

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

*FACULTE DE TECHNOLOGIE*

*DEPARTEMENT Génie-électrique*

*N° : Rob-03*



**FILIERE : AUTOMATIQUE**

**OPTION : ROBOTIQUE**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Académique**

**Par:HAMANI NAIM & AZAZ AYMEN**

**Intitulé**

**Commande en position d'un robot manipulateur**  
**5DDL par le modèle géométrique inverse**

**Soutenu devant le jury composé de:**

Nom et prénom Enseignant :

Rahali hilal

Université de M'sila

Président

Aib abdelghani

Université de M'sila

Rapporteur

Mabrak samir

Université de M'sila

Examineur

**Année universitaire : 2021 /2022**

بسم الله.. والحمد والشكر لله..

## Remerciements

Au-delà de la formalité d'usage, c'est avec un grand plaisir je suis très heureux d'exprimer tout d'abord Je souhaite avant tout remercier mon directeur de mémoire, AIBAbdelghanipour le temps qu'il a consacré à m'apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de cette recherche. Son exigence m'a grandement stimulé.

Je remercie également pour ses précieux conseils, pour son investissement dans tous les aspects de notre travail, ainsi que pour le temps qu'il a passé à suivre toutes les étapes de notre mission, malgré ses nombreux engagements.

L'ensemble de notre honorable jury de thèse, qui a bien voulu examiner et valoriser notre travail, une place à cet égard grâce au personnel administratif ainsi qu'à tous les enseignants du département de génie-électrique de la faculté de technologie de l'Université Mohammed Boudiaf de M'sila

Enfin, nous adressons nos sincères remerciements à tous ceux qui nous ont aidés à effectuer ce travail prochainement.



*Ceux qui m'ont aidé et m'ont offert cette occasion :*

- \* *Je* dédie ce mémoire à toute ma chère famille **HAMANI** et la famille **AZAZ**
- \* *A* monsieur le professeur **Mr. AIB Abdelghani**
- \* *A* l'arme de mon frère **Mr. BENKOBBI Zakaria** رحمه الله
- \* *A* mes frères, mes fidèles amis et mes camarades de l'école
- \* *A* toutes les personnes qui me respectent et qui m'aiment
- \* *A* tous mes amis et mes collègues de la promotion **2022/2017**

*A tous ceux que j'aime.*

*Merci !*

Remerciements.....	<b>i</b>
Dédicace .....	<b>ii</b>
Sommaire.....	<b>iii</b>
Liste des figures .....	<b>vi</b>
Liste des tableaux .....	<b>vii</b>
Résumé.. .....	<b>viii</b>
Introduction générale .....	<b>2</b>

**Chapitre-1 : Généralités Sur la robotique**

1.1 Définitions de la robotique.....	4
1.2 Architecture des robots.....	5
1.3 Caractéristiques des robots.....	7
1.4 Les types des robots .....	8
1.4.1 Les robots fixes (manipulateurs).....	8
1.4.2 Les robots mobiles.....	8
1.5 Classification des robots .....	9
1.5.1 Les Télémanipulateurs à commande manuelle.....	9
1.5.2 Les Manipulateurs automatiques à cycles pré-réglés.....	9
1.5.3 Les robots programmables.....	9
1.5.4 Les robots dits "Intelligents".....	9
1.6 Domaines d'applications .....	9
1.6.1 Domaine industriel.....	10
1.6.2 Domaine agriculture.....	11
1.6.3 Domaine militaire.....	11
1.6.4 Domaine de service .....	12
1.6.5 Domaine d'exploration.....	13
1.7 Robot manipulateur .....	13

1.7.1	Définition d'un Robot manipulateur .....	13
1.7.2	Constitution d'un robot manipulateur .....	15
1.8	Degré de liberté .....	15
1.8.1	Espace articulaire .....	15
1.8.2	Espace opérationnel .....	15
1.8.3	Redondance .....	16
1.8.4	Configuration singulière.....	16
1.9	Conclusion.....	16
<b>Chapitre-2 : Généralités Sur la modélisation des robots manipulateurs</b>		
2.1	Introduction .....	18
2.2	Les modèles géométriques.....	18
2.2.1	Modèle géométrique direct (MGD) .....	18
2.2.2	Modèle géométrique inverse (MGI).....	18
2.3	Les modèles cinématiques.....	19
2.3.1	Le modèle cinématique direct .....	19
2.3.2	Modèle cinématique inverse.....	19
2.4	Modélisation dynamique .....	19
2.4.1	Modèle dynamique inverse .....	20
2.4.2	Modèle dynamique direct.....	20
2.5	Modèle Géométrique des robots .....	20
2.6	Coordonnées opérationnelles.....	21
2.7	Convention de Denavit–Hartenberg .....	22
2.7.1	Principe.....	22
2.7.2	Hypothèses.....	22
2.8	Modèle Géométrique directe .....	22
2.9	Les paramètres de Denavit-Hartenberg.....	23
2.10	Modèle géométrique inverse.....	25
2.11	Méthode de solution.....	27
2.12	Conclusion .....	27
<b>Chapitre-3 : Résultats et Simulations</b>		
3.1	Introduction.....	29
3.2	Le modèle géométrique directe.....	30

3.3 Modèle géométrique Inverse.....	32
3.4 simulation.....	35
3.5 conclusion.....	38
Conclusion générale.....	40
Bibliographie.....	42

Figure 1.1 Différentes combinaisons d'architectures du porteur.....	6
Figure 1.2 Architecture des poignets .....	6
Figure 1.3 Robot manipulateur dans un environnement pharmaceutique sensible .....	10
Figure 1.4 Robots agricole.....	11
Figure 1.5 Robots militaire .....	11
Figure 1.6 Robots de service .....	12
Figure 1.7 Robots d'exploration .....	12
Figure 1.8 Constitution d'un robot manipulateur .....	13
Figure 1.9 Articulation rotoïde .....	15
Figure 1.10 Articulation prismatique .....	15
Figure 2.1 Coordonnées opérationnelles .....	21
Figure 2.2 Les paramètres de Denavit-Hartenberg .....	23
Figure 3.1 robot manipulateur 5 DDL).....	29
Figure 3.2 Fixage des repères du robot par la convention de D-H.....	31
Figure 3.3 l'outil de robot étudié .....	32
Figure 3.4 la projection de l'effecteur dans le plan XY.....	33
Figure 3.5 Géométrie du robot dans l'espace opérationnelle et le plan $\alpha Z$ .....	33
Figure 3.6 Le robot dans la position initiale.....	37
Figure 3.7 commande du robot par MGI.....	37
Fig 3.8 commande du robot par MGD.....	38

