

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE UNIVERSITE DU DJILALI BOUNAAMA**

**Faculté de Technologie**  
**Département : Génie électrique**



**Mémoire de fin d'étude**

**En vue de l'obtention d'un diplôme de Master.**

**Filière : Automatique.**

**Spécialité : Automatique et informatique industriel.**

**Thème :**

**Etude et simulation d'un robot manipulateur  
(Kawasaki FS03N)**

**Devant le jury composé de :**

- |                           |           |
|---------------------------|-----------|
| - Mr. Houcine Abdelfattah | Président |
| - Mr. Ikni Samir          | Encadreur |
| - Mr. Kerraci Abdelkader  | Examineur |

**Présenté par :**  
**KHABER AICHA**

**Année universitaire: 2018/2019**

## *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.  
voilà je viens de réalisé un de tes rêves,  
merci de m'avoir poussé à continuer mes  
études, merci de croire en moi quand  
moi-même je doute.*

*À mes sœurs Khadidja, Iman et Malak.*

*À ma grande famille.*

*À tous ceux qui, un jour ou l'autre m'ont  
offert leur amitié et des  
moments inoubliables  
plus précisément Souheyb, Messaoud et Tadj.*

*À tous les gens qui m'aiment.*

*À mon beau pays, l'Algérie.*

*À mes ennemis.*

*Remerciements.*

*AICHA*

## *Remerciements*

*En premier lieu, je remercie Dieu, le tout puissant, pour m'avoir donné, la patience, la volonté et la force nécessaires pour achever ce travail.*

*Je souhaite tout d'abord remercier mon encadreur monsieur **IKNI SAMIR**, pour avoir accepté de diriger ce mémoire et de sa patiente durant la période de l'encadrement.*

*Je remercie le président pour avoir accepté de juger ce travail, et les membres du jury qui ont pris de leurs temps pour lire, juger ce travail.*

*Mes vifs remerciements vont également aux membres de département de Génie électrique de l'université de Khmis-meliana.*

*Je remercie chaleureusement mes enseignants de Khmis-meliana et mes enseignants de Tlemcen*

*Je remercier également Mr. Selmani Djefel et Mr. Meftah Taha.*

*Je tiens à remercier ma petite famille que j'aime énormément et que je remercie chaleureusement du fond du cœur, d'avoir supporté mon absence durant tous ces années d'étude et qui m'a soutenu à chaque moment difficile de ma vie.*

*Enfin, je tiens à remercier tous ceux que je n'ai pas cités mais que je n'ai pas oubliés pour autant et qui de près comme de loin m'ont aidé, soutenu et encourager aux moments opportuns.*

*A tous, un grand MERCI!*

---

## Table de matière

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des notations et acronymes

Introduction générale	1
<b>Chapitre 1 : Généralité sur la robotique</b>	<b>4</b>
1.1. Introduction	5
1.1.1. Historique	6
1.2. Robots manipulateurs	6
1.3. Les éléments constitutives d'un robot	7
1.3.1. L'organe terminal	8
1.3.2. Le système mécanique articulé (S.M.A)	8
1.3.3. Capteurs	8
1.3.4. La partie commande	8
1.4. Technologie de classification	9
1.4.1. Mécanismes:	9
1.4.2. Caractéristiques des robots	10
1.4.3. Classification des robots	15
1.4.4. Rôle et domaines d'application des robots	18
1.5. Description des robots manipulateurs sériels	19
1.5.1. L'organe effecteur	19
1.5.2. Les sous ensemble constituant un robot	20
1.5.3. L'espace de travail	21
1.5.4. Degrés de libertés	21
1.5.5. Le mécanisme	21

---

1.5.6. Redondance -----	22
1.5.7. Espace de travail -----	23
1.5.8. Enveloppe de travail -----	23
1.6. Conclusion -----	24
<b>Chapitre 2 : Modélisation, Description du robot -----</b>	<b>25</b>
2.1 Introduction -----	26
2.2 Description du bras Kawasaki-----	26
2.2.1 Quelques caractéristiques du robot Kawasaki (FS03N)-----	27
2.3 Description du bras Kawasaki-----	29
2.3.1 Paramétrage de Denavit-Hartenberg [30] -----	30
2.3.2 Repères et paramètres -----	31
2.3.3 Modèle géométrique directe [16]-----	33
2.3.4 Modèles géométriques inverse du bras -----	34
2.3.5 Modèle cinématique -----	37
2.3.6 Modèle dynamique -----	39
2.3.7 Le modèle dynamique inverse (MDI)-----	41
2.3.8 Formalisme de Newton-Euler-----	41
2.4 Conclusion -----	44
<b>Chapitre 3 : Présentation du logiciel RoboDK et application -----</b>	<b>46</b>
3.1 Introduction -----	47
3.2 Logiciel de présentation RoboDK -----	47
3.2.1 Description du logiciel -----	47
3.3 Volume de travail du robot -----	49
3.4 Simulation avec logiciel RoboDK -----	49
3.4.1 Position accueil-----	49
3.4.2 Premier mouvement -----	50
3.4.3 Deuxième mouvement -----	51

---

3.4.4	Troisième mouvement -----	52
3.5	Simulation avec le robot Kawasaki FS03N -----	53
3.6	Programmation avec RoboDK -----	56
3.7	Conclusion -----	56
	Conclusion générale -----	57

# Liste des tableaux

**Tableau 2.1:** caractéristiques du robot Kawasaki (FS03N).....26

**Tableau 2.2 :** paramètres de Dinavit-Hartenberg du Kawasaki fs03n..... 28

# Liste des figures

<b>Fig 1.1</b> : Schéma définie la robotique.....	3
<b>Fig 1.2</b> :Invention de premier robot industriel.....	4
<b>Fig 1.3</b> : Robot manipulateur à des articulations rotoïdes.....	5
<b>Fig 1.4</b> : Vocabulaire de robots .....	5
<b>Fig 1.5</b> : Chaîne simple ouverte .....	7
<b>Fig 1.6</b> : Chaîne fermé .....	7
<b>Fig 1.7</b> : Architecture générale d'un système robotique .....	8
<b>Fig 1.8</b> : Chaînes cinématiques en boucle ouverte (a, b) et fermée .....	9
<b>Fig 1.9</b> : Robot avec six degré de liberté .....	9
<b>Fig 1.10</b> : Principaux types d'articulations et leur représentation conventionnelle .....	10
<b>Fig 1.11</b> : Démonstration sur les axes .....	11
<b>Fig1.12</b> : Coordonnées cartésiennes et cylindriques .....	14
<b>Fig 1.13</b> : Coordonnées polaires et universelles.....	15
<b>Fig 1.14</b> : Robot Scara.....	15
<b>Fig1.15</b> : Le robot Kawasaki FS03N .....	18
<b>Fig1.16</b> :Différentes combinaisons d'architectures du porteur. ....	19
<b>Fig1.17</b> : Porteur-poignet.....	20
<b>Fig1.18</b> : Manipulateur plan à deux liaisons.....	21
<b>Fig1.19</b> :Espace de travail du robot Kawasaki FS03N.....	22
<b>Fig 2.1</b> : Les composants du robot Kawasaki.....	25
<b>Fig 2.2</b> : Placement des repères et notations pour le robot Kawasaki (FS03N).....	29
<b>Fig 2.3</b> : Les solutions du robot de classe 6R.....	31
<b>Fig .3.1</b> :Logiciel RoboDK .....	40
<b>Fig . 3.2</b> : Le volume atteignable par le robot Kawasaki. ....	41
<b>Fig 3.3</b> : Position d'accueil du robot Kawasaki FS03N.....	42

<b>Fig 3.4 :</b> Position verticale du robot Kawasaki FS03N.....	43
<b>Fig 3.5:</b> Position deux du robot Kawasaki FS03N .....	44
<b>Fig 3.6:</b> Position trois du robot Kawasaki FS03N .....	45
<b>Fig 3.7 :</b> Premier position par le robot Kawasaki FS03N.....	45
<b>Fig 3.8 :</b> Position 2 atteindre par le robot Kawasaki FS03N.....	46
<b>Fig 3.9 :</b> Position 3 atteindre par le robot Kawasaki FS03N.....	47
<b>Fig 3.10 :</b> Trajectoire à suivre par le robot Kawasaki FS03N.....	47
<b>Fig 3.11 :</b> Trajectoire à suivre par le robot Kawasaki FS03N.(Target) .....	48

# Notations et acronymes

D.L.L :	Degré de liberté.
S.M.A :	Système mécanique articulé
M.G.D :	Modèle géométrique directe.
M.G.I :	Modèle géométrique inverse.
M.C.D :	Modèle cinématique directe.
M.C.I :	Modèle cinématique inverse.
M.D.D :	Modèle dynamique directe.
M.D.I :	Modèle dynamique inverse.
A.F.N.O.R :	Association Française de Normalisation

## Résumé :

Le travail développé dans ce mémoire s'articule essentiellement sur une étude et simulation d'un bras manipulateur à 6 degrés de liberté rotoïdes Kawasaki fs03n.

Le deuxième chapitre permet de faire une modélisation à base du logiciel Matlab et Maple

En effet une animation fait par logiciel RoboDK ainsi que le calcule du modèle géométrique direct se fait par logiciel WorkPlace

L'utilisation du logiciel RoboDK permet de tracer une trajectoire à suivre par le robot.

**Mots clés :** Bras manipulateur, degré de liberté, Kawasaki FS03N, RoboDK

---

### ملخص:

يستند العمل الذي تمت دراسته في هذه الأطروحة بشكل أساسي إلى دراسة ومحاكاة ذراع مناور ذو 6 درجات حرية Kawasaki FS03N يتميز كل مفصل بحركته الدورانية .

يمكننا الفصل الثاني من وضع النماذج يمكننا الحصول عليها بالاعتماد على برنامج ماتلاب و Maple

في الواقع يتم إجراء رسم متحرك بواسطة برنامج RoboDK وكذلك حساب النموذج الهندسي المباشر بواسطة برنامج WorkPlace

باستعمال برنامج RoboDK قمنا برسم مسار ليتتبعه الروبوت Kawasaki FS03N.

**الكلمات المفتاحية :** ذراع مناور، درجات حرية، كاوازاكي FS03N , RoboDK

---

### Abstract:

The work developed in this thesis is essentially based on a study and simulation of a Kawasaki FS03N 6 rotational freedom manipulator arm .

In the second part, we modulate the robot arm using Matlab and Maple software.

Indeed an animation made by RoboDK software as well as the computation of the direct geometric model is done by software WorkPlace

Using RoboDK software, we can draw a trajectory to follow by the robot

**Keywords:** manipulator arms, degree of freedom, Kawasaki FS03N, RoboDK

# Introduction générale

## Introduction générale

La vie humaine aujourd'hui devient de plus en plus dépendante de l'invention scientifique, dont l'utilisation des robots fait partie de ce progrès technologique. Ils sont largement utilisés en industrie afin d'augmenter la productivité, réaliser des tâches pénibles et dangereuses pour l'homme, Coutume aussi aux gens handicapés, la robotique médicale ou encore pour les loisirs.

Le domaine de la robotique demande beaucoup de créativité et des connaissances pluridisciplinaires (Mécanique, Electronique numérique et analogique, électrotechnique, Programmation, Intelligence artificielle, Temps réel, Automatique...).

Néanmoins, les robots manipulateurs actuels souffrent encore de médiocrité, tel que la clarté et la vitesse conjointement, et l'enveloppe de travail fini robot qui les bloquent de piloter à bien certaines tâches et limitent leurs champs d'action. [30]

Des différentes techniques sont utilisées pour la commande des bras manipulateurs. La conception mécanique est au cœur de la pratique professionnelle de l'ingénieur et même de choix du schéma selon la commande. Un bras manipulateur est le bras d'un robot généralement programmable avec des fonctions similaires à un bras humains soit la configuration des vitesses ou des accélérations. [21] [24]

La modélisation est la conception d'un modèle selon son objectif et les moyens utilisés cette dernière est dite mathématique, géométrique, cinématique et dynamique. Une simulation est importante pour les programmeurs de robot dans leurs permettant d'exercer et de planifier le comportement d'un robot, et d'autre part de vérifier le travail de ce dernier (bras).[2]

En outre, cela permettra d'économiser le temps et l'argent, et jouer un rôle important dans l'évaluation de la fabrication d'automatisation. Être capable de simuler ouvre une large gamme d'options, en aidant à résoudre de nombreux problèmes créative. On peut étudier, concevoir, visualiser et tester un objet avant de faire une réalité.

Cette simulation ne peut être fonctionnée qu'avec la présence des modèles attachés à la modélisation et présentés ces principales notions de commandes liées au robot manipulateur.

Le travail présenté dans ce mémoire, s'intéressent à la modélisation et la simulation d'un robot Kawasaki FS03N à six degré de liberté.

Ce travail est organisé en trois chapitres :

**L'objet de premier chapitre** est d'apportera quelques définitions de base et décrire les constituants technologiques d'un robot et définir les principaux termes du domaine.

## Introduction general

---

**Le deuxième chapitre** présent quelques méthodes permettant d'établir les modèles géométriques, cinématiques et dynamique pour le cas des robots à structure ouverte simple, ces méthodes sont basées sur la détermination des paramètres de Denavit-Hartenberg.

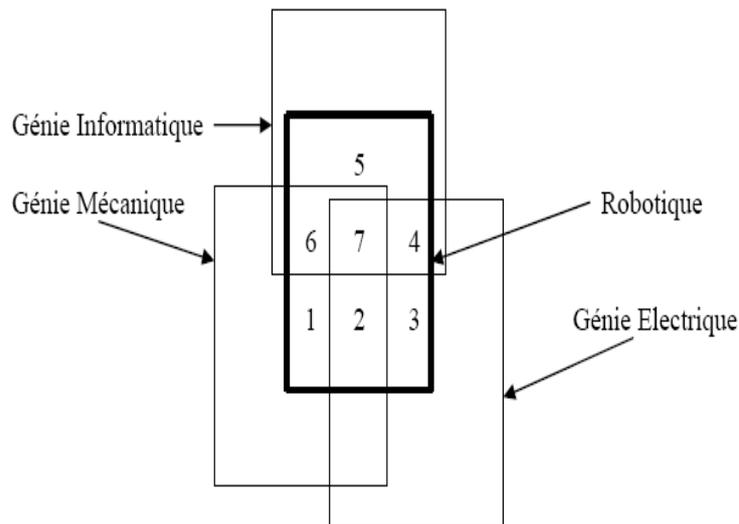
**En troisième chapitre** on utilise les résultats du chapitre précédent pour faire une présentation (animation) à l'aide du logiciel RoboDK sur un robot sériel à six articulations rotoïde, et plus précisément du robot de la compagnie japonaise Kawasaki.

Enfin nous terminons ce mémoire par une conclusion donnant un aperçu sur le travail réalisé, et quelques perspectives.

# Généralité sur la robotique

## 1.1. Introduction

Un robot est un système mécanique de type manipulateur commandé en position, reprogrammable, polyvalent (i.e., à usages multiples), à plusieurs degrés de liberté, il peut manier des outils et des dispositifs spécialisés, il exécute une variété de tâches suivant un programme. Il a souvent l'apparence d'un, ou plusieurs, bras se terminant par un poignet. Il s'adapte à l'environnement et aux circonstances utilisant une unité de commande. Ces machines polyvalentes sont généralement étudiées pour les tâches répétitives. [1]

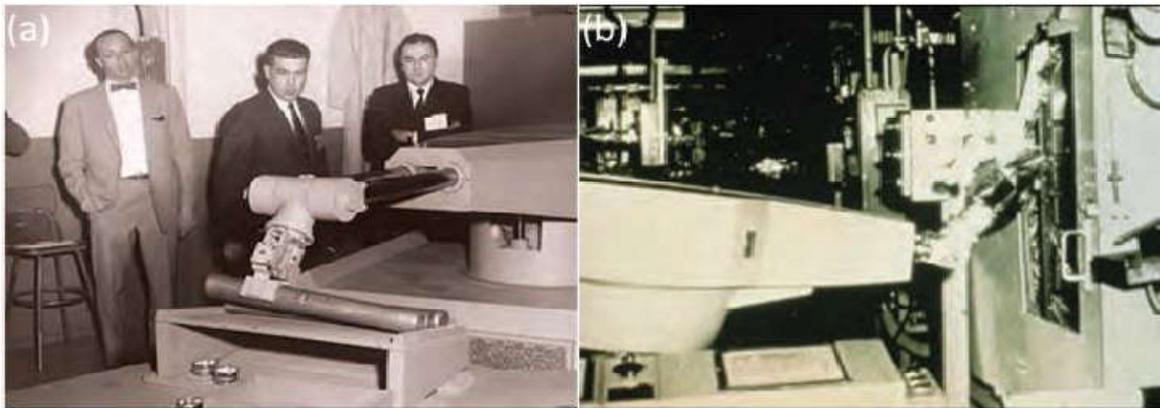


**Fig1.1** schéma définie la robotique. [20]

1. Process, Structure et modélisation mécanique, Actionneurs hydrauliques et pneumatiques, capteurs.
2. Modèles cinématique/dynamique, contrôle/commande
3. Electronique de contrôle/commande, traitement des signaux, Actionneurs électriques, Automatique.
4. Diagnostic, Architecture du contrôleur, Informatique temps réel, Vision, Modélisation des systèmes automatisés.
5. IA, Structures/bases de données, langages orientés robotique, infographie,...
6. CAO, CFAO, Modeleurs, Planification.
7. Intégration.

