.

Disponible sur le lien: <http://www.dline.info/pca/fulltext/v1n2/3.pdf>

## **Présentation du VRML**

Le Virtual Reality Modeling Language (abrégé en **VRML**) ou Virtual Reality Markup Language est un langage de description d'univers virtuels en 3 dimensions. Ce langage interprété est une norme internationale ISO et les fichiers VRML ont habituellement pour extension .wrl.

Présenté lors de la World Wide Web Conference de 1994, VRML n'est pas l'œuvre d'un unique programmeur, mais plutôt le résultat de la collaboration de plusieurs professionnels de la 3D.

Le but premier de ce langage est de permettre la représentation d'univers interactifs 3D virtuels. Les fichiers .wrl sont des fichiers texte décrivant les scènes virtuelles à l'aide du langage VRML. Les fichiers .wrl, qui peuvent être stockés localement sur un ordinateur ou téléchargés depuis un serveur web, sont visualisés à l'aide d'un visionneur, qui est soit un plugin ajouté au navigateur web ou encore un logiciel autonome indépendant du navigateur web, qui est installé sur l'ordinateur de l'utilisateur.

Les programmes VRML peuvent décrire des formes simples (points, lignes, polygones) ou complexes (sphères, cubes, cônes, cylindres...), du texte, des images, des animations, des éclairages, des sons, des hyperliens, ainsi que leur agencement dans l'espace, leur texture, leur couleur, leur matériau...

Une initiation sur le vrml est disponible sur le lien

<http://www.youtube.com/user/rahikelyasamine1/videos>

## Bibliographie

---

- [1] : Cours ROBOTIQUE ISTIA, Université Angers Jean-Louis Boimand.
- [2] : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Trois\\_lois\\_de\\_la\\_robotique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Trois_lois_de_la_robotique).
- [3]: Bedard, “Modeling and simulation of dynamic biped Plan 9 DOF”, PhD thesis. University Laval Quebec. 2006.
- [4] : V. Nuñez « Etude de la commande des mouvements dynamique d’un robot humanoïde ». (ITL-LISV).
- [5] :[http://www.futura-sciences.com/fr/doc/t/technologie/d/hrp-2-le-robot-humanoide-franco-japonais\\_688/c3/221/p2/](http://www.futura-sciences.com/fr/doc/t/technologie/d/hrp-2-le-robot-humanoide-franco-japonais_688/c3/221/p2/).
- [6] : S.Kajita, H.Hirukawa, K.Harada & K. Yokoi “Introduction à la commande des robots humanoïdes de la modélisation à la génération du mouvement ”Springer-Verlag France 2009
- [7] : W.Khalil & E.Dombre, “modeling, Identification and control of robots”. Second edition: Hermes.1999.
- [8] : P. Reignier « Pilotage réactif d'un robot mobile étude du lien entre la perception et l'action » institut national polytechnique de Grenoble 1994.
- [9] : M. Richard, L.Zexiang & S.S.Shankar “A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation,” Florida : CRC Press, Inc., 1994.
- [10] : Cours cinématique du corps rigide.
- [11] :Min-Chan Hwang, “The Construction, Kinematics and Animation of a Humanoid Robot” Chung Hua Journal of Science and Engineering, Vol.7, No.3, pp.47-53, Sept. 2009
- [12] : J. de Lope, T.Zarraonandia,R.Gonzalez-Careaga & D.Maravall,“Solving the Inverse Kinematics in Humanoid Robots: A Neural Approach,” University of Madrid. pp 448-459. Feb. 2003.
- [13]: Muhammad A. Ali, H. A.Park & C. S. George Lee “Closed-Form Inverse Kinematic Joint Solution for Humanoid Robots”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS, pp. 704-709. 2010