**Liste des tableaux**

Tableau 3.1 Les paramètres de D-H du robot ..... 29

### الملخص

الهدف من هذا العمل هو التحكم في robot manipulateur في الفضاء التشغيلي بواسطة النموذج الهندسي العكسي للروبوت. بادئ ذي بدء ، قمنا بحساب النموذج الهندسي المباشر للروبوت لمحاكاة الروبوت في صندوق أدوات نظام MATLAB Robotics . ، تم حساب النموذج الهندسي العكسي للروبوت بواسطة حل هندسي. يتم التحقق من صحة النماذج التي تم الحصول عليها عن طريق المحاكاة من خلال واجهة الإنسان/الجهاز في guide/MATLAB .  
الكلمات المفتاحية: روبوت مناوور ، نموذج هندسي مباشر ، نموذج هندسي عكسي ، صندوق أدوات نظام Matlab Robotics ، واجهة Man/Machine .

### Résumé

L'objectif de ce travail est la commande d'un robot manipulateur dans l'espace opérationnel par le modèle géométrique inverse du robot. En premier lieu nous avons calculé le modèle géométrique direct du robot pour la simulation du robot dans Matlab Robotics System Toolbox. Ensuite, on a calculé le modèle géométrique inverse du robot par une solution géométrique. Les modèles obtenus sont validés par simulation à travers une interface homme/machine dans Matlab/guide.

Mots-clés : Robot manipulateur, Modèle géométrique direct, Modèle géométrique inverse, Matlab Robotics System Toolbox, interface homme/machine.

### Summary

The objective of this job is the order of a manipulative robot in the operational space by the inverse geometric model of the robot. Above all we calculated the direct geometric model of the robot for the simulation of the robot in Matlab Robotics System Toolbox. Then, they calculated the inverse geometric model of the robot by a geometric resolution. The acquired models are validated by simulation across an interface man / machine in Matlab / Guide.

Key words: Manipulative Robot, direct geometric Model, geometric Model reverses, Matlab Robotics System Toolbox, interface man / machine

## Introduction générale

Les robots étaient initialement utilisés pour ramasser et déplacer des objets, ainsi que dans le moulage par injection et l'emboutissage, où le robot était simplement équipé d'un robinet pour décharger et transporter ou empiler la pièce finie. Ces premiers robots pouvaient être programmés pour effectuer des séquences de mouvements telles que se rendre à un endroit précis, fermer une serrure, etc. Cependant, il manque des capteurs externes. Quelques applications Le soudage, le meulage, l'ébavurage et l'assemblage sont des exemples de tâches plus difficiles. Il n'y a pas seulement un mouvement plus sophistiqué, mais aussi de nombreux capteurs.

En raison du contact étendu du robot avec son environnement, les caractéristiques externes telles que les capteurs de force et de vision sont importantes.

Aujourd'hui Les robots peuvent désormais remplacer directement les personnes dans leur travail en raison de leur propriété. Capacité à effectuer pratiquement toutes les tâches industrielles. Notre travail vise à réaliser un modèle qui simule le contrôle d'un robotManipulateur à cinq degrés de liberté.

Ce projet nous permet de toucher les domaines pratiques et théoriques en électronique,électrotechniques et informatiques, acquises durant nosannées de formation.

Le présent mémoire est organisé comme suit :

✚ **Le premier chapitre** présente une vue générale sur la robotique, notamment les robots manipulateurs.

✚ **Le deuxième chapitre** présente une Description de la modélisation géométriquedes robotsmanipulateurs.

✚ **Le troisième chapitre** présente la partie modélisation et simulation d'un bras manipulateur.

# Chapitre 1

## 1.1 Définitions de la robotique

La robotique est une science pluridisciplinaire qui comprend la mécanique, l'automatique, l'électrotechnique, le traitement de signal, l'informatique, communication...ect. [1]

Elle peut être définie comme l'ensemble des techniques et études tendant à concevoir des systèmes mécaniques, informatiques ou mixtes, capables de se substituer à l'homme dans ses fonctions motrices, sensorielles et intellectuelles [2]

Le robot est Système complexe capable, grâce à ses fonctions de manipulation et (ou) de locomotion, de remplacer l'homme dans la réalisation de tâches répétitives, dangereuses ou inaccessibles. [3]

Le Petit Larousse définit un robot comme un appareil automatique capable de manipuler des objets ou d'effectuer des opérations selon des programmes fixes ou modifiables. [3]

L'Association Française de Normalisation (A.F.N.O.R.) définit un robot comme un robot commandé en position, reprogrammable, multifonctionnel (c'est-à-dire polyvalent), à plusieurs degrés de liberté, capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils spéciaux et des équipements, effectuant une variété de tâches de et des périodes de mouvement programmées. Il a généralement l'apparence d'un ou plusieurs bras se terminant par le poignet. Son unité de commande utilise notamment un dispositif de mémoire et peut être utilisée pour détecter et s'adapter à l'environnement et à l'environnement. Ces machines multifonctions sont souvent conçues pour assurer cycliquement la même fonction et peuvent être adaptées à d'autres fonctions sans modifications permanentes des équipements. [3]

Robot = bras manipulateur / base mobile / bras manipulateur monté sur 1 base mobile, + motorisation + système de perception + programmation et interface homme machine.

Un robot est conçu pour réaliser des tâches entièrement autonome ou sous le contrôle d'un opérateur humain.

Origine du terme Robot : robota(slave) = travailleur terne.

Pièce de théâtre, "Rossum's Universal Robot " du romancier tchèque Karel Capek (1921), portant sur des êtres artificiels anthropomorphes répondant parfaitement aux ordres de leur maîtres.2

Un robot se compose de [3] :

**a / Le mécanisme** : structure plus au moins proche de celle du bras humain, on dit aussi manipulateur quand il ne s'agit pas d'un robot mobile. Sa motorisation est réalisée par de actionneurs électriques, pneumatiques ou hydrauliques qui transmettent leur mouvement aux articulations par des systèmes appropriés.