## 1.1.1. Historique

L'invention du robot industriel remonte à 1954 quand George Devol a déposé un brevet pour le premier robot. La première entreprise à produire un robot était Unimation, fondée en 1956 par George Devol et Joseph Engelberger. Le premier robot a été mis en service dans une usine de General Motors en 1961 pour extraire des pièces d'une machine de moulage sous pression. Le « Stanford Arm » a été conçu en 1969 par Victor Scheinman (Scheinman, 1968) comme un prototype pour la recherche. La conception de robots a par la suite été fortement influencée par les concepts de Scheinman. [29]

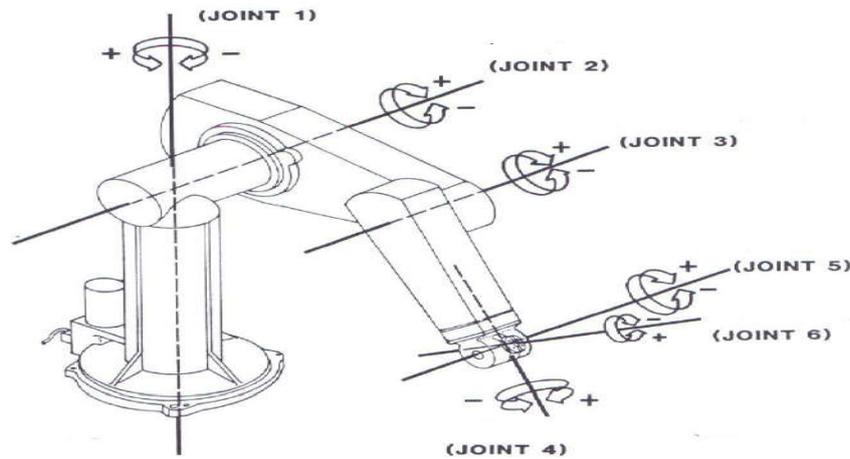


**Fig1.2 :** Invention du premier robot industriel : Unimation (IFR, 2012) (a) Développement du premier robot industriel [29] (b) dans une usine de General Motors (1961).

Selon l'étude de la Fédération Internationale de Robotique (IFR) en 2012, il y a au moins 1153000 robots industriels opérationnels fin 2011 dans le monde [29]. Selon le rapport annuel de l'IFR en 2012. Grâce aux avancées des technologies, la robotisation des fabrications industrielles s'est élargie ces dernières années. Toujours d'après (IFR, 2012), il y a une augmentation de 38% des robots industriels vendus en 2011 (soit 166K unités), dont 43 % en Europe [29].

## 1.2. Robots manipulateurs

Ce sont les matériels les plus utilisés au milieu industriel, ils sont élaborés pour saisir et manier des outils avec ou sans auditoire humaine. Ils réalisent des salissures répétitives et souvent pénibles pour l'homme. Ils sont rapides, exact, attaché et manipulent des objets en milieu adverse ou inconnaissable, ou produits périlleux ou au milieu danger pour nous les êtres humains.

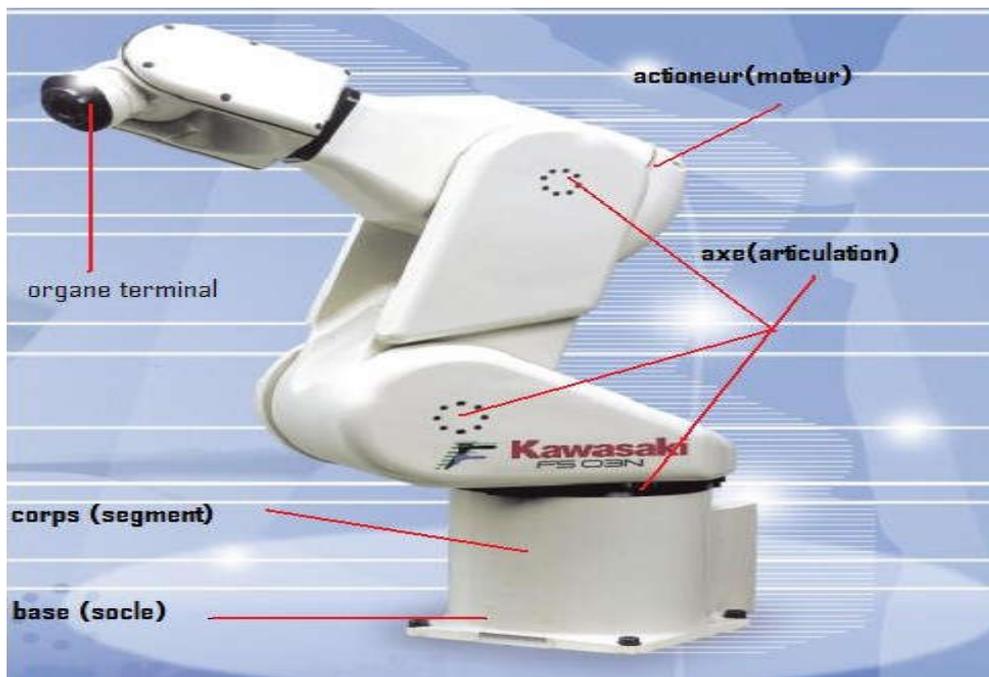


**Fig1.3 :** Robot manipulateur à des articulations rotoïdes. [29]

La baisse des coûts de production et le perfectionnement de qualité conduit à l'usage des robots.

## 1.3 Les éléments constitutives d'un robot

Ce robot manipulateur (Fig 1.4) est conçu en tant que cinématique dotée d'un bras articulé à 6 axes. Ils sont constitués des sous-ensembles principaux montrés sur la figure au dessous :



**Fig1.4 :** Vocabulaire de robots [2]

## 1.3.1 L'organe terminal

Le terme organe terminal fait regrouper tout dispositif destiné à manier des outils ou à les transformer. En d'autres termes, il s'agit d'une interface permettant au robot d'interagir avec son environnement. Un organe terminal peut être multifonctionnel, au sens où il peut être équipé de plusieurs dispositifs ayant des fonctionnalités différentes. Il peut aussi être monofonctionnel, mais interchangeable. Un robot, enfin, peut-être multi-bras, chacun des bras portant un organe terminal différent. On utilisera indifféremment le terme organe terminal, préhenseur, outil ou effecteur pour nommer le dispositif d'interaction fixé à l'extrémité mobile de la structure mécanique. [2]

## 1.3.2. Le système mécanique articulé (S.M.A)

C'est un mécanisme ayant une structure plus au moins proche de celle du bras humain, ce mécanisme permet de remplacer, ou de prolonger, son action. Son rôle est d'amener l'organe terminal dans une situation (position et orientation) donnée, selon des caractéristiques de vitesse et d'accélération données [2]. Une structure mécanique articulée peut être représentée par une architecture composée de plusieurs chaînes de corps rigides assemblés par des liaisons appelées articulations. Les chaînes peuvent être dites soit ouvertes ou en série dans les quelles tous les corps ont au plus deux liaisons, ou bien arborescentes où au moins l'un des corps a plus de deux liaisons. Les chaînes peuvent aussi être fermées dans les quelles l'organe terminal est relié à la base du mécanisme par l'intermédiaire de plusieurs chaînes [34].

## 1.3.3. Capteurs

Les organes de perception permettent de gérer les relations entre le robot et son environnement. Les capteurs Dits proprioceptifs lorsqu'ils mesurent l'état interne du robot (positions et vitesses des articulations) et extéroceptifs lorsqu'ils recueillent des informations sur l'environnement (détection de présence, de contact, mesure de distance, vision artificielle). [2]

## 1.3.4. La partie commande

Qui synthétise les consignes des asservissements pilotant les actionneurs. A partir de la fonction de perception et des ordres de l'utilisateur, elle permet d'engendrer les actions du robot. [2]

## 1.4. Technologie de classification

Les systèmes robotiques sont élaborés peuvent être classés plusieurs grandes catégories selon:

### 1.4.1. Mécanismes:

On appelle mécanisme tout ensemble de solides reliés 2 à 2 par des liaisons. On distingue 2 types de mécanismes :

- Les mécanismes en chaîne simple ouverte (ou en série) Fig (1.5). Lorsque l'on parcourt le mécanisme, on ne repasse jamais 2 fois sur la même liaison, ou sur le même solide. Ce type de système est le plus répandu. [1]



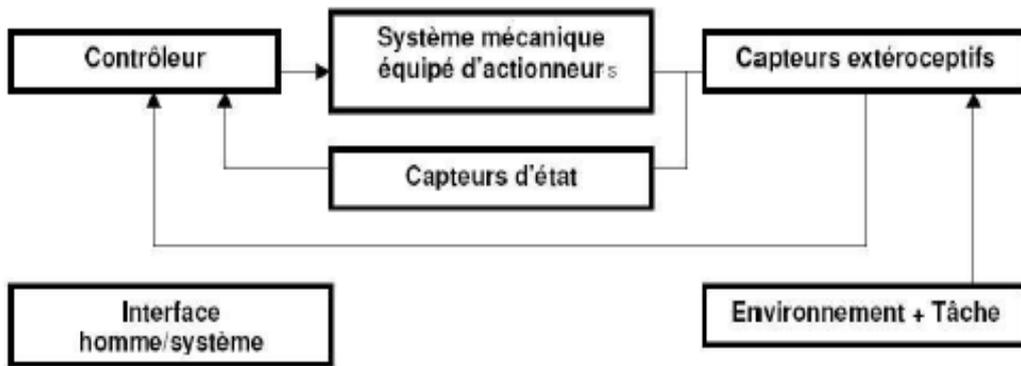
**Fig 1.5:** chaîne simple ouverte [4]

- Les mécanismes en chaîne complexe, tout ce qui n'est pas en série (au moins un solide avec plus de 2 liaisons). De tels systèmes se subdivisent en 2 groupes : les chaînes structurées en arbre, et les chaînes fermées (dont l'avantage est d'être a priori plus rigide, plus précis, capable de manipuler de lourdes charges). A titre d'exemple, le pantographe est un mécanisme en chaîne fermée. [1]



**Fig1.6 :** chaîne fermé [4]

- **Actionneurs:** Convertisseur d'énergie primaire en énergie mécanique (actionneurs électriques, pneumatiques, hydrauliques, piézo-électriques, AFM, électrostatiques). [4]
- **Capteurs:** Capteurs d'état (position, vitesse, accélération), capteurs extéroceptifs (force, vision, télémétrie, tactile, sonores...). [4]



**Fig1.7 :** Architecture générale d'un système robotique [4]

- **Contrôleurs:** Régulateurs d'énergie primaire, calculateurs temps-réel + OS, interfaces capteurs (traitement du signal et numérisation), bus de communication (VME, CAN, Internet). [4]
- **IHM:** Langage symbolique, langage structuré, COA robotique, contrôle d'exécution et d'aide à la décision, interfaces de télé-opération. [4]

## 1.4.2. Caractéristiques des robots

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

**La versatilité :** Un robot doit avoir la capacité de pouvoir exécuter une variété de tâches, ou la même tâche de différente manière.

**L'auto-adaptative:** Un robot doit pouvoir s'adapter à un environnement changeant au cours de l'exécution de ses tâches.

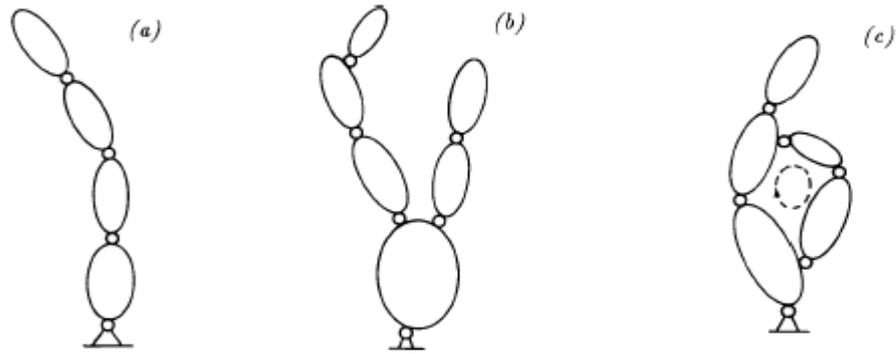
Les robots sont aussi caractérisés par leur géométries, volume accessible, précisions/ Répétabilité masse du robot sa maintenance et leur charge utile. [4]

Ces caractéristiques géométriques sont détaillées comme suit :

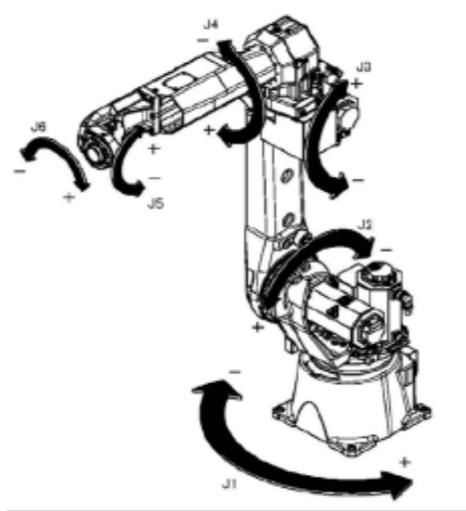
### 1.4.2.1. Caractéristique géométrique

- **Type d'articulation :**

Une chaîne cinématique Fig (1.8) consiste en un ensemble de corps rigides articulés entre eux. Les articulations peuvent être de nature extrêmement variées suivant le type de mouvement relatif qu'elles autorisent et peuvent impliquer plusieurs degrés de liberté Fig (1.9) Par exemple : [4]

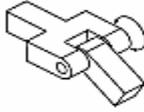
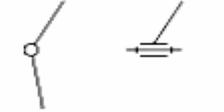
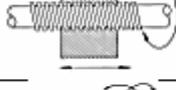
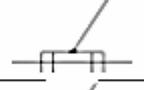


**Fig1.8:** chaînes cinématiques en boucle ouverte (a, b) et fermée (c). [4]



**Fig1.9 :** robot avec six degré de liberté. [4]

- **l'articulation de rotation (R)** possède 1 d.d.l permettant la rotation autour de son axe.
- **l'articulation prismatique (P)** possède 1 d.d.l qui permettant de translation le long de son axe.
- **l'articulation cylindrique (C)** possède 2 d.d.l qui permettent la rotation et translation suivant l'axe.
- **l'articulation "Screw" (S)** possède 1 d.d.l correspondant au mouvement d'une vis, la translation relative est reliée à la rotation par l'intermédiaire du pas.

Type d'articulation	Forme physique	Symbol	Degrés de liberté
Rotation (R)			1
Prismatique (P)			1
Cylindrique (C)			2
"Screw" (S)			1
Sphérique (G)			3
Universelle (U)			2

**Fig1.10:** Principaux types d'articulations et leur représentation conventionnelle. [4]

- **l'articulation sphérique** (ou globulaire) (G) possède 3 d.d.l et permet une orientation relative arbitraire. [3]
- **l'articulation universelle** (U) ou joint de Hooke possède 2 d.d.l.