## Bibliographie

---

- [14]: Carlos Balaguer “Humanoid robots’ gait control strategy based on the Lie logic technique and LIPM model” IURS Robotics Summer school on humanoid robots. Benicassim, Spain. Sept. 2006.
- [15]: Cours école militaire polytechnique Algérie.
- [16]: O. Khatib. «*Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots*».Int. Journal of Robotics Research, 5(1), Spring 1986
- [17]: Potential Field Guide for Humanoid Multicontacts Acyclic Motion Planning K .Bouyarmene.A. Escande.F. Lamiroux.A. Kheddar.
- [18]: Vision K.Sabe, M.Fukuchi, J.Gutmann, T.Ohashi, K.Kawamoto, and Takayuki Yoshigahara «Obstacle Avoidance and Path Planning for Humanoid Robots using Stereo»,2004 IEEE
- [19]: Jin Han Lee, Carlos Nieto, Michael Novitzky “Boxing Humanoid Robot”
- [20]: S. Gay, S. Dégallier, U.Pattacini, A.Ijspeert and J. S. Victor “Integration of vision and central pattern generator based locomotion for path planning of a non-holonomic crawling humanoid robot”
- [21] :A. Chemouri , “Quelques contributions à la commande non linéaire des robots marcheurs bipèdes sous-actionnés” PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005.
- [22]: M. Arbulu, “Rh-0 humanoid full size robot’s control strategy based on the lie logic technique ”, Humanoid Robots, 5th IEEE-RAS International Conference pp 271 - 276. 2005.

## Résumé :

Les travaux présentés dans ce mémoire, s'intéressent à la modélisation d'un robot humanoïde à 18 degré de liberté et la planification de trajectoire dans un environnement virtuel.

Plusieurs représentations mathématiques d'un robot humanoïde ont été proposées. Nous avons fait une étude sur toutes ces approches, et nous avons proposé une telle basé sur la synthèse des travaux précédent.

La modélisation d'un tel système ou robot nécessitent en premier lieu d'établir son modèle mathématique. Les méthodes de modélisation sont différentes, nous avons choisi la notion de Denavit Hartenberg.

Nous avons choisi la méthode de champs de potentiel proposé par Oussama Khatib pour la planification de trajectoire de robot conçu dans un environnement à deux dimension.

## Summary:

The work presented in this paper, is concerned to the modeling of a humanoid robot with 18 degrees of freedom and path planning in a virtual environment. Several mathematical representations of a humanoid robot were proposed. We did a study of all these approaches, and we have proposed a synthesis based on previous work. Modeling of a system or robot need first to set its mathematical model. Modeling methods are different; we chose the concept of *Denavit Hartenberg*. We chose the potential field method proposed by *Oussama Khatib* for path planning of robot designed in a two-dimension surround.

## ملخص:

نقدم في هذا العمل دراسة نموذج من روبوت الإنسان الآلي مع 18 درجات الحرية وتخطيط مساره في بيئة افتراضية اقترحت العديد من تمثيلات الرياضية لروبوتات الإنسان الآلي. قمنا بدراسة كل هذه النهج، واقترحنا تمثيل على أساس الأعمال السابقة نمذجة مثل هذا النظام أو الروبوت تحتاج أولاً إلى إنشاء نموذجها الرياضي. اخترنا نظرية دينافيت هارتنبرج لتخطيط مسار الروبوت اخترنا أسلوب حقل الكمون المقترحة من طرف أسامة الخطيب في مجال مجسم ثنائي البعد

## Mots clés

Robot Humanoïde- Modélisation géométrique direct- Modélisation géométrique inverse-Modélisation cinématique-Planification de trajectoire par champ de potentiel.

## Keywords

Humanoid Robot-Direct geometric modeling-Inverse geometric modeling-Kinematic modeling-Path planning by potential field

## كلمات البحث

الروبوت الإنسان الآلي- النمذجة الهندسية مباشرة- النمذجة الهندسية العكسي- النمذجة الحركية  
تخطيط المسار حسب مجال الكمون المحتملة