**b / La perception** : Permet de gérer les relations entre le robot et son environnement. Les organes de perception sont des capteurs dits « proprioceptifs » lorsqu'ils mesurent l'état interne du robot (position et vitesses des articulations) ou « extéroceptifs » lorsqu'ils recueillent des informations sur l'environnement (détection de présence, mesure de distance, vision artificielle).

**c / La 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.

**d / l'interface homme-machine** : à travers laquelle l'utilisateur programme les taches que le robot doit exécuter.

**e / le poste de travail et les dispositifs perirobotique** : qui constituent l'environnement dans lequel évolue le robot.

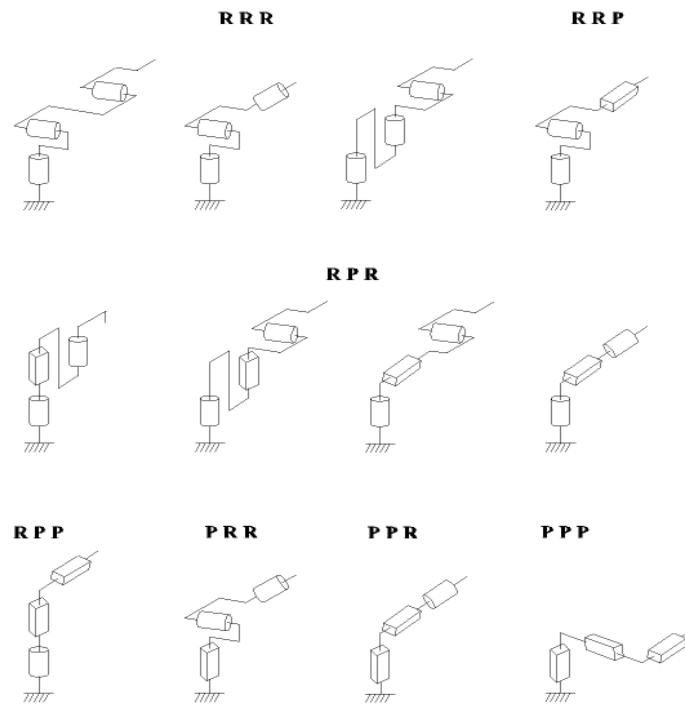
## 1.2 Architecture des robots

Un robot comporte 2 parties essentielles :

- ✓ **Le porteur** : Structure mécanique articulée constituée des 3 premiers degrés de liberté a 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.

Les liaisons utilisées sont des liaisons pivot notées R ou prismatique notées P

Ainsi le nombre de combinaisons possibles est 8 .elles sont représentés dans le tableau 2.

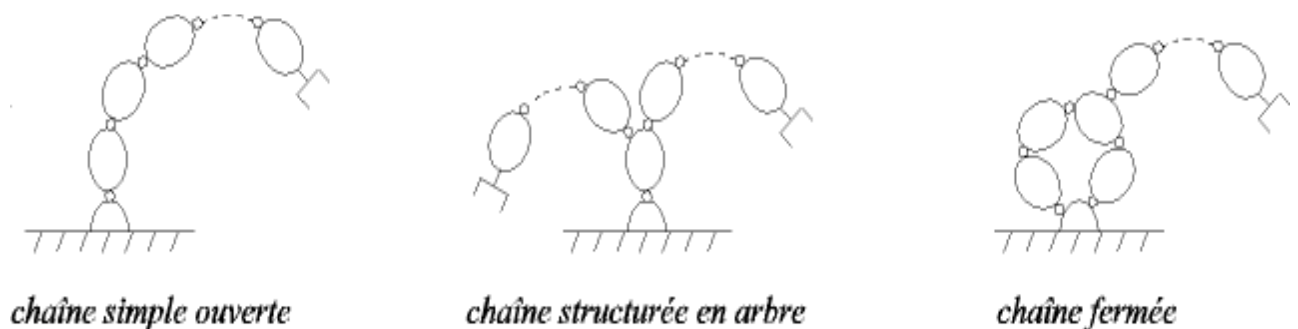


**Fig 1.1** Différentes combinaisons d'architectures du porteur

- ✓ **Le poignet** : il est destiné à l'orientation de la pince ou de l'outil porté par le robot Les deux structures les plus courantes. (**Fig 2.2**)

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

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



**Fig 2.2** Architecture des poignets

### 1.3 Caractéristiques des robots

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

- ❖ La charge maximum transportable (de quelques kilos à quelques tonnes), à déterminer dans les conditions les plus défavorables (en élongation maximum).
- ❖ L'architecture du S.M.A., le choix est guidé par la tâche à réaliser (quelle est la rigidité de la structure ?).
- ❖ Le volume de travail, défini comme l'ensemble des points atteignables par l'organe terminal. Tous les mouvements ne sont pas possibles en tout point du volume de travail. L'espace de travail (*reachable workspace*), également appelé espace de travail maximal, est le volume de l'espace que le robot peut atteindre *via* au moins une orientation. L'espace de travail dextre (*dextrous workspace*) est le volume de l'espace que le robot peut atteindre avec toutes les orientations possibles de l'effecteur (organe terminal). Cet espace de travail est un sous-ensemble de l'espace de travail maximal.
- ❖ Le positionnement absolu, correspondant à l'erreur entre un point souhaité (réel) – défini par une position et une orientation dans l'espace cartésien – et le point atteint et calculé *via* le modèle géométrique inverse du robot. Cette erreur est due au modèle utilisé, à la quantification de la mesure de position, à la flexibilité du système mécanique. En général, l'erreur de positionnement absolu, également appelée précision, est de l'ordre de 1 *mm*.
- ❖ La répétabilité, ce paramètre caractérise la capacité que le robot a à retourner vers un point (position, orientation) donné. La répétabilité correspond à l'erreur maximum de positionnement sur un point prédéfini dans le cas de trajectoires répétitives. En général, la répétabilité est de l'ordre de 0,1 *mm*.
- ❖ La vitesse de déplacement (vitesse maximum en élongation maximum), accélération.
- ❖ La masse du robot.
- ❖ Le coût du robot.
- ❖ La maintenance, ...