Les coordonnées généralisées nécessaires pour décrire le mouvement relatif de deux corps rigides reliés par une articulation constituent les coordonnées articulaires. Leur nombre est égal au nombre de d.d.l. de l'articulation. Pour les applications qui nous concernent, il nous suffira de considérer la combinaison des articulations P et R auxquelles peuvent se ramener bon nombre d'articulations d'ordre plus élevé. [3]

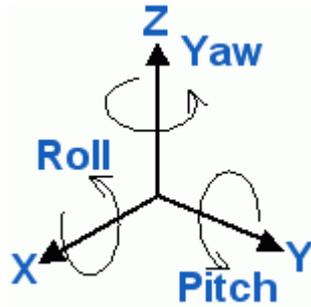
### 1.4.2.2. Spécification d'un robot manipulateur

Selon la norme ISO qui a régi les robots industriels, les fabricants de robots doivent fournir une certaine liste de paramètres qui définissent les capacités du robot. Nous le discuterons plus en détail dans ce qui suit : [5]

### ✓ . Nombre d'axes

La position d'un robot dans l'espace requiert 6 paramètres indépendants :

- 3 paramètres indépendants définissent la position d'un point, du robot (coordonnées Cartésiennes, cylindriques, sphériques, ..., dans la base du repère fixe),
- 3 paramètres indépendants déterminent la rotation du robot autour du point  $P$  (angles d'Euler, paramètres d'Euler, ...). Voici une image qui décrit bien les 6 axes. [5]



**Fig1.11:**démonstration sur les axes [5]

Yaw correspond à l'angle de lacet : rotation autour l'axe Z

Pitch correspond à l'angle de tangage : rotation autour l'axe Y

Roll correspond à l'angle de roulis : rotation autour l'axe X

### ✓ Cinématique du robot

La cinématique du robot est une façon de représenter les joints et les membres du robot. Avec ce genre d'analyse, il est possible de déterminer l'enveloppe de travail en détail et aussi de déterminer les points que le robot ne pourrait pas atteindre. C'est important de prendre en compte la cinématique du robot à la conception pour ne pas avoir de mauvaises surprises à l'implémentation. [5]

### ✓ Capacité de chargement

La capacité de chargement est le poids maximal que le robot peut supporter. Plus le robot est précis, plus c'est difficile de porter des grosses charges. Après un petit tour des fabricants de robots, on remarque rapidement que la charge généralement maximale des plus gros robots est d'environ 1000kg. Ce sont souvent des robots de transport où la précision n'est pas si importante. Dans le cas de plus grandes charges, les industries utilisent des grues intérieures. Le cas contraire existe aussi. Certains robots sont conçus pour manipuler des objets fragiles, ils doivent faire preuves de délicatesse dont la capacité de chargement est très basse. [5]

### ✓ **Vitesse**

Cette caractéristique représente la vitesse de déplacement du robot. C'est un paramètre qui pourrait devenir très important dans le cas d'une chaîne de production à haut débit. De plus, les robots les plus rapides et les plus précis sont souvent très coûteux. La capacité de chargement et la vitesse sont des caractéristiques très liées. Plus la capacité de chargement est grande plus la vitesse est réduite. [5]

### ✓ **Accélération**

L'accélération est le temps nécessaire que le robot va prendre pour arriver à sa vitesse maximale. Il ne faut pas oublier de prendre en compte les forces physiques qui ajoutent une grande accélération lors du choix d'un robot pour une tâche. Par exemple, on ne déplace pas un objet avec une très grande accélération si on vient tout juste d'y mettre de la peinture. De plus, il faut savoir qu'une grande accélération ne sera pas très utile dans le cas d'un mouvement qui change souvent de direction. [5]

### ✓ **Précision**

La précision est une caractéristique qui décrit la valeur d'erreur lorsque le robot se positionne à un point donné. Encore une fois, la capacité de chargement, la vitesse et l'accélération font beaucoup varier ce paramètre. Il faut aussi se souvenir que ce n'est pas toujours nécessaire d'avoir un robot très précis. Par exemple, un robot qui déplace un objet d'un convoyeur à un autre n'est pas obligé de positionner un objet très précisément, parce qu'il existe beaucoup d'autres moyens de faire un positionnement moins coûteux sur un convoyeur. [5]

### ✓ **Répétabilité**

La répétabilité est la propriété de pouvoir reproduire de manière fidèle une tâche préalablement apprise. L'erreur associée à la répétition de la même tâche sous la même charge peut provenir de la résolution des encodeurs ou des jeux dans le mécanisme. Ces derniers sont en général rendus aussi faibles que possible par une pré-charge des organes de transmission et des roulements à billes dans les paliers. La Répétabilité des manipulateurs industriels est en général assez bonne, de l'ordre de 0,2 à 0,1 mm; elle est toujours spécifiée par le constructeur. Notons ici que la stabilité thermique du robot peut avoir un effet non négligeable sur la Répétabilité. En effet, si, par suite de son fonctionnement. [3]

### ✓ **Commande de mouvement**

Pour décrire le mouvement, la plupart des robots suivent encore une liste d'instructions programmées par le responsable. Le robot peut exécuter plusieurs listes d'instruction ou encore qu'une seule à répétition. Dans des cas plus complexes, la liste d'instruction comprend les vitesses, l'accélération et la décélération. De plus en plus, nous voyons apparaître un nouveau type de commande de mouvement. Il se base un peu plus sur la programmation standard et intègre des détecteurs de proximité ou encore de l'intelligence artificielle. Ces nouvelles commandes de mouvement permettent une plus grande flexibilité ou encore une sécurité accrue. Par contre, la programmation d'un robot compatible avec ce genre de commande de mouvement est beaucoup plus complexe et longue qu'une liste d'instruction. [5]

### ✓ **Source d'alimentation**

L'alimentation des robots diffère. Certains robots utilisent des moteurs électriques et d'autres des vérins hydrauliques. Il est aussi à noter que certains robots manipulent des matières inflammables, donc le positionnement et la fiabilité de la source d'alimentation est très importante. [5]

### ✓ **Entraînement**

En général, les robots utilisent des moteurs électriques et des engrenages pour faire l'entraînement du mouvement. Il existe aussi des robots qui connectent directement le moteur électrique au mouvement. En fait, cette caractéristique décrit la façon que le robot crée son mouvement. Ce paramètre pourrait être utile lors de la planification de la maintenance par exemple. Le type d'engrenage varie beaucoup d'un robot à l'autre. Plus les engrenages sont gros, pour avoir de la puissance, plus l'effet de « backlash » a des chances de se produire. C'est aussi la raison pour laquelle les fabricants de robots utilisent souvent des engrenages de type harmonique. [5]

### ✓ **Respect**

Ce paramètre décrit de combien de degrés le robot devrait bouger lorsqu'il porte sa capacité de chargement maximale. En effet, si le robot transporte sa capacité de charge maximale, il se pourrait que le bras du robot soit un peu plus bas que la normale. Ce facteur est à prendre en compte lors de la conception en plaçant l'objet un peu plus haut que le point voulu. [5]

## 1.4.5. Classification des robots

### 1.4.5.1 Classification fonctionnelle [22]

L'A.F.R.I. distingue 4 classes illustrées ci-dessous :

**A** : robots manipulateurs télécommande ou à commande manuelle

**B** : quand le réglage se fait mécaniquement, on les appelle manipulateurs automatiques à cycles pré-réglés, la commande peut se faire par automate programmable.

**C** : la première génération de robots industriels nous donne les robots programmables.

**D** : les robots de seconde génération qui sont capable à utiliser des informations sur l'environnement est dite 'robot intelligents'. L'utilisation de l'intelligence artificielle donne les robots de troisième génération

Les robots chez les Européens et les Américains sont seul des classes C et D.

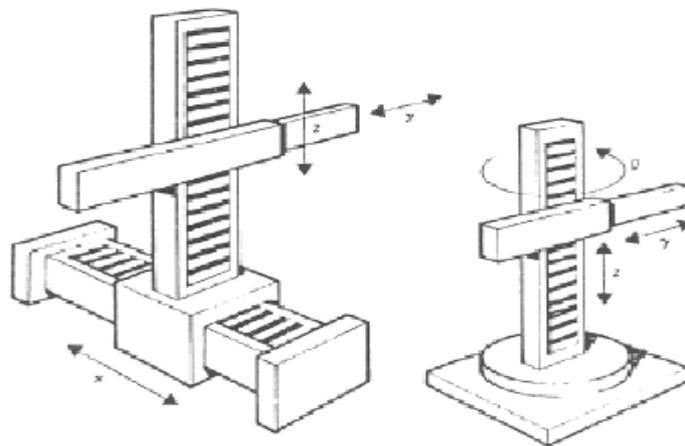
Les manipulateurs de classe B appellent 'pick and place' chez les Américains

### 1.4.5.2 Classification géométrique [22]

La configuration géométrique joue un rôle très important dans le classement des robots suivant leur l'architecture de leur porteur. Les combinaisons de translations et de rotations des 3 premiers ddl d'un robot réalisent plusieurs types de porteur, autrement dit par des articulations prismatiques (P) ou rotoïdes (R) ; en pratique, on n'utilise que 4 ou 5 d'entre elles :

— la première combinaison d'où les 3 articulations ont des mouvements identiques (translation TTT) nous donne un porteur cartésien.

— la deuxième combinaison d'où les 3 articulations ont un mouvement de rotation, translation axiale et une translation radiale (RTT) nous donne un porteur cylindrique.



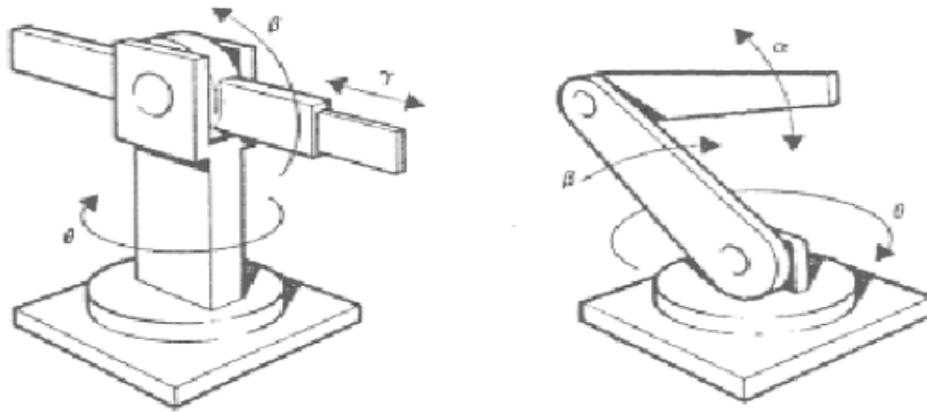
**Fig 1.12** : Coordonnées cartésiennes et cylindriques [22]

## Chapitre 1 : Généralité sur la robotique

---

— la troisième combinaison d'où les 3 articulations ont deux mouvements rotoïdes et une translation radiale (RRT) nous donne un porteur en coordonnées polaires.

— la quatrième combinaison d'où les 3 articulations ont des mouvements identiques (rotation RRR) dite anthropomorphe nous donne un porteur en coordonnées universelles.



**Fig 1.13 :** Coordonnées polaires et universelles [22].

— la cinquième combinaison on s'appelle cette architecture ‘‘ SCARA’’ qui a 4 articulations ont des mouvements rotationnels et prismatiques.



**Fig 1.14 :** Robot SCARA.[20]

### 1.4.5.3 Classification par génération

On retiendra 3 types de robot : [1]

- ❖ **Les robots manipulateurs :**
- ❖ **Les télémanipulateurs :**
- ❖ **Les robots :**

Pour cette dernière classe, on peut distinguer :

#### 1- **Les robots manipulateurs industriels**, chargés de manipuler, soient : [1]

- Des pièces : Stockage – déstockage.  
Palettisation – dé-palettisation.  
Chargement – déchargement de machine-outil.  
Manipulation d'éprouvettes.  
Assemblage de pièces,
- Des outils : Soudure en continu ou par points,  
Peinture,  
Collage,  
Ebavurage.

**2- Les robots didactiques:** ils sont utilisés pour effectuer des tests de faisabilité d'un poste robot. La technologie est différente, de même que les constructeurs. Ils ont un rôle de formation et d'enseignement. [1]

**3- 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 2 types de locomotion : Les robots marcheurs qui imitent la démarche humaine, et les robots mobiles qui ressemblent plus à des véhicules. [1]

### 1.4.6. Rôle et domaines d'application des robots

Le rôle premier d'un robot est d'effectuer des tâches répétitives et/ou précises. Les robots permettent également d'effectuer des tâches dans des environnements de travail trop dangereux pour l'Homme. [4]

Les robots peuvent effectuer des tâches automatiques, mais certains sont aussi dotés d'une certaine intelligence. Leurs facultés d'adaptation nécessitent des qualités de perception dans le but d'interagir avec leur environnement.

Les systèmes robotiques intéressent de très nombreux domaines civils et militaires. Les grands champs d'application de la robotique sont :

- ❖ La production manufacturière (usinage, assemblage, soudure, polissage, formage, etc.) : la diminution des coûts de productions et l'amélioration de sa qualité ainsi que de sa reproductibilité .
- ❖ Les interventions en milieux hostiles (sous-marin, nucléaire, exploration planétaire, etc.).
- ❖ Les systèmes de transport des biens et des personnes (véhicules intelligents, robots mobiles, etc.).
- ❖ L'aide et l'assistance aux personnes (robots personnels, aides techniques, etc.)
- ❖ Les nombreux domaines de la santé (chirurgie, rééducation, pharmaceutique etc.).
- ❖ Le ludique (robots jouets).

Ils prennent des formes très diverses du point de vue de leur structure mécanique et de leur commande. [4]

## 1.5. Description des robots manipulateurs sériels

Depuis quelques décennies, la recherche dans la robotique s'est concentrée presque entièrement sur la commande des robots manipulateurs. [7]

La plupart des robots industriels construits à ce jour est de type sériel, c'est-à-dire que leur structure mobile est une chaîne ouverte formée d'une succession de segments reliés entre eux par des liaisons à un degré de liberté qui peuvent être de type rotoïde ou prismatique dépendant du mouvement permis entre les deux articulations et qui peut être un mouvement de rotation ou un mouvement de translation. Chaque articulation est commandée par un actionneur situé à l'endroit de l'articulation ou sur un des segments précédents. [8]



**Fig1.15:** Le robot Kawasaki FS03N [11]

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

### 1.5.1. L'organe effecteur

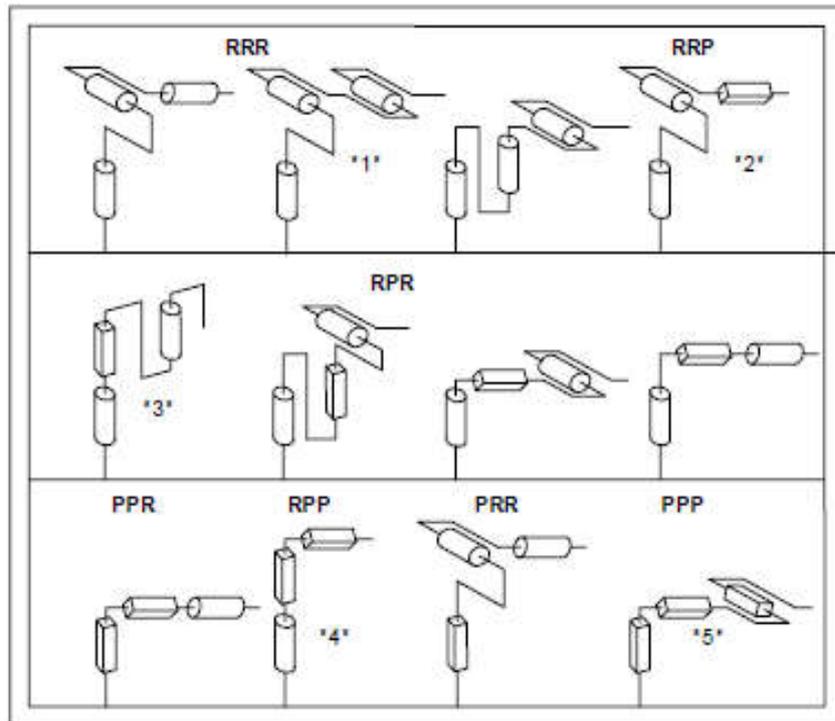
Un organe effecteur ou une pince ayant la forme d'une main est reliée au bras au moyen du poignet. Les positions articulaires  $\theta_i$  déterminent la configuration du bras à qui correspondent une position et une orientation unique de l'organe effecteur. [7]

### 1.5.2. Les sous ensemble constituant un robot

#### 1.5.2.1. Le porteur :

Structure mécanique articulée constituée des 3 premiers degrés de liberté à partir du bâti .Si P est un point de l'extrémité et R0 un repère lié au bâti, le rôle du porteur est de fixer la position de P dans R0. [7]

Les liaisons utilisées sont des liaisons pivot notées R ou prismatique notées P. Ainsi le nombre de combinaisons possibles est représenté dans le tableau suivant :



**Fig1.16:** Différentes combinaisons d'architectures du porteur. [7]

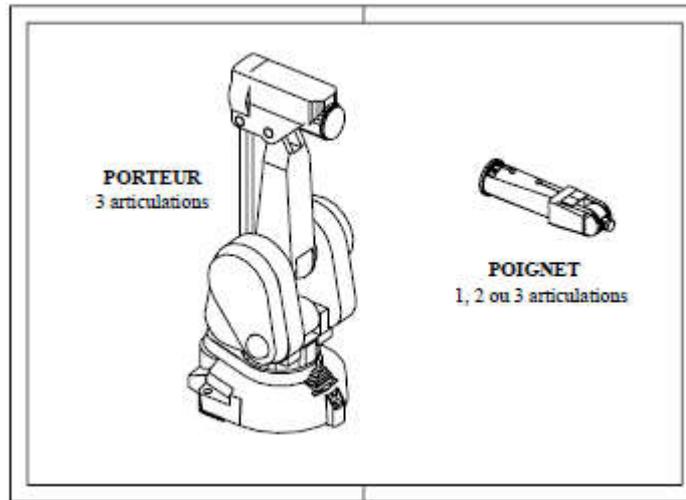
## 1.5.2.2. Le poignet

Il est constitué des degrés de liberté restant. Souvent la mécanique de ces éléments est beaucoup plus légère.

Il est destiné à l'orientation de la pince ou de l'outil porté par le robot.

La façon dont les liaisons motorisées sont réparties du bâti au poignet définit trois grandes classes d'architecture. [7]

- ❖ Architecture série (ou chaîne cinématique ouverte)
- ❖ Architecture parallèle (ou chaîne cinématique multi-boucle)
- ❖ Architecture mixte (série- parallèle ou parallèle –série)



**Fig1.17:** porteur-poignet [7]

### 1.5.3. L'espace de travail

L'espace de travail du manipulateur appelé aussi espace de la tâche est composé de tous les points qui peuvent être atteints par l'extrémité du bras ou un point quelconque de son poignet (pas nécessairement l'organe effecteur puisque ce dernier peut être un outil changeable). [7]

L'espace de travail est l'ensemble des positions et /ou orientations accessible par l'organe terminal du robot.

Le volume ou l'espace de travail d'un robot dépend généralement de trois facteurs :

- De la géométrie du robot,
- De la longueur des segments,
- Du débattement des articulations (limité par des butées).

### 1.5.4. Degrés de libertés

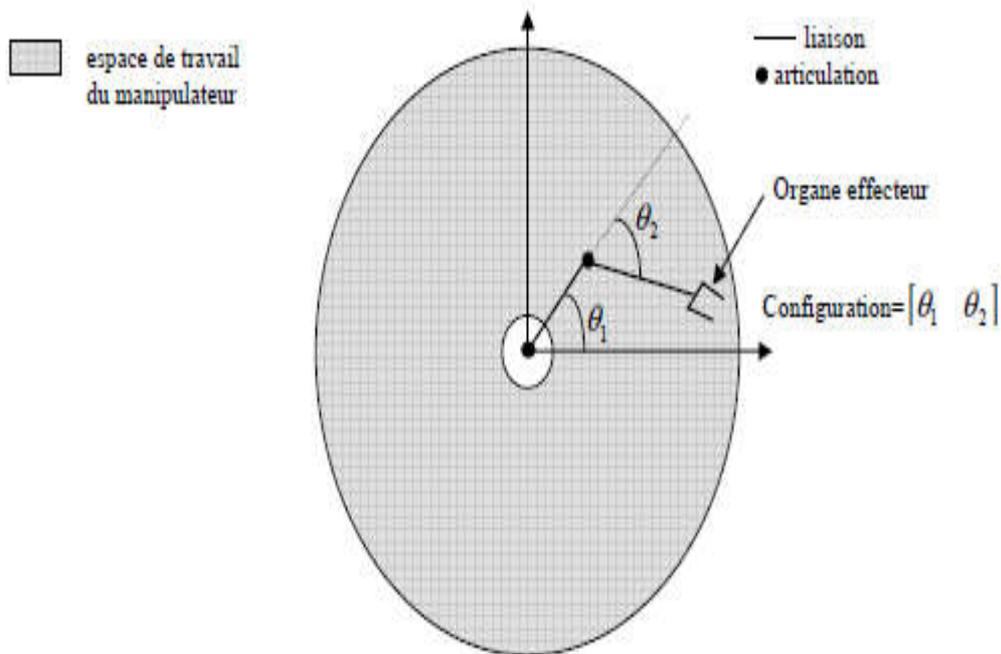
Un paramètre important d'un manipulateur est le nombre de degrés de libertés (nombre d'articulations) qu'il possède pour déplacer et orienter un objet dans un espace à trois dimensions. [7]

### 1.5.5. Le mécanisme

Un mécanisme doit avoir au moins six degrés de libertés dont trois pour positionner l'organe effecteur vers un point prescrit dans l'espace de la tâche du manipulateur et les trois autres pour l'orienter proprement à cette position, ainsi un bras ayant six articulations (six degrés de libertés).

La configuration articulaire correspondant à une position et une orientation données de l'organe effecteur peut être unique à quelques variations finies [7].

D'une part, le bras humain peut être considéré comme ayant six articulations principales permettant six mouvements dont deux se trouvent au niveau de l'épaule et deux autres existent au niveau du coude d'autre part, les deux derniers mouvements résident au niveau du poignet.



**Fig1.18:** Manipulateur plan à deux liaisons [7]

### 1.5.6. Redondance

Les bras robotiques peuvent être cinématiquement conçus redondants en leur conférant des degrés de libertés supplémentaires dans l'espace articulaire, ainsi un manipulateur est redondant quand le nombre  $n$  de ses articulation est supérieur à la dimension de l'espace de la tâche  $m$ .

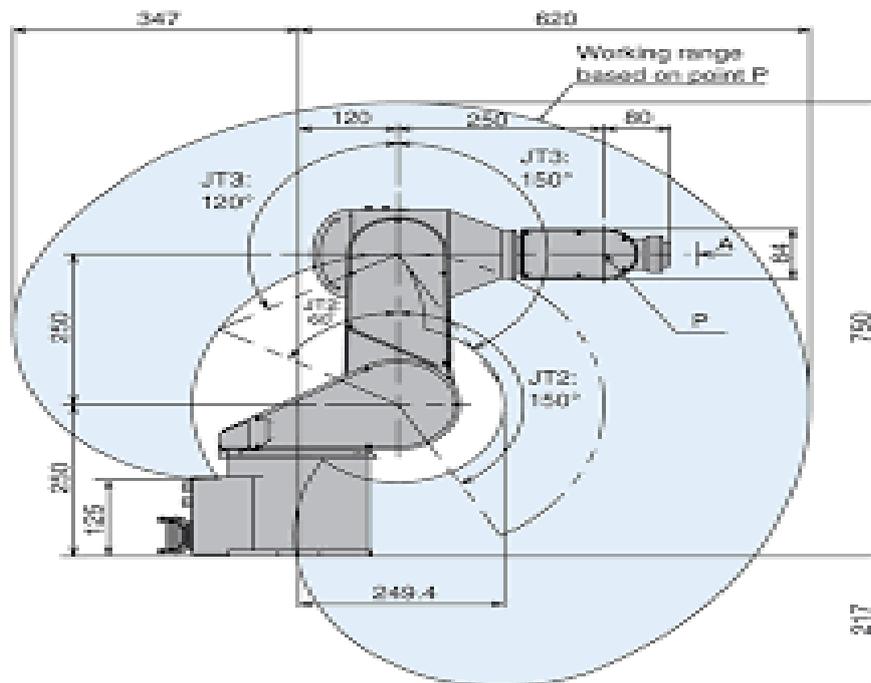
Un manipulateur redondant est caractérisé par le fait qu'il peut avoir un nombre infini de configurations au niveau articulaire correspondant à plus de positions de l'organe effecteur dans l'espace du travail. Alors que ce surplus de degrés de libertés complique la programmation et les stratégies de contrôle par contre il augmente considérablement l'utilité du robot. [7]

## 1.5.7. Espace de travail

L'espace de travail est l'ensemble des positions et /ou orientations accessible par l'organe terminal du robot.

Le volume ou l'espace de travail d'un robot dépend généralement de trois facteurs :

- De la géométrie du robot,
- De la longueur des segments,
- Du débattement des articulations (limité par des butées)



**Fig1.19: Espace de travail du robot Kawasaki FS03N. [35]**

## 1.5.8 Enveloppe de travail

L'espace de travail est défini comme le lieu des points pouvant être atteints par l'extrémité du bras (**fig 1.19**), ou un point du poignet. Nous reviendrons de manière plus précise sur cette définition dans la suite. La forme de l'espace de travail est conditionnée par la configuration de la Structure principale, c'est à dire le type d'articulations, leur orientation et la grandeur des liens. Il est limité par l'interférence géométrique entre les différents composants tels que les moteurs et les transmissions. [3]

### **1.6. Conclusion**

La structure mécanique d'un robot manipulateur est composée de plusieurs corps connectés les uns aux autres par des liaisons appelées articulations, à un seul degré de liberté de translation ou de rotation, cette structure mécanique peut constituer une chaîne cinématique continue ouverte simple, une chaîne arborescente ou une chaîne complexe. Une description détaillée du bras manipulateur Kawasaki FS03N fait l'objet du chapitre suivant en développant les modèles de notre robot.

# Modélisation, Description du robot

### 2.1 Introduction

Pour simuler le comportement du robot manipulateur, il est nécessaire de disposer une modélisation qui représente le mieux possible son comportement géométrique, cinématique et dynamique.

Ce chapitre résume les définitions de base et les étapes à suivre pour modéliser tout robot de même morphologie que le robot Kawasaki FS03N (anthropomorphe, ouvert, série).

### 2.2. Description du bras Kawasaki

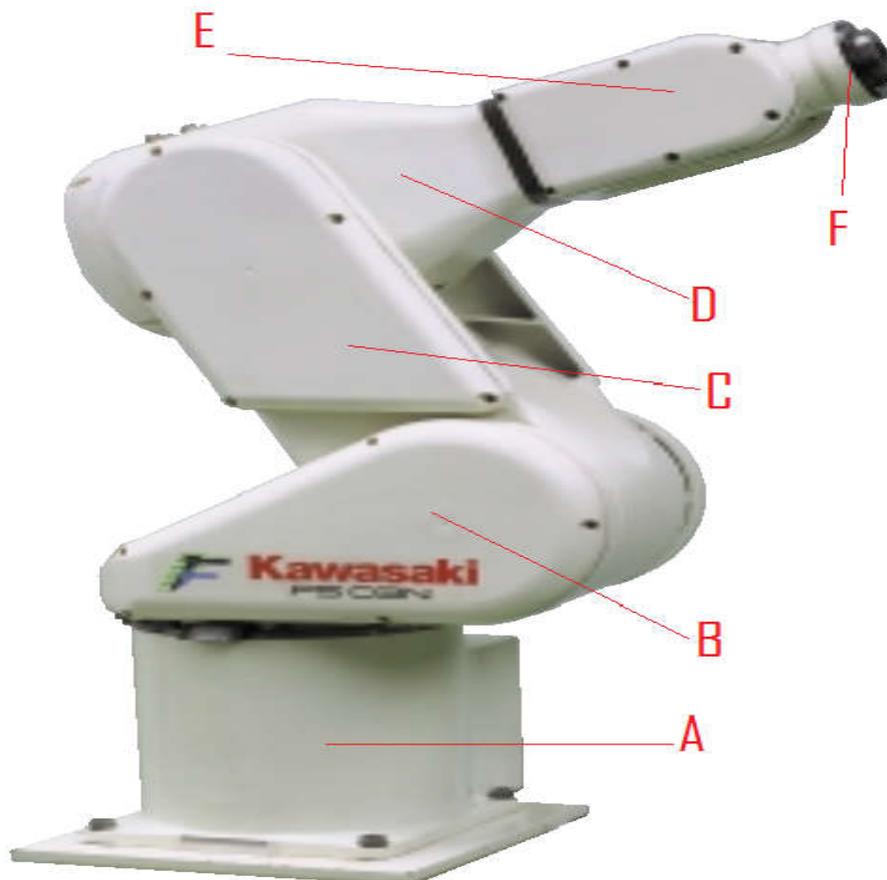
Le Kawasaki série FS03N montré dans (Fig 2.1) est un robot de haute qualité de formation, poly-articulés à chaîne ouverte simple série et ses articulations sont toutes rotoïdes [16] Ce robot dispose d'un mode d'apprentissage qui permet de répéter les mouvements réalisés librement à la main Il est constitué de :

- Sept corps notés  $C_0, \dots, C_6$  supposés rigides et qui sont : le pied, l'épaule, le bras, le coude, l'avant-bras, le doigt et le porte-outil (voir figure fig.2.1).
- Six articulations rotoïdes supposées idéales, ainsi, il possède 6 degrés de liberté (6 d.d.l.) :
  - Les 3 premiers d.d.l. forment le porteur du robot, appelé architecture anthropomorphe RRR.
  - les 3 derniers d.d.l. forment le poignet qui est composé de 3 axes concourants.

Le robot Kawasaki FS03N se compose, voir figure (fig 1.2), des organes mécaniques (A, B, C, D, E, F) et d'une baie de commande (H).

Le bras est constitué de segments reliés entre eux par des articulations. Chaque articulation constituée un axe autour duquel deux segments pivotent. Les mouvements des articulations du robot sont générés par des servomoteurs (moteur asservis) sans balais, couplés à des résolveurs [16].

Les différents éléments du bras du robot en basant sur la (fig 1.2), sont le pied (A), l'épaule (B), le bras (C), le coude (D), l'avant-bras (E) et le poignet (F) (voir figure ci-dessous).



*Fig2.1 : les composants du robot Kawasaki. [11]*

### 2.2.1. Quelques caractéristiques du robot Kawasaki (FS03N)

#### 2.2.1.1. Performance du robot

Nous allons citer l'ensemble de poses que l'effecteur du robot peut atteindre l'espace de travail. [11]

L'enveloppe de travail d'un robot sériel avec des articulations rotoïdes est définie par les longueurs des segments, la disposition des axes des articulations, les limites des articulations et les interférences mécaniques entre les différents segments. La plage de déplacement et la vitesse maximale pour chaque articulation sont montrées au tableau suivant :

Caractéristique	Valeur/nombre		
Nombre de degrés de liberté	6 d.d.l		
Portée maximale	6200mm		
Charge maximale	3kg		
Rotation des axes et vitesse maximal	axe	Plage de déplacement	Vitesse max
	JT1	$\pm 160^\circ$	360°/S
	JT2	$+150^\circ \sim -60^\circ$	250°/S

## Chabitre2 : Modélisation, Description du robot

	JT3	+120°~-150°	225°/S
	JT4	± 360°	540°/S
	JT5	±135°	225°/S
	JT6	±360°	540°/S
Répétabilité	±0,05 mm		
Vitesse linéaire max	6.000 mm/s		
Couple admissible et Inertie	Axe	Couple	Inertie
	JT4	5.8N.m	0.12 kg.m <sup>2</sup>
	JT5	5.8N.m	0.12 kg.m <sup>2</sup>
	JT6	2.9N.m	0.03 kg.m <sup>2</sup>
Contrôleur recommandé	D70		
Couleur	Muselle 10GY9/1 ou équivalaient		
Montage	au sol au plafond (installation au mur en option)		
Environnement d'installation	Température	0 à 45°C	
	Humidité	35 à 85 % (sans condensation ni gel)	
	Vibration	Inférieure à 0,5G	
	Divers	Le robot doit être installé dans un lieu dégagé de tout gaz ou liquide inflammables ou corrosifs et d'interférences électrique.	
circuit pneumatique	1 circuit à double distributeur		
indice de protection	IP54 IP65 (IP67 pour le poignet axes 5 et 6)		

**Tableau 2.1:** caractéristiques du robot Kawasaki (FS03N) [11]

### 2.3. Modélisation du robot

- 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). Parmi ces modèles, on distingue :
  - ❖ Les modèles géométriques direct et inverse qui expriment la situation de l'organe terminal en fonction de la configuration du mécanisme et inversement,
  - ❖ Les modèles cinématiques direct et inverse qui expriment la vitesse de l'organe terminal en fonction de la vitesse articulaire et inversement.
  - ❖ Les modèles dynamiques définissant les équations du mouvement du robot, qui permettent d'établir les relations entre les couples ou forces exercés par les actionneurs et les positions, vitesses et accélérations des articulations.

#### 2.3.1. Paramétrage de Denavit-Hartenberg [30]

Les paramètres de DH : sont les quatre paramètres associés à une convention particulière pour fixer les cadres de référence pour les liens d'une spatiale chaîne cinématique, ou le robot manipulateur.

➤ Jacques Denavit et Richard Hartenberg introduit cette convention en 1955 afin de normaliser les cadres de coordonnées

## Chabitre2 : Modélisation, Description du robot

---

Richard Paul a démontré sa valeur pour l'analyse cinématique de systèmes robotisés en 1981. Bien que de nombreuses conventions pour fixer références cadres ont été mis au point, la convention Denavit-Hartenberg reste l'approche standard.

Les paramètres de Denavit et Hartenberg sont quasi universellement adoptés par les roboticiens pour définir, avec un nombre minimum de paramètres, les matrices de transformations homogènes élémentaires qui permettent de passer du repère associé à un corps du robot au corps qui le suit dans la chaîne cinématique, les corps sont supposés parfaitement rigides et les articulations sont considérées comme idéales.

Un repère de référence  $R_i$  est assigné pour chaque corps  $C_i$  du robot à l'articulation  $i$  où elle rencontre le corps précédent  $C_{i-1}$ , ce repère est défini comme suit:

- L'axe  $Z_i$  se dirige le long de l'axe de l'articulation  $i$ .
- l'axe  $X_i$  est aligné suivant la direction de la perpendiculaire commune aux axes  $Z_i$  et  $Z_{i-1}$
- l'axe  $Y_i$ , non représenté sur la figure, est choisi de manière à former un trièdre orthonormé direct avec  $X_i$  et  $Z_i$ .

Les transformations élémentaires qui permettent d'exprimer le passage du repère  $R_{i-1}$  Au repère  $R_i$  sont :

- une translation  $d_i$  suivant  $x_{i-1}$  égale à la longueur de la perpendiculaire commune.
- une rotation d'angle  $\alpha_i$  autour de l'axe  $x_{i-1}$ .  $\alpha_i$  est l'angle entre  $z_{i-1}$  et  $z_i$ .
- une rotation d'angle  $\Theta_i$  autour de l'axe  $z_i$ .  $\Theta_i$  est l'angle entre l'axe  $x_{i-1}$  et l'axe  $X_i$ .
- une translation suivant l'axe  $z_i$ . L'amplitude de cette translation, notée  $r_i$ , est donnée par la distance (signée) entre l'axe  $x_{i-1}$  avec l'axe  $x_i$

En termes de matrice de transformation homogène, les quatre transformations élémentaires donnent la matrice suivante :

$${}^{i-1}T_i = \text{Rot}(X, \alpha_i) \text{Trans}(X, d_i) \text{Rot}(Z, \Theta_i) \text{Trans}(Z, r_i)$$

Après son développement, on obtient:

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} C\Theta_i & -S\Theta_i & 0 & d_i \\ C\alpha_i S\Theta_i & C\alpha_i C\Theta_i & -S\alpha_i & -r_i S\alpha_i \\ S\alpha_i S\Theta_i & S\alpha_i C\Theta_i & C\alpha_i & r_i C\alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Avec :  $C\Theta_i = \cos(\Theta_i)$  ET  $S\Theta_i = \sin(\Theta_i)$

$C\alpha_i = \cos(\alpha_i)$  ET  $S\alpha_i = \sin(\alpha_i)$

### 2.3.2. Repères et paramètres

La géométrie du robot est décrite dans la position où tous les axes sont à zéro. La méthode utilisée pour la description de la morphologie du robot est celle de Denavit-Hartenberg modifiée.