En fait, l'impression que tout le monde en a est généralement vague, et un robot est généralement définie comme un manipulateur automatique avec des boucles programmables.

Pour "être à la hauteur" du nom du robot, un système doit être flexible, caractérisé par les caractéristiques suivantes :

- ✚ La versatilité [2]: Le robot doit avoir la capacité d'effectuer plusieurs tâches, ou d'effectuer la même tâche de différentes manières ;
- ✚ L'auto-adaptativité : Le robot doit être capable de s'adapter à des environnements changeants au cours de sa mission. [3]

## 1.4 Les types des robots

Ils peuvent être divisés en robots fixes, c'est-à-dire manipulateurs, et robots mobiles.

### 1.4.1 Les robots fixes (manipulateurs)

Un robot fixe ou manipulateur, quelle que soit la fonction qui lui est attribuée (transfert d'objet, soudage, assemblage), est un mécanisme capable de déplacer et de situer un objet appelé «Organe terminal» ou «point outil» dans une partie de l'espace appelé « volume de travail », [7]

### 1.4.2 Les robots mobiles

Contrairement au robot industriel qui est généralement fixé, le robot mobile est doté de moyens qui lui permettent de se déplacer dans son espace de travail. Suivant son degré d'autonomie ou degré d'intelligence, il peut s'adapter et de prendre des décisions afin de réaliser une tâche malgré un manque d'information préliminaires ou éventuellement erronées. Certains sont capables de modéliser leur espace de travail et de planifier un chemin dans un environnement qu'ils ne connaissent pas forcément d'avance [9].

L'aspect particulier de la mobilité impose une complexité technologique et méthodologique qui s'ajoute en général aux problèmes rencontrés par les robots manipulateurs.

La résolution de ces problèmes passe par l'emploi de toutes les ressources disponibles tant au niveau technologique (capteurs, motricité, énergie) qu'à celui du traitement des informations par l'utilisation des techniques de l'intelligence artificielle [10].

Les possibilités sont plus vastes, du fait de leur mobilité, ils peuvent être utilisés dans des zones dangereuses (nucléaire, incendie, sécurité civile, déminage), inaccessibles (océanographie, spatial).

## **1.5 Classification des robots : [1]**

L'AFRI (Association Française de Robotique Industrielle) : distingue quatre classes de robots.

### **1.5.1 Les Télémanipulateurs à commande manuelle**

Ils sont commandés à distance et "en temps réel" par un opérateur humain. Cette télécommande se fait à plus ou moins longue distance par signaux mécaniques, hydrauliques, ou le plus souvent électriques. Ces manipulateurs sont employés en forge, fonderie, meulage- ébarbage, milieux "hostiles", etc..., mais nécessitent toujours la présence et l'intervention constante d'un opérateur.

### **1.5.2 Les Manipulateurs automatiques à cycles pré-réglés**

Leurs mouvements sont limités par des butées et cames réglables à la main. Ils sont commandés à l'aide de logiques à relais ou pneumatiques (séquences fixes), ou par automates programmables et cartes à microprocesseurs (séquences variables). Généralement modulaires, ces appareils sont conçus pour une application déterminée.

### **1.5.3 Les robots programmables**

Ils sont pilotés par des ordinateurs ou des armoires de commande numérique. Leurs mouvements continus dans l'espace sont alors programmés par apprentissage ou en langage symbolique par l'intermédiaire d'un clavier, ou encore sur l'écran d'un poste. Ils assurent des manipulations complexes, des opérations de soudage, usinage, découpe, peinture et pulvérisation, etc...

### **1.5.4 Les robots dits "Intelligents"**

Equipés de capteurs (par exemple un système de vision artificielle ou de suivi de joint en soudage), ils peuvent analyser les modifications de leur environnement ou de leur trajectoire et réagir en conséquence. Ces machines appelées robots de "deuxième génération" commencent à être répandus dans l'industrie. La "troisième génération" disposant de capacités de raisonnement grâce à l'intelligence artificielle fait aujourd'hui l'objet de recherches approfondies.

## **1.6 Domaines d'applications**

La robotique est un domaine en plein essor depuis quelques années, utilisée dans des domaines extrêmement rigoureux et exigeants. Nous allons explorer ces différents domaines.

### 1.6.1 Domaine industriel

Depuis leur apparition sur les chaînes de production dans les années 1970, les robots industriels ont pris une place de plus en plus importante dans la plupart des secteurs où les opérations d'assemblage et les manipulations de produits sont récurrentes. Durant les trois dernières décennies, les progrès technologiques ont participé à rendre les robots plus flexibles, plus rapides et plus précis. Aujourd'hui, ils jouent un rôle prépondérant pour :

- ✓ Les manipulations de produits à haute cadence.
- ✓ Les opérations de packaging avec des manipulations de produits et d'emballage.
- ✓ L'assemblage de produits (secteurs automobile, pharmaceutique, cosmétique...etc.). Voir la figure ci-dessous (figure 1.3).



**Fig 1.3** Robot manipulateur dans un environnement pharmaceutique sensible

### 1.6.2 Domaine agriculture

Après des décennies d'expérimentation, les robots ont enfin fait leur entrée à la ferme.

Cette machine totalement autonome fonctionne grâce à l'énergie solaire et circule dans les rangées de plantations pour surveiller et analyser les plantes (voir figure 1.4).

Ce robot a déjà passé avec succès de nombreux tests réalisés dans des champs de légumes mais se contente de surveiller la « bonne santé » et plantations. Grâce à ces nombreux capteurs, senseurs et caméras, il détecte rapidement d'éventuelles anomalies (présence de mauvaises herbes, animaux nuisibles, croissance trop faible) et avertit l'exploitant agricole qui peut ainsi prendre immédiatement les mesures appropriées.



**Figure 1.4** Robots agricole

### 1.6.3 Domaine militaire

Les robots sont de plus en plus utilisés dans le domaine militaire. En effet, la miniaturisation permet aujourd'hui de créer des robots discrets mais dotés de nombreux capteurs, ce qui est idéal pour des missions d'espionnage ou d'éclairage. De plus, certains robots sont équipés d'un armement pour évoluer en milieu hostile, dans le but de remplacer les soldats pour limiter les pertes humaines comme le montre la figure 1.5.