Dans le cas du Kawasaki (FS03N), toutes les articulations sont rotoïdes et on note :

$$q = [\theta_1 \theta_2 \theta_3 \theta_4 \theta_5 \theta_6]^T$$

Les dimensions géométriques du Kawasaki (FS03N), sont représentées dans la Fig (2.7), et les paramètres de Denavit-Hartenberg (D-H) sont montrés dans le (Tableau 2.2) .La masse

## Chabitre2 : Modélisation, Description du robot

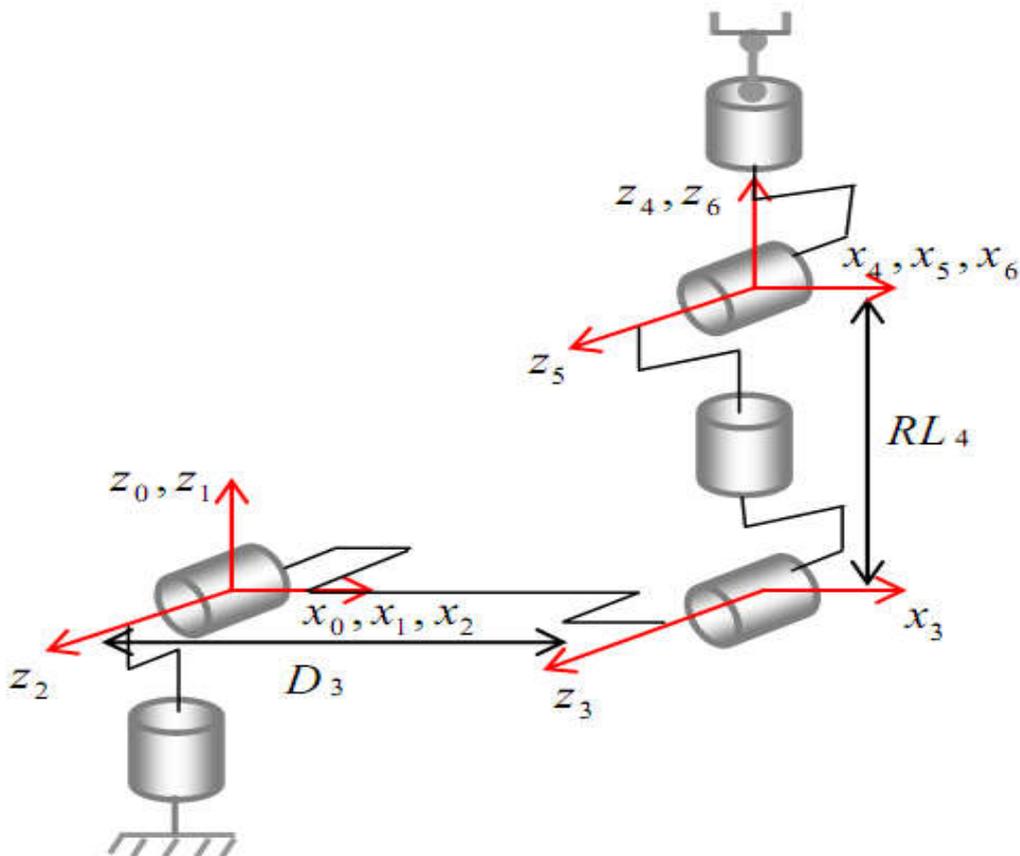
---

totale robot est d'environ 20Kg, par contre les masses des différents corps constitutifs sont des données confidentielles du constructeur.

<b>i</b>	$\sigma_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$	$r_i$
<b>1</b>	0	0	0	$\theta_1$	0
<b>2</b>	0	$-\pi/2$	0	$\theta_2$	0
<b>3</b>	0	0	$D_3$	$\theta_3$	0
<b>4</b>	0	$\pi/2$	0	$\theta_4$	$RL_4$
<b>5</b>	0	$-\pi/2$	0	$\theta_5$	0
<b>6</b>	0	$\pi/2$	0	$\theta_6$	0

**Tableau 2.2:** Paramètres de Denavit-Hartenberg (D-H) du Kawasaki (FS03N). [16]

La cinématique du porteur du bras Kawasaki est de type RRR et son poignet comporte trois rotations comme indique la figure suivante :



**Fig2.2:** Placement des repères et notations pour le robot Kawasaki (FS03N). [24]

## Chabitre2 : Modélisation, Description du robot

---

### 2.3.3. Modèle géométrique directe [16]

Le calcul du MGD conduit à identifier la matrice de transformation  ${}^0T_6$  entre  $R_0$  et  $R_6$ .

Les matrices de transformation du robot Kawasaki (FS03N) sont :

$C_i = \cos(\Theta_i)$  ;  $S_i = \sin(\Theta_i)$  avec  $i = 0 \dots 6$  ;

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} C1 & -S1 & 0 & 0 \\ S1 & C1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.1)$$

$${}^1T_0 = \begin{bmatrix} C1 & -S1 & 0 & 0 \\ C1 & S1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.2)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} C2 & -S2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -S2 & -C2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.3)$$

$${}^2T_1 = \begin{bmatrix} C2 & -S2 & 0 & -C2 \\ -S2 & -C2 & 1 & -S2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.4)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} C3 & -S3 & 0 & D_3 \\ S3 & C3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.5)$$

$${}^3T_2 = \begin{bmatrix} C3 & S3 & 0 & -D_3 \cdot C3 \\ -S3 & C3 & 0 & S3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.6)$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} C4 & -S4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -RL_4 \\ S4 & C4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.7)$$

$${}^4T_3 = \begin{bmatrix} C4 & 0 & S4 & 0 \\ -S4 & 0 & C4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -RL_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.8)$$

$${}^4T_5 = \begin{bmatrix} C5 & -S5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -S5 & -C5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.9)$$

$${}^5T_4 = \begin{bmatrix} C5 & 0 & -S5 & 0 \\ -S5 & 0 & -C5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.10)$$

$${}^5T_6 = \begin{bmatrix} C6 & -S6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ S6 & C6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.11)$$

$${}^6T_5 = \begin{bmatrix} C6 & 0 & S6 & 0 \\ -S6 & 0 & C6 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.12)$$

La transformation globale qui permet de passer du repère  $R_6$  lié à la pointe de l'instrument au repère  $R_0$  lié à la base du robot est

$$\text{Finalement, } {}^0T_6 = {}^0T_1 * {}^1T_2 * {}^2T_3 * {}^3T_4 * {}^4T_5 * {}^5T_6 = \begin{bmatrix} S_x & n_x & a_x & 0 \\ S_y & n_y & a_y & 0 \\ S_z & n_z & a_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_6^0 & & & \\ & P_6^0 & & \\ & & & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (2.13)$$

Avec:

$$S_x = C_1(C_{23}(C_4C_5C_6 - S_4S_6) - S_{23}S_5C_6) - S_1(S_4C_5C_6 + C_4S_6) \quad (2.14)$$

$$S_y = S_1(C_{23}(C_4C_5C_6 - S_4S_6) - S_{23}S_5C_6) + C_1(S_4C_5C_6 + C_4S_6) \quad (2.15)$$

$$S_z = S_{23}(C_4C_5C_6 - S_4S_6) + C_{23}S_5C_6 \quad (2.16)$$

$$n_x = C_1(-C_{23}(C_4C_5S_6 + S_4S_6) + S_{23}S_5C_6) + S_1(S_4C_5S_6 - C_4C_6) \quad (2.17)$$

$$n_y = S_1(-C_{23}(C_4C_5S_6 + S_4S_6) + S_{23}S_5C_6) + C_1(S_4C_5S_6 - C_4C_6) \quad (2.18)$$

$$n_z = -S_{23}(C_4C_5S_6 + S_4S_6) + S_{23}S_5C_6 \quad (2.19)$$

$$a_x = -C_1(C_{23}C_4S_5 + S_{23}C_5) + S_1S_4S_5 \quad (2.20)$$

$$a_y = -S_1(C_{23}C_4S_5 + S_{23}C_5) + C_1S_4S_5 \quad (2.21)$$

$$a_x = -S_{23}C_4S_5 + C_{23}C_5 \quad (2.22)$$

$$P_x = -C_1(S_{23}RL_4 + C_2D_3) \quad (2.23)$$

$$P_y = -S_1(S_{23}RL_4 + C_2D_3) \quad (2.24)$$

$$P_z = C_{23}RL_4 + S_2D_3 \quad (2.25)$$

$$\text{Avec: } C_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3) \text{ et } S_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3) \quad (2.26)$$

### 2.3.4. Modèles géométriques inverse du bras

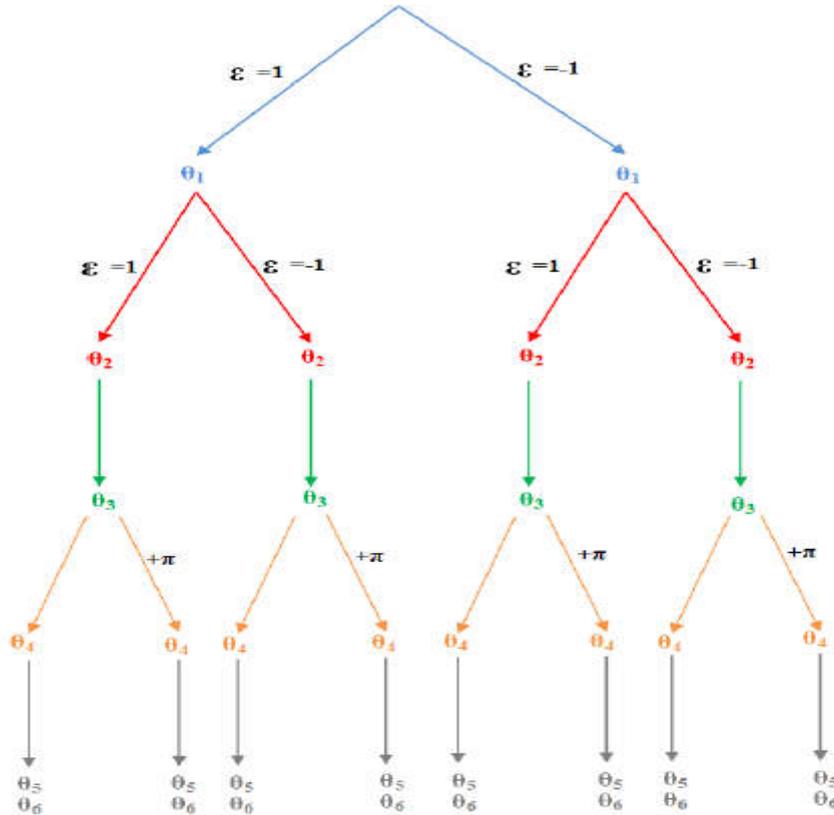
Le problème inverse consiste à calculer les coordonnées articulaires d'une situation donnée de l'organe terminale. Il existe plusieurs solutions du modèle géométrique inverse [24].

Plusieurs méthodes de calcul du MGI :

- La méthode de Raghavan et Routh.
- La méthode de Pieper.
- La méthode de Paul.
- Les méthodes de type Newton-Raphson.
- Les méthodes fondées sur le modèle différentielle inverse.
- Les méthodes fondées sur la transposée de la matrice Jacobienne.

Dans le calcul du MGI, trois cas se présentent :

- a) Absence de solution : la zone accessible du robot n'appartient pas la situation désirée.
- b) Infinité de solution :
  - Le robot est redondant vis-à-vis de la tâche.
  - Le robot est en configuration singulière.
- c) Solution en nombre fini : le nombre de solution dépend de l'architecture du robot manipulateur. Pour la classe 6R, le nombre maximum de solutions est de 16.



**Fig 2.3** les solutions du robot de classe 6R.[39]

Pour traiter le modèle géométrique inverse de notre bras nous avons utilisé la méthode de Paul car elle permet de traiter séparément chaque cas (chaque type du bras manipulateur) particulier et convient pour la plupart des robots industriels . Après ces calculs, on obtient les solutions suivantes:

- Calcule de  $\theta_1$  :

$$\theta_1 = a \tan_2(P_x, P_y) \tag{2.27}$$

- Calcule de  $\theta_2$  :

$$\theta_2 = a \tan_2(S_2, C_2) \tag{2.28}$$

$$\text{Avec } C_2 = \frac{YZ - \xi X \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}}{X^2 + Y^2} \tag{2.29}$$

$$\text{Et } S_2 = \frac{XZ + \xi X \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}}{X^2 + Y^2} \tag{2.30}$$

$$\xi = \pm 1$$

$$B_1 = P_x C_1 + P_z S_1$$

$$X = -2P_y D_3$$

$$Y = -2B_1 D_3$$

$$Z = (RL_4)^2 - (D_3)^2 + (P_z)^2 + (B_1)^2$$

- Calcule de  $\theta_3$  :

$$\theta_3 = \text{atan2}(p_z S_2 - B_1 C_2 + D_3 / RL_4, -B_1 S_2 + p_z C_2 / RL_4) \quad (2.31)$$

- Calcule de  $\theta_4$  :

$$\theta_4 = \text{atan2}(S_1 a_x - C_1 a_y, -C_{23}(C_1 a_x + C_1 a_y) - S_{23} a_z) \quad (2.32)$$

$$\theta_4 = \theta_4 + \pi$$

- Calcule de  $\theta_5$  :

$$\theta_5 = \text{atan2}(S_5, C_5) \quad (2.33)$$

$$S_5 = -C_4 [C_{23}(C_1 a_x + S_1 a_y) + S_{23} a_z] + S_4 (S_1 a_x - C_1 a_y) \quad (2.34)$$

$$C_5 = -S_{23}(C_1 a_x + S_1 a_y) + C_{23} a_z \quad (2.35)$$

- Calcule de  $\theta_6$  :

$$\theta_6 = \text{atan2}(S_6, C_6) \quad (2.36)$$

Avec

$$S_6 = -C_4 (S_1 s_x - C_1 s_y) - S_4 [C_{23}(C_1 s_x + S_1 s_y) + S_{23} s_z] \quad (2.37)$$

$$C_6 = -C_4 (S_1 n_x - C_1 n_y) - S_4 [C_{23}(C_1 n_x + S_1 n_y) + S_{23} n_z] \quad (2.38)$$

$$C_1 = \cos(\theta_1), S_1 = \sin(\theta_1)$$

$$C_4 = \cos(\theta_4), S_4 = \sin(\theta_4)$$

### 2.3.5. Modèle cinématique

Le Modèle Cinématique Direct (MCD) décrit les vitesses des coordonnées opérationnelles en fonction des vitesses articulaires [24]

$$\dot{X} = J(q) * \dot{q} = \begin{bmatrix} V_n \\ w_n \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

- $J(q)$  : désigne la matrice jacobéenne du mécanisme de dimension (mxn), égale à  $\frac{\partial X}{\partial q}$  ;
- $V_n$  : désigne la vitesse de translation de l'origine  $O_n$  du repère  $R_n$ , égale à est la dérivée par rapport au temps du vecteur  $OP_n$  ;
- $w_n$  : désigne la vitesse de rotation du repère  $R_n$ , mais n'est pas égale a la dérivée des Paramètres d'orientation [9]

- **Méthodes de calcul de la matrice jacobéenne [24]**

1- On peut calculer la matrice jacobéenne en dérivant le MGD ( $X = f(q)$ ) :

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i(q)}{\partial q_j} \quad (2.40)$$

$J_{ij}$  : est l'élément (i, j) de la matrice jacobéenne J ;  $i = 1, \dots, m$  et  $j = 1, \dots, n$ .

On évite cette méthode car son calcul est long et difficile à mettre en œuvre pour le FS03N qui possède 6 d.d.l. elle suppose également que la relation entre la vitesse angulaire et la dérivée des paramètres représentant la configuration angulaire soit introduite. [9]

2- la deuxième méthode consiste au calcul de la matrice jacobéenne de base qui est plus pratique dans le cas du FS03N.

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} V_n \\ w_n \end{bmatrix} = J_n \cdot \dot{q} = J_n \cdot \dot{O} \quad (2.41)$$

### Calcul du jacobéenne de base

On note :

$$\begin{cases} V_{k,n} = (a_k \Lambda L_{k,n}) \dot{q}_k \\ w_{k,n} = a_k \cdot \dot{q}_k \end{cases} \quad (2.42)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_n = \sum_{k=1}^n V_{k,n} = \sum_{k=1}^n (a_k \Lambda L_{k,n}) \dot{q}_k \\ w_n = \sum_{k=1}^n w_{k,n} = \sum_{k=1}^n a_k \cdot \dot{q}_k \end{cases} \quad (2.43)$$

Soient :

- $K$  l'indice de la  $k^{ème}$  articulation du robot ;

## Chabitre2 : Modélisation, Description du robot

---

- $V_{k,n}$  et  $w_{k,n}$  les vitesses de translation et de rotation induites par la vitesse  $\dot{q}_k$  sur le repère terminal  $R_n$  ;
- $L_{k,n}$  désigne le vecteur d'origine  $O_k$  et d'extrémité  $O_n$  ;
- $a_k$  est le vecteur unitaire porté par l'axe  $Z_k$  de l'articulation k.

On exprime, en général,  $V_n$  et  $w_n$  dans les bases des repères  $R_o$  et  $R_n$ . Les matrices jacobéennes Correspondantes sont  ${}^n J_n = {}^6 J_6$  et  ${}^0 J_n = {}^0 J_6$  Chaque colonne de la matrice  ${}^i J_6$  s'écrit (au point  $O_e$  et dans le repère  $R_i$ ) de la forme suivante :[9]

$${}^6 J_{6,k} = \begin{bmatrix} -P_{6y}^k s_k^i + P_{6x}^k n_k^i \\ a_k^i \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

- Nous illustrons le calcul par la matrice jacobéenne de base  ${}^6 J_6$  du robot Kawasaki (FS03N) à base du logiciel Maple:

$${}^6 J_{6,1} = \begin{bmatrix} -r3(C23(C4.C5.C6 - S4.S6) - S2.S5.C6) + (S23.r4 + d2 + d3.C2)(S4.C5.C6 + C4.S6) \\ -r3(C23(-C4.C5.S6 - S4.C6) + S23.S5.S6) + (S23.r4 + d2 + d3.C2)(-S4.C5.S6 + C4.C6) \\ -r3(C23.C4.S5 + S23.C5) + (S23.r4 + d2 + d3.C2)(S4.S5) \\ -S23(C4.C5.C6 - S4.S6) - C23.S5.C6 \\ -S23(-C4.C5.C6 - S4.S6) + C23.S5.C6 \\ -S23.C4.S5 + C23.C5 \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

$${}^6 J_{6,2} = \begin{bmatrix} C3.r4((C4.C5.C6 - S4.S6)C3 - S5.C6.S3) + (S3.r4 + d3)((C4.C5.C6 - S4.S6)S3 + S5.C6.C3) \\ C3.r4((-C4.C5.S6 - S4.C6)C3 + S5.S6.S3) + (S3.r4 + d3)((-C4.C5.S6 - S4.C6)S3 - S5.S6.C3) \\ C3.r4(C3.C4.S5 + S3.C5) + (S3.r4 + d3)(S3.C4.S5 - C3.C5) \\ S4.C5.C6 + C4.S6 \\ -S4.C5.S6 + C4.C6 \\ S4.S5 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

$${}^6 J_{6,3} = \begin{bmatrix} r4(C4.C5.C6 - S4.S6) \\ r4(-C4.C5.S6 - S4.C6) \\ r4(C4.S5) \\ S4.C5.C6 + C4.S6 \\ -S4.C5.S6 + C4.C6 \\ S4.S5 \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

$${}^6 J_{6,4} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -S5.C6 \\ S5.S6 \\ C5 \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

$${}^6 J_{6,5} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ S6 \\ C6 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

$${}^6 J_{6,6} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

### 2.3.6. Modèlen dynamique

Tandis que les équations cinématiques décrire le mouvement du robot sans considération des forces et des moments produisant le mouvement, les équations dynamiques décrivent explicitement le rapport entre les couples (et/ou forces) appliqués aux actionneurs et le mouvement (positions, vitesses et accélérations articulaires) [23].

Les principaux problèmes dans la dynamique du robot sont [32] :

**La dynamique directe** : (donner les forces et établir les accélérations), elle est employée principalement pour la simulation.

**La dynamique inverse** : (donner les accélérations, établir les forces), elle a des diverses utilisations, incluant : commande en ligne des mouvements et des forces de robot, conception de trajectoire et optimisation, conception du mécanisme du robot et le calcul des coefficients de l'équation du mouvement.

L'identification des paramètres inertiels.

**Notation** : Les principales notations utilisées sont les suivantes :

**$m_i$** : La masse du corps  **$C_i$**

**$g$**  : Accélération de la pesanteur.

**$L_{0,i}$**  : Vecteur d'origine  **$O_0$**  et d'extrémité  **$O_i$**  égal à  ${}^{0P_i}$ .

**$L_i$**  : Vecteur d'origine  **$O_{i-1}$**  et d'extrémité  **$O_i$**  égal à  ${}^{i-1P_i}$

**$\omega_i$**  et  **$\dot{\omega}_i$**  : vitesse et accélération de rotation du corps  **$C_i$** .

**$V_i$**  et  **$\dot{V}_i$**  : vitesse et accélération du point  **$O_i$**

**$V_{G_i}$**  et  **$\dot{V}_{G_i}$**  : vitesse et accélération du centre de gravité ( **$G_i$** ) du corps  **$C_i$**

**$a_i = [0 \ 0 \ 1]^T$**

**$F_i$**  : Résultante des forces extérieures sur le corps  **$C_i$** .

**$C_i$**  : Moment des efforts extérieurs exercés sur le corps  **$C_i$**  autour de  **$O_i$** .

**$S_i$**  : Vecteur d'origine  **$O_i$**  et d'extrémité  **$G_i$** .

**$\hat{h}$**  : Le tenseur du vecteur  **$h$**

$\times$  : désigne le produit vectoriel.

**$K_i$**  : Tenseur d'inertie du corps  **$C_i$**  par rapport au repère  **$R_i$**

**$I_{G_i}$**  : Tenseur d'inertie du corps  **$C_i$**  par rapport à un repère parallèle à  **$R_i$**  et d'origine  **$G_i$** .

**$f_i$**  et  **$c_i$**  : résultante et moment du torseur dynamique exercé sur le corps  **$C_i$**  par son antécédent et par l'actionneur  **$i$** .

**$f_{e_i}$**  et  **$c_{e_i}$**  : résultante et moment du torseur dynamique exercé par le corps  **$C_i$**  sur l'environnement.

**$F_s$**  et  **$F_v$**  : les paramètres de frottement sec et visqueux de l'articulation  **$i$** .

### 2.3.7. Le modèle dynamique inverse (MDI)

Le modèle dynamique inverse d'un robot permet de déterminer les équations du mouvement, c'est-à-dire : la relation entre les couples appliqués aux actionneurs et les positions, vitesses et accélérations articulaires [32].

Il est exprimé sous la forme :

$$\Gamma = f(q, \dot{q}, \ddot{q}, f_e) \quad (2.51)$$

Les deux principaux formalismes utilisés pour obtenir les équations différentielles qui décrivent le comportement d'un mécanisme à plusieurs corps articulés sont le formalisme de Newton et celui de Lagrange [23].

### 2.7. Formalisme de Newton-Euler

Cette méthode est fondée sur une double récurrence ; la récurrence avant de la base du robot vers l'effecteur, calcule successivement les vitesses et l'accélération des corps, puis leur torseur dynamique, une récurrence arrière de l'effecteur vers la base, permet le calcul des couples des actionneurs en exprimant pour chaque corps le bilan des efforts. [14], [23], [24]

Les équations de Newton-Euler expriment le torseur dynamique en  $\mathbf{G}_i$  des efforts extérieurs sur un corps  $i$  par les équations :

$$\begin{cases} F_i = m_i \dot{V}_{G_i} \\ C_{G_i} = I_{G_i} \dot{\omega}_i + \omega_i \times (I_{G_i} \omega_i) \end{cases} \quad (2.52)$$

Cette méthode permet d'obtenir un **MDI** non linéaire par rapport aux paramètres inertiels, pour qu'il soit linéaire, le **MDI** doit être calculé en exprimant le torseur dynamique des efforts extérieurs en  $O_i$  plutôt que  $G_i$ .

Les équations de Newton-Euler ainsi modifiées s'écrivent :

$$\begin{cases} F_i = m_i \dot{V}_{G_i} + \dot{\omega}_i m_i S_i + \omega_i \times (\omega_i \times m_i S_i) \\ C_i = K_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times (K_i \omega_i) + m_i S_i \times \dot{V}_i \end{cases} \quad (2.53)$$

➤ Récurrence avant : elle permet de calculer  $\mathbf{F}_i$  et  $\mathbf{C}_i$  à partir de la relation (2.53).

Pour ce faire, il faut calculer  $\boldsymbol{\omega}$ ,  $\dot{\boldsymbol{\omega}}$  et  $\dot{\mathbf{V}}$ .

Les formules de composition des vitesses donnent :

$$\begin{cases} \omega_i = \omega_{i-1} + \bar{\sigma}_i \dot{q}_i a_i \\ V_i = V_{j-1} + (\omega_{i-1} \times {}^{i-1}P_i) + \sigma_i \dot{q}_i a_i \end{cases} \quad i=1, \dots, n \quad (2.54)$$

La dérive de l'équation (2.54) par rapport au temps s'écrit:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_i = \dot{\omega}_{i-1} + \bar{\sigma}_i (\ddot{q}_i a_i + \omega_{i-1} \times \dot{q}_i a_i) \\ \dot{V}_i = \dot{V}_{j-1} + (\dot{\omega}_{i-1} \times {}^{i-1}P_i) + \omega_{i-1} \times (\omega_{i-1} \times {}^{i-1}P_i + \sigma_i \dot{q}_i a_i) + \sigma_i (\ddot{q}_i a_i + \omega_{i-1} \times \dot{q}_i a_i) \end{cases} \quad i=1, \dots, n. \quad (2.55)$$

Ce qui donne :

$$\dot{V}_i = \dot{V}_{j-1} + (\dot{\omega}_{i-1} \times {}^{i-1}P_i) + \omega_{i-1} \times (\omega_{i-1} \times {}^{i-1}P_i) + \sigma_i (\ddot{q}_i a_i + 2\omega_{i-1} \times \dot{q}_i a_i) \quad (2.56)$$

On peut finalement calculer  $\mathbf{F}_i$  et  $\mathbf{C}_i$ , on initialise cette récurrence par  $\omega_0 = 0$ ,  $\dot{V}_0 = 0$ ,  $\omega_0 = 0$

➤ Récurrence arrière : les équations composant la récurrence arrière sont obtenues à partir du bilan des efforts sur chaque corps, écrit à l'origine  $\mathbf{O}_i$ .

$$\begin{cases} F_i = f_i + f_{i+1} + m_i g - f_{ei} \\ C_i = c_i - c_{i+1} - L_{i+1} \times f_{i+1} + S_i \times m_i g - c_{ei} \end{cases} \quad (2.57)$$

On peut faire intervenir l'effet de la gravité sans avoir à la prendre en compte dans le bilan des efforts, pour cela on prend :

$$\dot{V}_0 = -g$$

D'où l'on tire les équations suivantes :

$$\begin{cases} f_i = F_i + f_{i+1} + f_{ei} \\ c_i = C_i + c_{i+1} + L_{i+1} \times f_{i+1} + c_{ei} \end{cases} \quad (2.58)$$

On obtient alors les couples aux actionneurs  $\Gamma_i$  en projetant, suivant la nature de l'articulation  $\mathbf{i}$ , les vecteurs  $f_i$  ou  $c_i$  sur l'axe du mouvement :

$$\Gamma_i = (\sigma_i f_i + \bar{\sigma}_i c_i)^T a_i \quad (2.59)$$

Les frottements doivent être pris en compte dans l'équation dynamique. Le modèle du type frottement fait l'hypothèse d'un constant de frottement en opposition au mouvement [23]. Au début du mouvement, un couple supérieur au couple de frottement sec doit être développé pour amorcer le mouvement. De nombreuses études ont été réalisées afin de mieux analyser les frottements, menant à l'approximation suivante :

$$\Gamma_f = \text{Diag}[\text{Sign}(\dot{q}_i)]F_s + \text{Diag}(\dot{q}_i)F_v \quad (2.60)$$

On ajoute à l'équation (2.59) les termes correctifs représentant l'effet des frottements et des inerties des actionneurs,  $\mathbf{I}_{ai}$ , ce qui nous donne la relation suivante :

$$\Gamma_i = (\sigma_i f_i + \bar{\sigma}_i c_i)^T a_i + T_{fi} + I_{ai} \ddot{q}_i \quad (2.61)$$

Les inerties des actionneurs sont calculées comme suit [23] :

$$I_{ai} = N_i^2 J_{mi} \quad (2.62)$$

$\mathbf{J}_{mi}$  est le moment d'inertie du rotor de l'actionneur  $\mathbf{i}$ ,  $N_i$  est le rapport de réduction de l'axe  $\mathbf{i}$  égale à  $q_{mi}/\dot{q}_i$  et  $\mathbf{q}_{mi}$  désigne la vitesse du rotor de l'actionneur  $\mathbf{i}$ .

Pour utiliser pratiquement l'algorithme de Newton-Euler exposé ci-dessus, il faut projeter dans un même repère les vecteurs et tenseurs qui apparaissent dans une même équation [23].

Les équations de la récurrence avant peuvent être présentées par l'algorithme suivant :

➤ **Récurrence avant :**

Conditions initiales :  ${}^0\omega_0 = [0 \ 0 \ 0]^T$ ,  ${}^0\dot{\omega}_0 = [0 \ 0 \ 0]^T$  et  ${}^0\dot{V}_0 = -ga_i$

Do  $i=1,2,\dots, n$

$${}^i\omega_{i-1} = {}^iA_{i-1} {}^{i-1}\omega_{i-1}$$

$${}^i\omega_i = {}^i\omega_{i-1} + \bar{\sigma}_i \dot{q}_i a_i$$

$${}^i\dot{\omega}_i = {}^iA_{i-1} {}^{i-1}\dot{\omega}_{i-1} + \bar{\sigma}_i ({}^i\omega_{i-1} \times \dot{q}_i a_i + \ddot{q}_i a_i)$$

$${}^i\dot{V}_i = {}^iA_{i-1} ({}^{i-1}\dot{V}_{i-1} + {}^{i-1}b_{i-1} {}^{i-1}P_i) + \sigma_i (2{}^i\omega_{i-1} \times \dot{q}_i a_i + \ddot{q}_i a_i)$$

$${}^iF_i = m_i {}^i\dot{V}_i + {}^i b_i m_i S_i$$

$${}^iC_i = {}^iK_i {}^i\dot{\omega}_i + {}^i\omega_i \times ({}^iK_i {}^i\omega_i) + m_i S_i \times {}^i\dot{V}_i$$

End do

$${}^l b_l = {}^i\hat{\omega}_i + {}^i\hat{\omega}_i {}^i\hat{\omega}_i$$

Les équations de la récurrence arrière peuvent être présentées par l'algorithme suivant :

➤ **Récurrence arrière :**

Conditions initiales :

$${}^n f_{n+1} = f_e(1:3) \quad {}^n c_{n+1} = f_e(4:5)$$

Do i=n,n-1,..., 1

$${}^i f_i = {}^i F_i + {}^i f_{i+1} + {}^i f_{ei}$$

$${}^{i-1} f_i = {}^{i-1} A_i {}^i f_i$$

$${}^i c_i = {}^i C_i + {}^i C_{i+1} + {}^i P_{i+1} \times {}^i f_{i+1} + {}^i c_{ei}$$

$${}^{i-1} c_i = {}^{i-1} A_i {}^i c_i$$

$$\Gamma_i = (\sigma_i {}^i f_i + \bar{\sigma}_i {}^i c_i)^T a_i + \Gamma_{fi} + I_{ai} \ddot{q}_i$$

End do

### 2.8. Conclusion

Dans le cadre de ce chapitre, on a pu décrire les différents éléments constitutifs de bras manipulateur Kawasaki FS03N .une modélisation développée du bras est établi. Des équations de couple sont calculées utilisant l'un des formalismes les plus utilisés pour le calcul du modèle dynamique du robot manipulateur ; il s'agit du formalisme de Newton-Euler, qui se base sur un calcul de double récurrence

- La récurrence avant : calcule successivement les vitesses et accélérations des corps, puis les torseurs des efforts extérieurs.
- Une récurrence arrière : calcule des couples des actionneurs.

# Présentation du logiciel RoboDK et application

### 3.1. Introduction

Dans le présent chapitre nous donnons un aperçu sur logiciel RoboDK, puis faire une animation du robot Kawasaki FS03N sur se dernier. Ce logiciel nous a permet de réaliser des mouvements et des positions de l'outil afin de déterminer l'espace de travail.

### 3.2. Logiciel de présentation RoboDK

RoboDK est un logiciel de simulation et de programmation hors ligne. La programmation hors ligne signifie que des programmes de robot peuvent être créés, simulés et générés hors ligne pour un bras de robot et un contrôleur de robot spécifiques. RoboDK peut vous aider dans les opérations de fabrication impliquant des robots industriels.

Le logiciel RoboDK intègre la simulation de robot et la programmation hors ligne pour les robots industriels. Proposez des solutions pour toutes les applications industrielles, des applications d'usinage robotisé au pick and place.

RoboDK. Le package permet de créer des simulations pour des robots industriels, des mécanismes spécifiques et de générer des programmes spécifiques à un fournisseur pour des robots. Bien que l'interface utilisateur graphique de RoboDK puisse être utilisée pour créer des programmes, il est possible d'étendre les limitations du contrôleur de robot en utilisant Python.

#### 3.2.1. Description du logiciel



Fig3.1 : logiciel RoboDK

## Chapitre3: Présentation du logiciel RoboDK et application

Les commandes suivantes sont disponibles dans la barre d'outils par défaut.



Charger un nouveau fichier.



Ouvrir une bibliothèque en ligne.



Ajouter un cadre de référence.



Ajouter une nouvelle cible.



Déplacer les images de référence.



Ajouter une instruction de mouvement d'articulation.



Déplacer l'instruction linéaire.



Ajouter une instruction de mouvement circulaire.



Déplacer TCP (outil robot).