**Fig 1.5** Robots militaire

### 1.6.4 Domaine de service

La révolution de la robotique a conduit ces dernières années à voir de nombreux robots s'installer chez les particuliers pour effectuer des tâches à la place de leur possesseur, la figure 1.6 illustre le robot de service ASIMO.

En effet, ceux-ci sont capables de faire le ménage, tondre la pelouse, nettoyer la piscine etc. La robotique autre fois réservée à des applications précises ou coûteuses, est aujourd'hui de plus en plus utilisée à titre ludique. En effet, les robots compagnons par exemple sont des objets de plus en plus

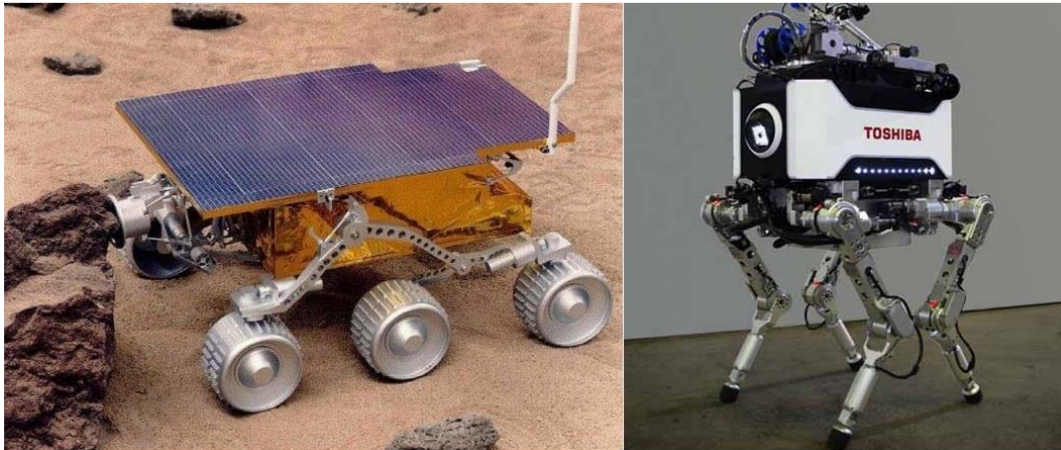
convoités, les applications de jouet pour enfant, jusqu'à l'humanoïde destiné à remplacer une présence humaine [11].



**Fig 1.6** Robots de service

### 1.6.5 Domaine d'exploration

Les robots explorateurs remplacent l'homme dans des environnements difficiles. L'exploration de la centrale nucléaire de Tchernobyl a été faite par un robot. L'exploration de l'espace se fait de plus en plus par des robots. En 1976, la sonde Viking 1 s'est posée sur Mars et a pris les premières photos de la planète.



**Fig 1.7** Robots d'exploration

Les robots anthropomorphiques ont l'apparence humaine, ils sont dotés de la bipédie et sont capables de faire des choses que seul l'humain pouvait faire jusqu'à aujourd'hui. La plus récente version de robot anthropomorphique peut courir à 6 Km/h et peut aussi remplir la tâche de réceptionniste ou de guide d'information.

C'est un robot de recherche et il devrait, rendu à terme, être capable de venir en aide aux personnes handicapées, âgées ou malades [14].

## 1.7 Robot manipulateur

### 1.7.1 Définition d'un Robot manipulateur

Les robots manipulateurs sont composés de liaisons rigides interconnectées par le moyen d'articulations, et un organe effecteur se trouvant à l'extrémité de la dernière liaison. Le mouvement de ces liaisons est assuré par des actionneurs et l'état du manipulateur est donné par des mesures issues des capteurs. Le mouvement désiré du manipulateur est achevé en utilisant un système de contrôle qui fournit des commandes aux actionneurs des articulations dépendant sur la méthodologie de commande implémentée.

La figure suivante illustre les différents éléments qui constituent un robot manipulateur :

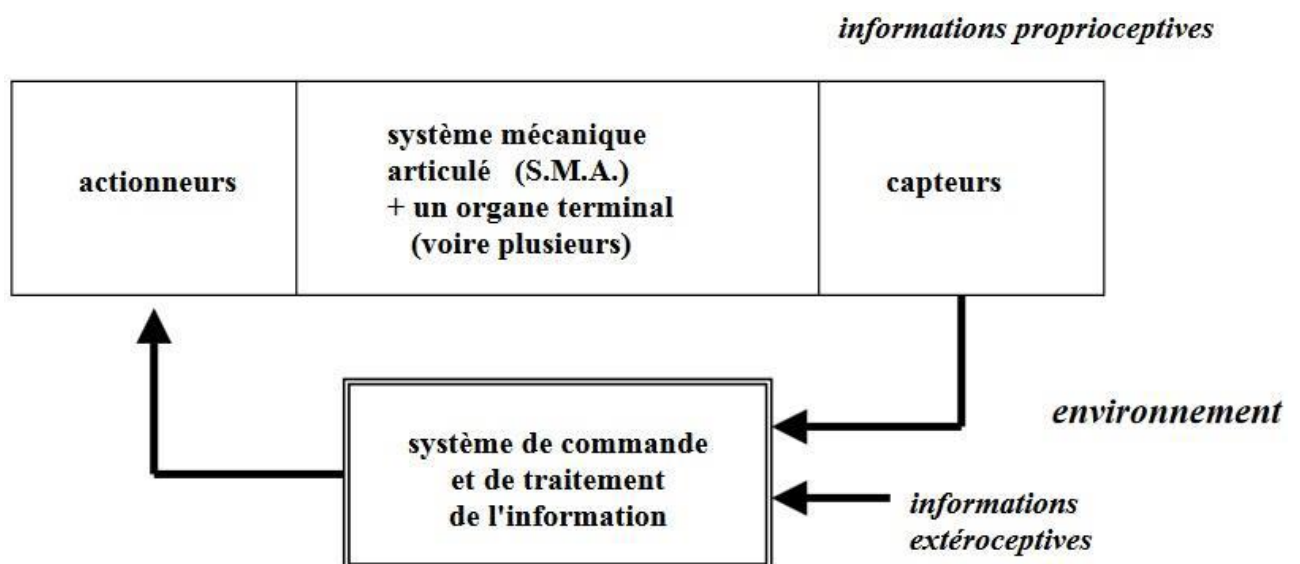


Fig 1.8 Constitution d'un robot manipulateur

### 1.7.2 Constitution d'un robot manipulateur

Sous le terme organe terminal, on regroupe tout dispositif destiné à manipuler des objets (dispositifs de serrage, dispositifs magnétiques, à dépression, ...), ou à les transformer (outils, torche de soudage, pistolet de peinture, ...). 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.

- ✓ **Le système mécanique articulé (S.M.A.)** est un mécanisme ayant une structure plus ou moins proche de celle du bras humain. Il permet de remplacer, ou de prolonger, son action (le terme "manipulateur" exclut implicitement les robots mobiles autonomes). Son rôle est d'amener l'*organe terminal* dans une situation (position et orientation) donnée, selon des caractéristiques de vitesse et d'accélération données. Son architecture est une chaîne cinématique de corps, généralement rigides (ou supposés comme tels), assemblés par des liaisons appelées *articulations*. Sa motorisation est réalisée par des *actionneurs* électriques, pneumatiques ou hydrauliques qui transmettent leurs mouvements aux *articulations* par des systèmes appropriés.
- ✓ **Les actionneurs** : utilisent fréquemment des moteurs électriques à aimant permanent, à courant continu, à commande par l'induit (la tension n'est continue qu'en moyenne car en général l'alimentation est un hacheur de tension à fréquence élevée ; bien souvent la vitesse de régime élevée du moteur fait qu'il est suivi d'un réducteur, ce qui permet d'amplifier le couple moteur). On trouve de plus en plus de moteurs à commutation électronique (sans balais), ou, pour de petits robots, des moteurs pas à pas. Pour les robots devant manipuler de très lourdes charges (par exemple, une pelle mécanique), les actionneurs sont le plus souvent hydrauliques, agissant en translation (vérin hydraulique) ou en rotation (moteur hydraulique). Les actionneurs pneumatiques sont d'un usage général pour les manipulateurs à cycles (robots tout ou rien). Un manipulateur à cycles est un S.M.A. avec un nombre limité de degrés de liberté permettant une succession de mouvements contrôlés uniquement par des capteurs de fin de course réglables manuellement à la course désirée (asservissement en position difficile dû à la compressibilité de l'air).
- ✓ **les capteurs** : La perception permet de gérer les relations entre le robot et son environnement. Les organes de perception sont des 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).
- ✓ **La partie commande** : synthétise les consignes des asservissements pilotant les actionneurs, à partir de la fonction de perception et des ordres de l'utilisateur

## ❖ Articulations

Une articulation lie deux corps successifs en limitant le nombre de degrés de l'un par rapport à l'autre. Soit  $m$  le nombre de degrés de liberté résultant ; encore appelé mobilité de l'articulation. ( $0 < m \leq 6$ ). Lorsque  $m=1$ , le cas le plus fréquent en robotique, l'articulation est soit rotative, soit prismatique.  $0 < m \leq 6$ . [4]

**Articulation rotoïde :** Il s'agit d'une articulation de type pivot, notée  $R$ , réduisant le mouvement entre deux corps à une rotation autour d'un axe qui leur est commun. La situation relative entre les deux corps est donnée par l'angle autour de cet axe fig 1.9.



**Fig 1.9** Articulation rotoïde

**Articulation prismatique :** Il s'agit d'une articulation de type glissière, notée  $P$ , réduisant le mouvement entre deux corps à une translation le long d'un axe commun. La situation relative entre les deux corps est mesurée par la distance le long de cet axe fig 1.10.



**Fig 1.10** Articulation prismatique

## 1.8 Degré de liberté

Le degré de liberté d'un robot manipulateur est la somme des degrés de liberté de ses articulations. Avec le degré de liberté d'une articulation est le nombre de mouvement du corps qui est en aval par rapport au corps qui est en amont.

### 1.8.1 Espace articulaire

L'espace articulaire d'un robot est celui dans lequel est représentée la situation de tous ses corps. La situation la plus simple consiste à utiliser les variables aux coordonnées articulaires.

Sa dimension  $N$  est égal au nombre des variables articulaires indépendantes et correspond au nombre de degrés de liberté de la structure mécanique.

### 1.8.2 Espace opérationnel

L'espace opérationnel est celui dans lequel est représentée la situation de l'organe terminal.

Sa dimension est égal au nombre des paramètres indépendants nécessaire pour décrire la dimension de l'organe terminal dans l'espace.

Dans l'espace tridimensionnel ce nombre est de six (trois point pour placer un point du corps en un point quelconque de cet espace et trois pour orienter ce corps de façon quelconque) [3] [4].

### **1.8.3 Redondance**

Un robot est redondant lorsque le nombre de degrés de liberté de l'organe terminal est inférieur au nombre de degrés de liberté de l'espace articulaire.

### **1.8.4 Configuration singulière**

Pour tous les robots ; qu'ils soient redondants ou non ; il se peut que dans certaines configurations dites singulières ; le nombre de degrés de liberté de l'organe terminal soit inférieur à la dimension de l'espace opérationnel.

## **1.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, on a fait une brève présentation sur les robots en particulier sur les robots manipulateurs, en donnant les définitions et les types de plusieurs éléments et de composants .en mettant l'accent sur les domaines applicatifs des robots industriels. Ensuite la classification des robots est abordée.

## Chapitre 2

### 2.1 Introduction

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

### 2.2 Les modèles géométriques

Les modèles géométriques direct et inverse qui expriment la situation de l'organe terminal en fonction des variables articulaires du mécanisme et inversement ; dans la modélisation géométrique on s'intéresse au mouvement sans tenir compte des forces qui le provoque.