### 3.3 Volume de travail du robot

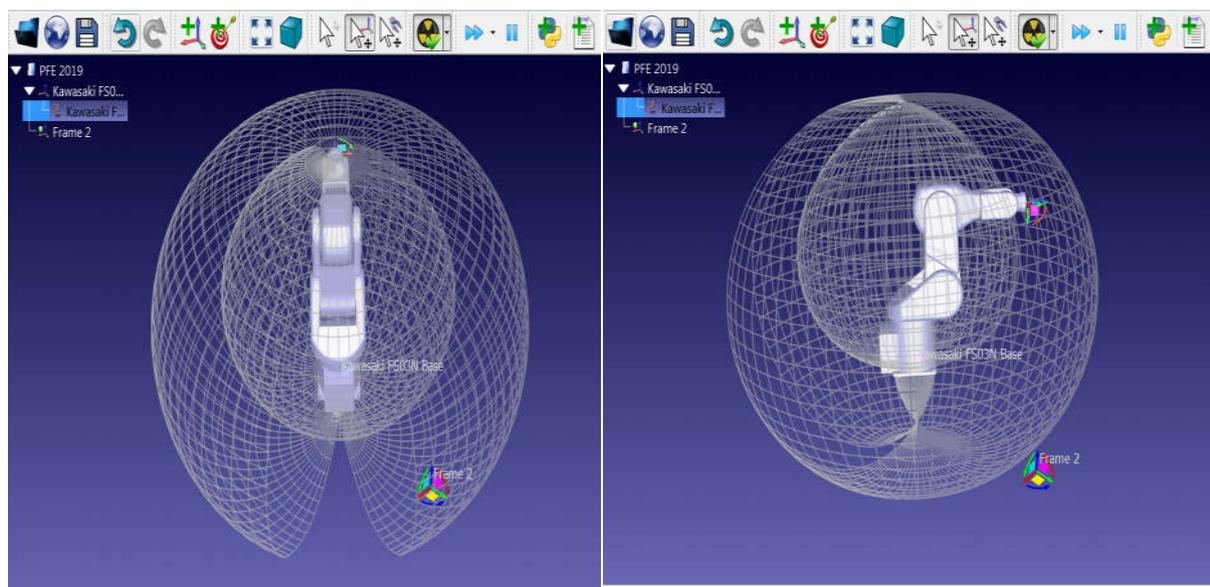


Fig3.2. le volume atteignable par le robot Kawasaki.

### 3.4 Simulation avec logiciel RoboDK

Le MGD donne la configuration de l'organe terminal du robot par rapport à la position de chaque articulation du robot.

Les calculés suivantes se fait utilisant logiciel « scientifique WorkPlace ».

Le MGD s'obtient par la relation suivant :

$$T_6^0 = T_1^0 * T_2^1 * T_3^2 * T_4^3 * T_5^4 * T_6^5$$

$$T_6^0 = \begin{pmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_2 & -\cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & 120 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot$$

$$\begin{pmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 500 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\theta_5 & -\sin\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_5 & -\cos\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos\theta_6 & -\sin\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin\theta_6 & \cos\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

#### 3.4.1. Position accueil

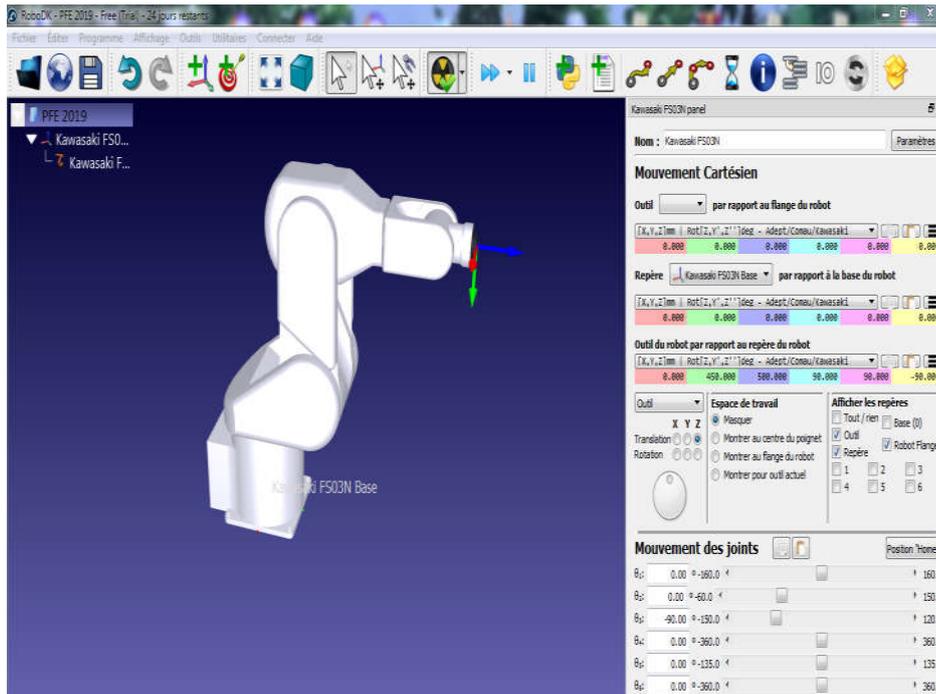
$$\theta_1 = 0^\circ ; \quad \theta_2 = 0^\circ ; \quad \theta_3 = -90^\circ ; \quad \theta_4 = 0^\circ ; \quad \theta_5 = 0^\circ ; \quad \theta_6 = 0^\circ .$$

On va calculer  $T_6^0$  utilisant les angles ( $\theta_i$ ) proposé :

$$T_6^0 = \begin{pmatrix} \cos(0) & -\sin(0) & 0 & 0 \\ \sin(0) & \cos(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(0) & -\sin(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin(0) & -\cos(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(-90) & -\sin(-90) & 0 & 120 \\ \sin(-90) & \cos(-90) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot$$

$$\begin{pmatrix} \cos(0) & -\sin(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 500 \\ \sin(0) & \cos(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(0) & -\sin(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin(0) & -\cos(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(0) & -\sin(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(0) & \cos(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_6^0 = \begin{pmatrix} -0.4481 & -0.4006 & 0.7992 & 519.615 \\ 0.4006 & 0.7093 & 0.5801 & 290.0320 \\ -0.7992 & 0.5801 & -0.1573 & -78.672 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



**Fig3.3 :** position d'accueil du robot Kawasaki FS03N.

### 3.4.2. Premier mouvement

$$\theta_1 = 0^\circ ; \quad \theta_2 = 0^\circ ; \quad \theta_3 = 0^\circ ; \quad \theta_4 = 0^\circ ; \quad \theta_5 = 0^\circ ; \quad \theta_6 = 0^\circ .$$

On va calculer  $T_6^0$  utilisant les angles  $(\theta_i)$  proposé :

$$T_6^0 = \begin{pmatrix} \cos(0) & -\sin(0) & 0 & 0 \\ \sin(0) & \cos(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(0) & -\sin(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin(0) & -\cos(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(0) & -\sin(0) & 0 & 120 \\ \sin(0) & \cos(0) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \cos(0) & -\sin(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 500 \\ \sin(0) & \cos(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(0) & -\sin(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin(0) & -\cos(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(0) & -\sin(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(0) & \cos(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_6^0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 120 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 500 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

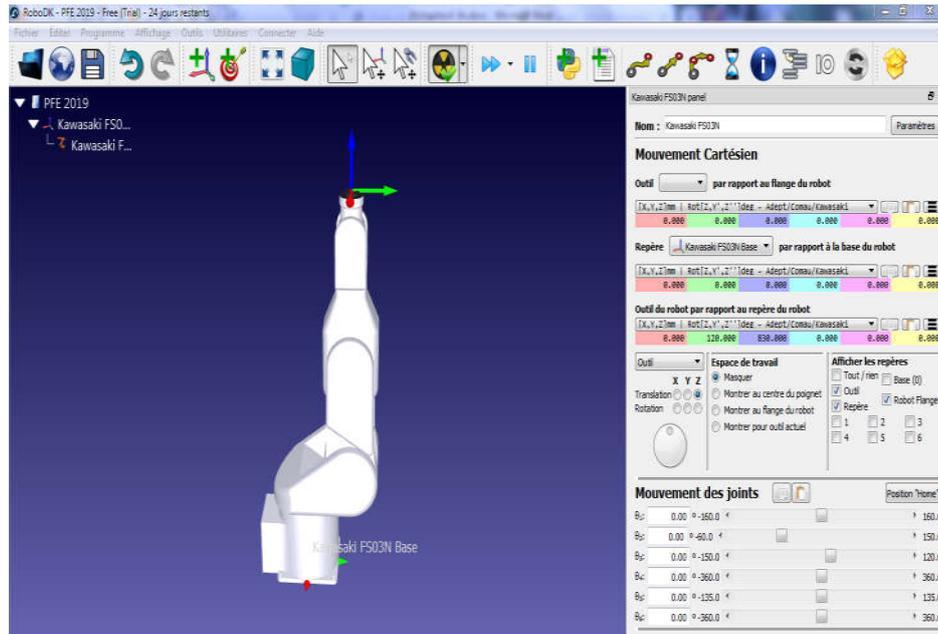


Fig3.4 : position verticale du robot Kawasaki FS03N.

### 3.4.3. Deuxième mouvement

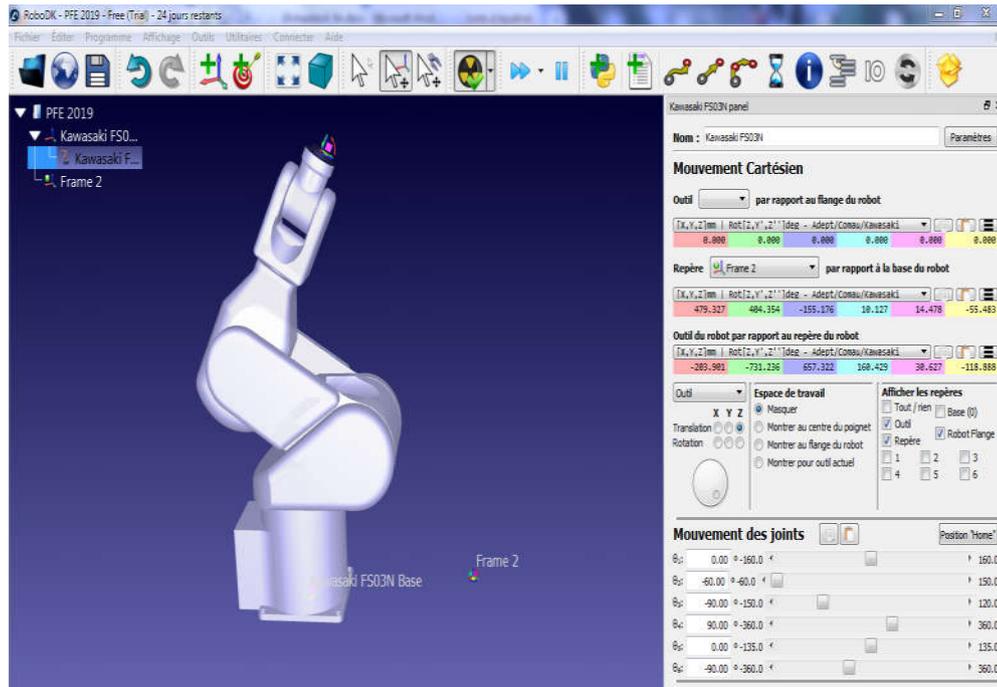
$$\theta_1 = 0^\circ ; \theta_2 = -60^\circ ; \theta_3 = -90^\circ ; \theta_4 = 90^\circ ; \theta_5 = 0^\circ ; \theta_6 = -90^\circ.$$

On va calculer  $T_6^0$  utilisant les angles ( $\theta_i$ ) proposé :

$$T_6^0 = \begin{pmatrix} \cos(0) & -\sin(0) & 0 & 0 \\ \sin(0) & \cos(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(-60) & -\sin(-60) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin(-60) & -\cos(-60) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(-90) & -\sin(-90) & 0 & 120 \\ \sin(-90) & \cos(-90) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \cos(90) & -\sin(90) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 500 \\ \sin(90) & \cos(90) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(0) & -\sin(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin(0) & -\cos(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(-90) & -\sin(-90) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(-90) & \cos(-90) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_6^0 = \begin{pmatrix} 0.6993 & 0.3203 & -0.6391 & -433.8381 \\ -0.3203 & 0.9396 & 0.1205 & 43.8472 \\ 0.6391 & 0.1205 & 0.7596 & 412.5161 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$



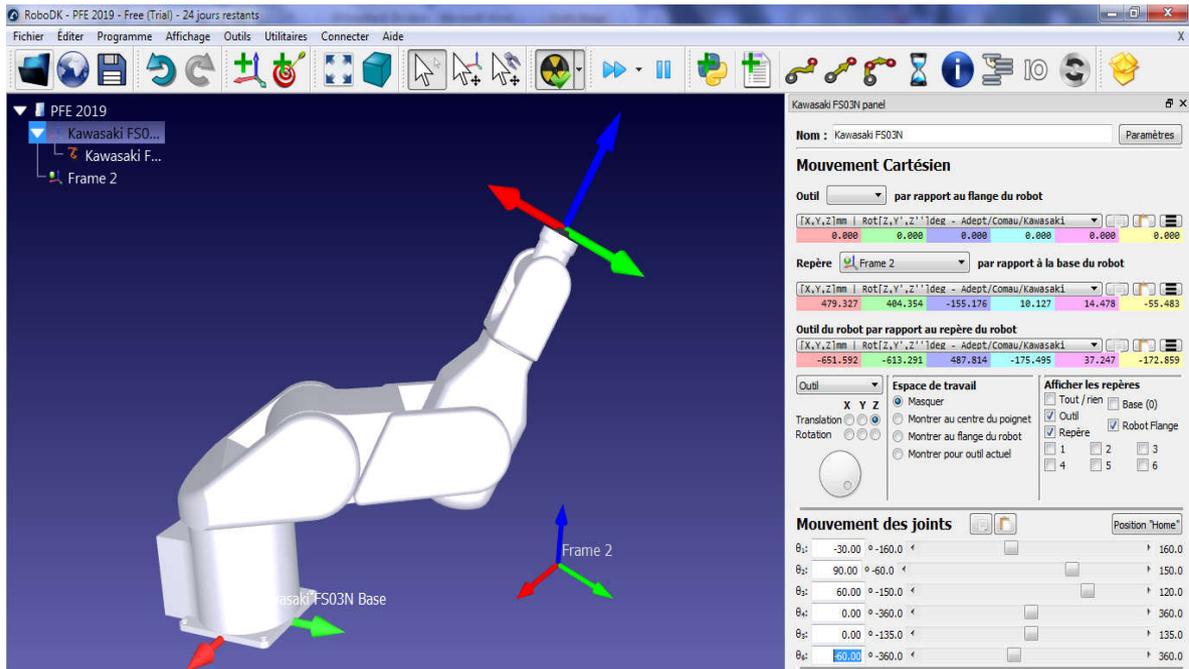
**Fig3.5** : position deux du robot Kawasaki FS03N.