#### 2.2.1 Modèle géométrique direct (MGD)

Le modèle géométrique direct (MGD) est l'ensemble des relations qui permettent d'exprimer la situation de l'organe terminal, c'est-à-dire les coordonnées opérationnelles du robot, en fonction de ses coordonnées articulaires

Le modèle géométrique direct du robot peut être représenté par la relation

$$X = f(q) \quad (2.1)$$

$q$  : étant le vecteur des variables articulaires tel que

$$q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T \quad (2.2)$$

Les coordonnées opérationnelles sont définies par :

$$X = [X_1 \ X_2 \ \dots \ x_m]^T \quad (2.3)$$

#### 2.2.2 Modèle géométrique inverse (MGI)

Le MGI permet d'effectuer une commande à partir d'une position connue  $X, Y, Z$ . C'est la fonction  $f^{-1}$ , si elle existe, qui exprime la configuration du robot ( $Q$ ) en fonction de la situation ( $X$ : position + orientation) de l'effecteur:

$$f^{-1}: \underline{X} \rightarrow \underline{Q} = f^{-1}(\underline{X})$$

$$q = g(X) \quad (2.4)$$

## 2.3 Les modèles cinématiques

- les modèles cinématiques direct et inverse qui expriment la vitesse de l'organe terminal en fonction des vitesses articulaires et inversement.

### 2.3.1 Le modèle cinématique direct

décrit les vitesses des coordonnées opérationnelles en fonction des vitesses articulaires, Il est noté :

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (2.5)$$

Où  $J(q)$  désigne la matrice jacobienne de dimension  $(m \times n)$  du bras manipulateur

### 2.3.2 Modèle cinématique inverse

L'objectif du modèle cinématique inverse est de calculer, à partir d'une configuration donnée  $Q$ , les vitesses articulaires  $\dot{Q}$  qui assurent au repère terminal une vitesse opérationnelle  $X$  imposée, il s'écrit donc :

$$\dot{q} = J^{-1}(q)\dot{X} \quad (2.6)$$

Le modèle cinématique inverse (MCI) donne les vitesses articulaires ( $\dot{q}$ ) correspondants à une vitesse désirée  $\dot{x}$  de l'organe terminal.

Le modèle cinématique inverse s'obtient par la solution d'un système d'équations linéaires soit analytiquement, soit numériquement, les solutions analytiques diminuent le nombre d'opérations de façon remarquable par rapport aux solutions numériques, mais il faut traiter les cas singuliers séparément. Les solutions numériques sont plus générales, et traitent tous les cas de la même façon.

## 2.4 Modélisation dynamique

Le modèle dynamique joue un rôle important dans la conception et le fonctionnement des robots. Pour la conception, le modèle dynamique inverse peut être utilisé pour choisir les axes, alors que le modèle dynamique direct est utilisé pour effectuer des simulations, afin de tester les performances du robot.

Plusieurs approches sont proposées pour obtenir le modèle dynamique des robots, les plus utilisées sont la formulation de Newton-Euler et la formulation de Lagrange. L'approche de Newton-Euler est basée sur l'équilibre des forces et des moments qui agissent entre les articulations. La formulation de

Lagrange est une approche basée sur l'énergie. Pour le même manipulateur, les deux approches donnent les mêmes équations du mouvement.

### 2.4.1 Modèle dynamique inverse

Le modèle dynamique inverse est utilisé pour synthèse des lois de commande, qui sont nécessaires pour réaliser un mouvement souhaité. En absence des frottements et d'autres perturbations, le modèle dynamique général d'un robot manipulateur est donné par :

$$\tau = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) \quad (2.7)$$

Avec :

$q$  : Vecteur des variables articulaires de dimension  $(n \times 1)$ .

$\dot{q}$  : Vecteur des vitesses articulaires de dimension  $(n \times 1)$ .

$\ddot{q}$  : Vecteur des accélérations de dimension  $(n \times 1)$ .

$\tau$  : Vecteur des couples appliquées aux articulations de dimension  $(n \times 1)$ .

$M(q)$  : Matrice d'inertie du robot de dimension  $(n \times n)$  symétrique définie positive

$C(q, \dot{q})$  : Vecteur des forces de Coriolis et centrifuges de dimension  $(n \times 1)$ .

$G(q)$  : Vecteur des forces de gravité de dimension  $(n \times 1)$ .

### 2.4.2 Modèle dynamique direct

Exprime la position, la vitesse et l'accélération des articulations en fonction des couples appliqués, il est obtenu par inversion du modèle précédent.

## 2.5 Modèle Géométrique des robots

Quelle que soit la tâche que doit réaliser un robot manipulateur, il est important de maîtriser la position et le déplacement de son outil de travail (organe terminal). La modélisation géométrique qui est une configuration définie par un ensemble de variables articulaires traduisant les déplacements relatifs d'un corps par rapport au précédent, pour faciliter les calculs du modèle géométrique, on doit suivre ces étapes essentielles dans l'ordre suivant [3]

- 1- fixer des repères à chaque corps du robot.
- 2- calculer la matrice homogène entre chaque corps.
- 3- calculer la matrice homogène entre la base et l'organe terminal.

On présente quelques méthodes permettant d'établir ces modèles. On se limitera au cas des robots à structure ouverte simple. Pour les robots à structure complexe, arborescente ou fermée, on renvoie le lecteur à [11].

Le formalisme mathématique fait appel aux matrices de transformation homogènes de dimension (4x4). La matrice homogène  ${}^i\mathbf{T}_j$  représente la transformation permettant de passer du repère  $R_i$  au repère  $R_j$  :

$${}^i\mathbf{T}_j = \begin{bmatrix} {}^i\mathbf{A}_j & {}^i\mathbf{P}_j \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^i\mathbf{s}_j & {}^i\mathbf{n}_j & {}^i\mathbf{a}_j & {}^i\mathbf{p}_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Le calcul des modèles d'un robot manipulateur nécessite la définition d'un système de coordonnées articulaires attaché aux articulations robot et d'un système de coordonnées opérationnelles attaché à la base du robot. [2]

$\underline{X} = (x_1, x_2, \dots, x_m)^t$  : coordonnées opérationnelles ,

$\underline{Q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)^t$  : coordonnées articulaires,

$q_i$  (prismatique/rotoïde) est associée à l'articulation  $i$  .

$R_0$ : repère de base du robot (il est souvent confondu avec  $R_I$  ).

$R_i$  : repère de l'articulation  $i$  du robot.