### 3.4.4. Troisième mouvement

$$\theta_1 = -30^\circ ; \quad \theta_2 = 90^\circ ; \quad \theta_3 = 60^\circ ; \quad \theta_4 = 0^\circ ; \quad \theta_5 = 0^\circ ; \quad \theta_6 = -60^\circ.$$

On va calculer  $T_6^0$  utilisant les angles ( $\Theta_i$ ) proposé :

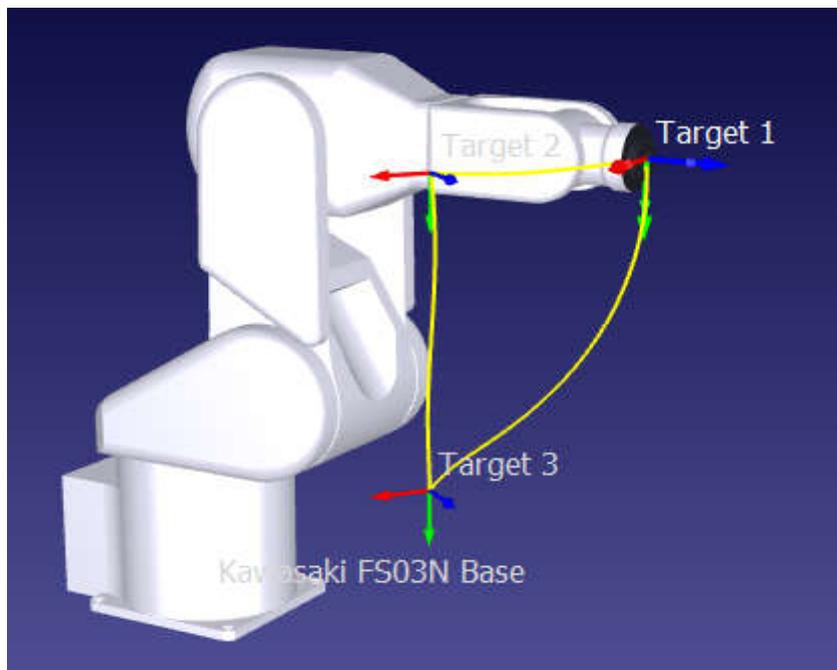
$$\begin{aligned}
 T_6^0 &= \begin{pmatrix} \cos(-30) & -\sin(-30) & 0 & 0 \\ \sin(-30) & \cos(-30) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(90) & -\sin(90) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin(90) & -\cos(90) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(60) & -\sin(60) & 0 & 120 \\ \sin(60) & \cos(60) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} \cos(0) & -\sin(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 500 \\ \sin(0) & \cos(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(0) & -\sin(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin(0) & -\cos(0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(-60) & -\sin(-60) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(-60) & \cos(-60) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 T_6^0 &= \begin{pmatrix} -0.0993 & 0.9948 & -0.0204 & 28.9752 \\ -0.7574 & -0.0623 & 0.65 & 264.4756 \\ 0.6454 & 0.0801 & 0.7596 & 475.7237 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$



**Fig3.6 :** position trois du robot Kawasaki FS03N.

Les figures (3.4) (3.5) (3.6) représente trois position choisies, les angles des articulations sont données,

### 3.5. Simulation avec le robot Kawasaki FS03N



**Fig3.7 :** premier position du robot Kawasaki FS03N.

## Chapitre3: Présentation du logiciel RoboDK et application

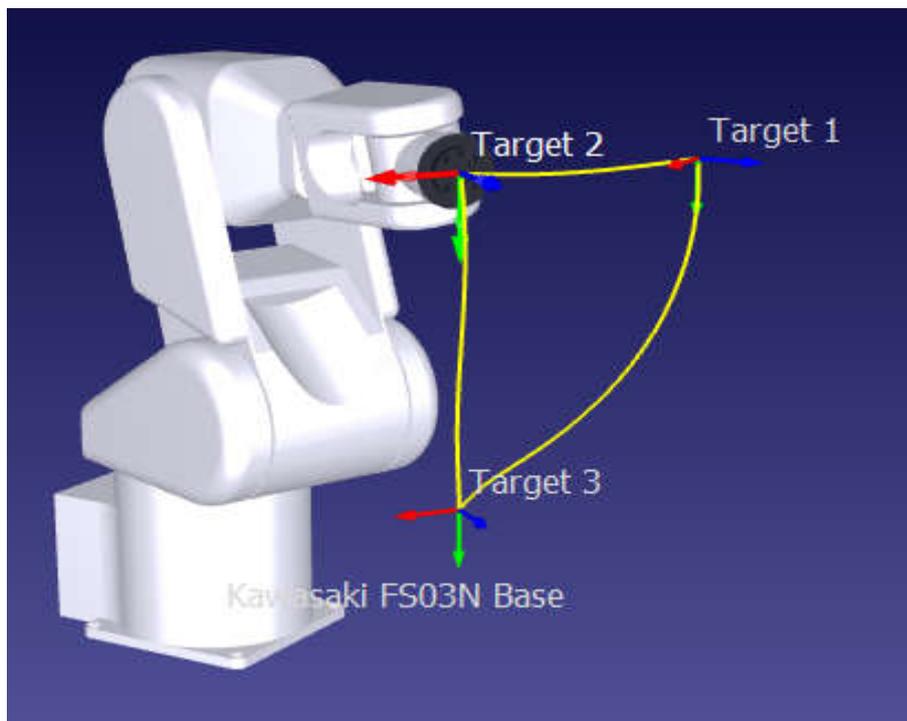
---

La figure (Fig 3.7) : le poigne se position à (Target 1) d'où les angles  $\theta_i$  donné comme suit :

$$\theta_1 = 0^\circ ; \quad \theta_2 = 0^\circ ; \quad \theta_3 = -90^\circ ; \quad \theta_4 = 0^\circ ; \quad \theta_5 = 0^\circ ; \quad \theta_6 = 0^\circ .$$

Le robot suit la trajectoire en jaune de la position (Target 1) à la position (Target 2) donné par la figure (Fig 3.8) et les angles suivante :

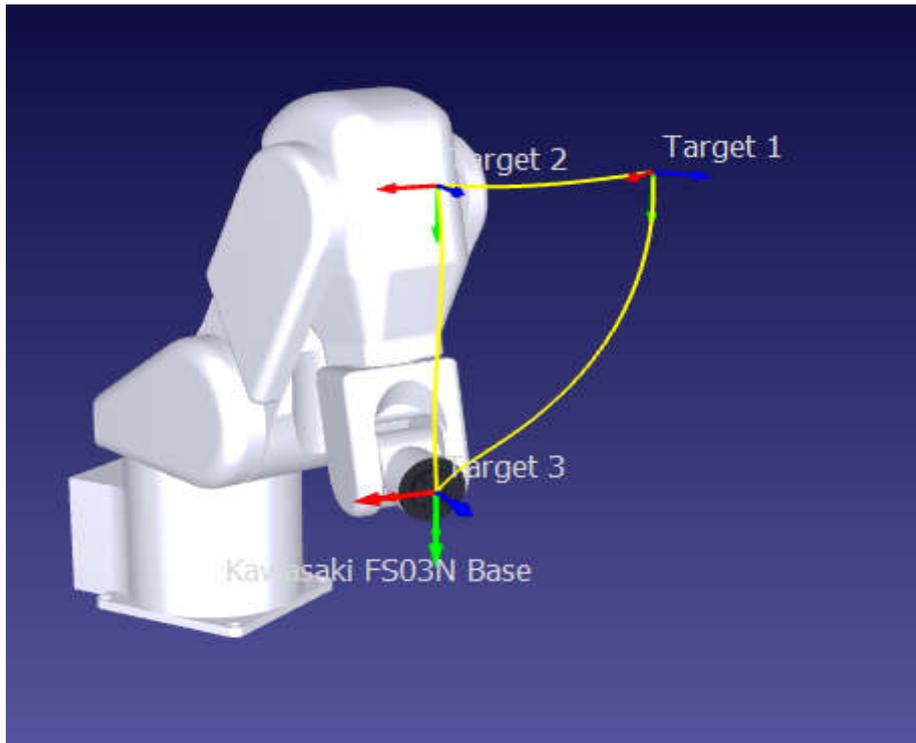
$$\theta_1 = 21.25^\circ ; \quad \theta_2 = -18.08^\circ ; \quad \theta_3 = -105.25^\circ ; \quad \theta_4 = -79.62^\circ ; \quad \theta_5 = -15.35^\circ ; \quad \theta_6 = 79.24^\circ .$$



**Fig3.8** : position 2 atteindre par le robot Kawasaki FS03N.

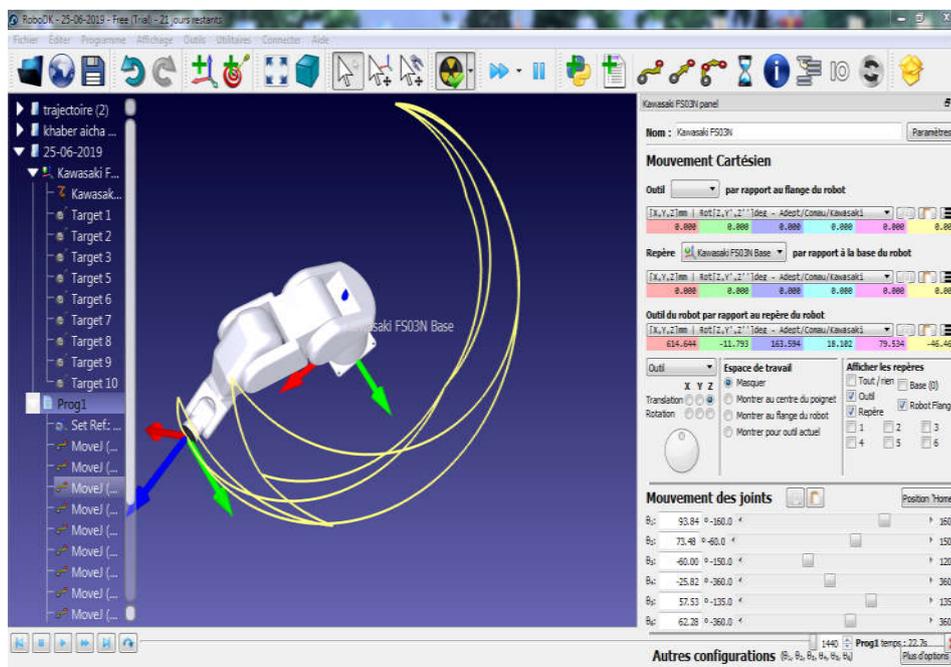
La prochaine étape est d'atteindre la position (Target 3) suivant la trajectoire en jaune, cette position (Fig 3.9) est donnée par les angles suivants :

$$\theta_1 = 21.35^\circ ; \quad \theta_2 = 30.03^\circ ; \quad \theta_3 = -139.14^\circ ; \quad \theta_4 = -164.65^\circ ; \quad \theta_5 = 79.55^\circ ; \quad \theta_6 = 177.15^\circ .$$



**Fig3.9** : position 3 atteindre par le robot Kawasaki FS03N

La figure (Fig 3.10) présente une trajectoire, donnée par 10 Target, se compose par des mouvements rotoïdes.



**Fig3.10** : trajectoire à suivre par le robot Kawasaki FS03N.

### 3.6. Programmation avec RoboDK

```
// Program generated by RoboDK 2.7.1 for Kawasaki fs03n on 25/05/2019 21:21:08  
Set_BaseFrame(Pose( )); // la position de la base  
Set_ToolFrame(Pose( )); // la position de l'outil  
MoveJ (Joints( )); // mouvement rotoïde du moteur  
MoveL (Joints( )); // mouvement linéaire du moteur  
Set_Speed(); //vitesse
```

### 3.7. Conclusion

Le troisième chapitre représente un logiciel de simulation et d'animation RoboDK avec un simple calcul du MGD utilisant le logiciel WorkPlace.

La régulation des angles des articulations du robot a permis de qualifier les performances de la manipulation. D'où les résultats obtenus en simulation montrent l'efficacité de la régulation proposée.

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

L'objectif de ce travail porte sur la modélisation des robots industriels et plus spécifiquement les robots manipulateurs à chaîne ouverte simple.

La première partie est consacrée à donner une vision plus large sur le domaine de la robotique et les différentes classifications des robots.

Dans la seconde partie on présente les différentes approches et méthodes de calcul et notre choix est basé sur la méthode Denavit-Hartenberg pour définir la position et les paramètres des positions des éléments du robot, de faire modéliser les robots de morphologie anthropomorphe (6 articulations rotoïdes).

Dans le troisième chapitre on présente le logiciel de simulation RoboDK pour obtenir quelques trajectoires possibles et définir l'espace de travail avec les Robot Kawasaki FS03N.

En effet, ce projet nous a été une expérience très fructueuse, bénéfique et enrichissante. Il nous permet également de mettre le premier pas dans le vaste monde de la robotique.

Ce projet nous a effectivement permis de proposer des programmes de connaître des nouveaux logiciels et d'approfondir dans le domaine

Le robot qu'on a étudié dans notre projet peut attacher des corps au niveau de sa pince, mais ça nécessite une table mobile ou on fixe notre robot pour un mouvement libre.

Pour cela on propose d'utiliser le robot Kawasaki FS03N dans les domaines les plus dangereux tel que le nucléaire et les zones très chaudes qui nécessitent une haute résistance, pour éliminer le risque du personnel.

## Bibliographie

- [1] **Jean-Louis Boimand**, « Cours ROBOTIQUE ISTIA », Université Angers, page 3.
- [2] **J-P. Lallemand, S. Zeghloul**, « Robotique, Aspect fondamentaux, Modélisation mécanique, CAO robotique, commande », Masson .1994 .
- [3] **André PREUMONT**, « Introduction à la Robotique, Théorie Générale des Systèmes Articules», 12-14 pages, 2<sup>ème</sup> édition – 2001
- [4] **Philippe Bidaud**, Cours de modélisation des systèmes robotiques, Université Pierre et Marie Curie, page 4, 2014.
- [5] spécification d'un robot disponible sur le site :  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Industrial\\_robot](http://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_robot). Consulté en mars 2019.
- [6] **Jean-Louis Boimand**, « Cours ROBOTIQUE ISTIA », Université Angers, 6 -7pages.
- [7] **Arato.S.Deo**, these de PhD« Inverse Kinematics and Dynamic Control Methods for Robotic Systems»,Houston .Texas.1995.
- [8] **R.Clavel**, « Robots parallèles».Techniques de l'Ingénieur, Art. 7710, Vol. S, Juillet 1994.
- [9] **D.Deblaise et P.Maurine**, « Un nouvel étalon pour l'étalonnage géométrique des robots parallèles», 17ème Congrès Français de Mécanique, Troyes, France, Septembre 2005.
- [10] **J.P. Merlet et F. Pierrot**, « Modélisation des robots parallèles», Analyse et modélisation des robots manipulateurs, Lavoisier, ISBN 2-7462-0300-6, 2001.
- [11] Simply the highest performance robots on the R series, FS03Series , disponible sur le site: [robotics.kawasaki.com](http://robotics.kawasaki.com). Consulté en avril 2019
- [12] Robotisation – mode d'emploi, **Robin Dualé**,« Syndicat des entreprises de technologies de production », 2011.
- [13]Contrôleur de robot Kawasaki séries F « manuel d'opération», Kawasaki heavy industriels. LTD, édition 2004.
- [14] **J John .Craig**, « Introduction to Robotics and control», Second Edition, Addison Wesley, Publication, 1989

# Bibliographie

---

- [15] **Ilian Bonev** et **Yanick Noiseux**, « Notes de cours GPA546 », septembre 2014.
- [16] **Zennir Youcef(a)**, **Makbouche Adel(b)** , **Souames Hamza(c)** .Dynamic and kinematic simulation of Kawasaki manipulateur industriel robot using solidworks and matlab simmechanics.
- [17] **A.Makbouche**, **Y. Zennir**, **R. Bendib** .Intenational conference on tecnological advance in electrical engineering ,laboratory of automatic, October 27-28.2014.Skikda.Algeria (Farctional ordre PIDcontroller: applied to control of on wrist of a robot)
- [18] **CHAAL Merouane**, « Modélisation cinématique d'un robot manipulateur à chaine continue ouverte », UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA Option Maintenance Industrielle, 2013.
- [19] **Souames Hamza**, « Modélisation, commande et réalisation d'une interface graphique du robot manipulateur Kawasaki FS03n », annee(2014).
- [20] **Mr. Malik MALLAM** cours : « Modélisations géométrique et cinématique de robot », Février 2011.
- [21] **Wissama KHALIL**, **Etienne DOMBRE**: Bases de la modélisation et de la commande des robots-manipulateurs de type série année 08 mai 2012.
- [22] **P. Fissette**, **H. Buyse**, **J.C. Samin**, MECA 2732 : Introduction à la Robotique, année 10 novembre 2004.
- [23] **Redjel Naceur** « Etude conceptuelle et identification des paramètres inertiels d'un robot à 6 degrés de liberté rotoïdes », annee(2009).
- [24] **W. Khalil**, **E. Dombre**, « Modélisation, Identification et Commande des Robots », 2ième édition, Hermes Science Publication, 1999.
- [25] **Jean-Louis Boimond**, Robotique, Université Angers année 2008-2009.
- [26] **A. Benali**, Robotique et Automatisation Industriel année décembre 1999.
- [27] **P. Fissette**, **H. Buyse**, **J.C.Samin**, Introduction à la robotique, année 29 juin 2009.
- [28] **Vincent Padois**, **Chaire RTE de Robotique d'Intervention** Université Pierre et Marie Curie Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique année 31 janvier 2013.

# Bibliographie

---

[29] **G. ABBA**, « Commande hybride position/force robuste d'un robot manipulateur utilisé en usinage et/ou en soudage », thèse pour obtenir le grade de docteur, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 02 décembre 2013.

[30] **M. Gouasmi, M. Ouali, B. Fernini, M. Meghatria**, Kinematic Modeling and Simulation of a 2-R Robot Using Solid Works and Verification by MATLAB/Simulink. Algeria Structural Mechanics Research Laboratory, Mechanical Engineering Department, Blida University, Algeria, 2011.

[31] **D. Jacques, H. Richard Scheunemann** . "Une notation cinématique des mécanismes basés sur des matrices inférieure paires". *Trans ASME J. Appl. Mech* **23**: 215-221. (1955)

[32] **R. Featherstone** «Robot Dynamics » publier le 9 /10/ 2007 sur le site Scholarpedia, [www.scholarpedia.org/article/Robot\\_dynamics](http://www.scholarpedia.org/article/Robot_dynamics)

[33] **M. Gouasmi, M. Ouali, B. Fernini, M. Meghatria**, Kinematic Modelling and Simulation of a 2-R Robot Using SolidWorks and Verification by MATLAB/Simulink. Algeria Structural Mechanics Research Laboratory, Mechanical Engineering Department, Blida University, Algeria, 2011

[34] **A. Chrifa**, Analyse Cinématique des Robots Parallèles. Thèse Docteur D'état. Université Mentouri Constantine 2007/2008

[35] **Laetitia Matignon, GREYC-CNRS Université de Caen, France** Introduction a la robotique année - 2011/2012.

[36] **F. Cheraghpour, I. Membell, M. Vaezi, R. Shoori Jazeh, S. Ali, A. Moosavian**. Dynamic Modeling and Kinematic Simulation of Staubli© TX40 Robot Using MATLAB/ADAMS Co-simulation. Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics. April 13-15, 2011, Istanbul, Turkey.

[37] **A. Benali**, Robotique et Automatisation Industriel.

[38] **I.H. Aguilar**. « Commande des bras manipulateurs et retour visuel pour des applications à la robotique de service ». Thèse de doctorat, Université Toulouse III, 2007.

[39] **Hiba Hage** . « Identification et simulation physique d'un robot Staubli TX90 pour le fraisage à grande vitesse ». juin 2013. Page 16.