$R_n$  : repère de l'effecteur du robot.

(Sauf stipulation contraire, ces repères sont orthonormés directs)

## 2.6 Coordonnées opérationnelles

Plusieurs possibilités existent pour la définition du vecteur  $X$  selon les méthodes utilisées pour spécifier la position et l'orientation. Par exemple, si l'orientation est spécifiée à l'aide des *cosinus directeurs* (décrits ci-dessous), on aura :

$$\underline{X} = \left[ \begin{array}{ccc|cccccccc} M_x & M_y & M_z & a_{11} & a_{21} & a_{31} & a_{12} & a_{22} & a_{32} & a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{array} \right].$$

↔ voir a) ↔
↔ voir b) ↔

Fig 2.1 Coordonnées opérationnelles

a) En général, on définit la position d'un point du repère lié à l'organe terminal via des coordonnées cartésiennes (3 longueurs), cylindriques (2 longueurs + 1 angle) ou sphériques (1 longueur + 2 angles).

b) Il existe différentes possibilités pour définir l'orientation de l'organe terminal :

- Les angles d'Euler,
- D'autres types d'angles (Bryant, ...),
- Les cosinus directeurs. Leur utilisation revient à considérer l'ensemble des projections des vecteurs unités portés par les axes du repère  $1 R$ , sur les axes du repère  $0 R$  (repères orthonormés). Il en résulte  $3 \times 3$  paramètres, en effet :
- 6 relations sont nécessaires pour indiquer que la base est orthonormée (3 pour indiquer des normes unitaires + 3 pour indiquer l'orthogonalité de la base),
- et 3 paramètres pour décrire l'orientation du repère.

## 2.7 Convention de Denavit -Hartenberg

Méthodologie à suivre pour décrire les robots à structure ouverte simples. Une structure ouverte simple est composée de  $n+1$  corps notés  $C_0, \dots, C_n$  et de  $n$  articulations

Le corps  $C_0$  désigne la base du robot et le corps  $C_n$  le corps qui porte l'organe terminal. L'articulation  $j$  connecte le corps  $C_j$  au corps  $C_{j-1}$ .

La méthode de description est basée sur le principe suivant :

### 2.7.1 Principe

- 1- Fixer des repères à chaque corps du robot.
- 2- Calculer les matrices homogènes entre chaque corps.
- 3- Calculer la matrice homogène entre base et organe terminal

### 2.7.2 Hypothèses

On suppose que le robot est constitué d'un chaînage de  $n+1$  corps liés entre eux par  $n$  articulations rotoïdes ou prismatiques. A chaque corps, on associe un repère  $R_i$ . Les repères sont numérotés de  $0$  à  $n$ . La  $i$ ème articulation, dont la position est notée  $q_i$ , est le point qui relie les corps  $i-1$  et  $i$ .

Le repère  $R_j$  fixé au corps  $C_j$ , est défini de sorte que :

- L'axe  $z_j$  est porté par l'axe de l'articulation  $j$ .
- L'axe  $x_j$  est porté par la perpendiculaire commune aux axes  $z_j$  et  $z_{j+1}$ . Si les axes  $z_j$  et  $z_{j+1}$  sont parallèles ou colinéaires, le choix de  $x_j$  n'est pas unique.

## 2.8 Modèle Géométrique directe

1. Définir les repères associés à chaque segment :  $0, 1, \dots, n$
2. Déterminer la transformation de coordonnées entre deux segments consécutifs  $A^{i-1}_i(q_i), i \in \{1, \dots, n\}$
3. Déterminer, d'une façon récursive, la transformation totale entre le repère  $n$  et le repère  $0$ , c'est-à-dire:

$$T_n^0(q) = A^0_1(q_1) A^1_2(q_2) \dots A^{n-1}_n(q_n)$$

## 2.9 Les paramètres de Denavit-Hartenberg

Le passage du repère  $R_{j-1}$  au repère  $R_j$  s'exprime en fonction des quatre paramètres géométriques suivants : (Fig 2.2)

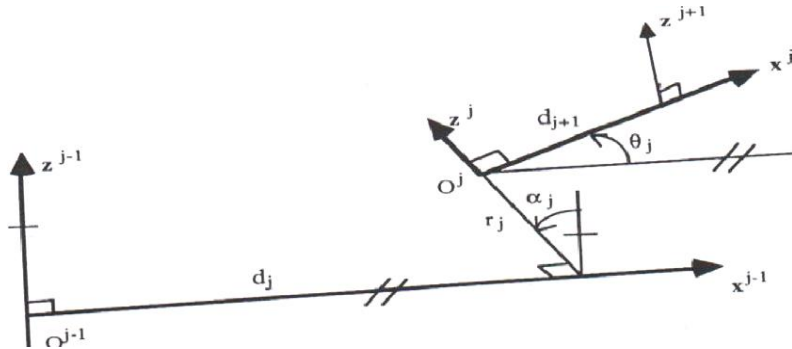


Fig2.2 Les paramètres de Denavit-Hartenberg

1/  $\alpha_j$  : angle entre les axes  $z^{j-1}$  et  $z^j$  correspondant à une rotation autour de  $x^{j-1}$

2/  $d_j$  : distance entre  $z^{j-1}$  et  $z^j$  le long de  $x^{j-1}$

3/  $\theta_j$  : angle entre l'axe  $x^{j-1}$  et  $x^j$  correspondant à une rotation autour de  $z^j$ .

4/  $r_j$  : distance entre  $x^{j-1}$  et  $x^j$  le long de  $z^j$

Si l'articulation  $i$  est de type prismatique, alors  $d_i$  est variable • Si l'articulation  $i$  est de type rotoïdes, alors  $\theta_i$  est variable.

avec :

$\delta_j = 0$  si l'articulation  $j$  est rotoïde

$\delta_j = 1$  si l'articulation est prismatique

A partir de cette description on peut définir la matrice de transformation homogène définissant le repère  $R_j$  dans le repère  $R_{j-1}$ .

On a :

$${}^{j-1}T^j = Rot(x, \alpha_j) Trans(x, d_j) Rot(z, \theta_j) Trans(z, r_j) \quad (2.8)$$

$${}^{j-1}T^j = \begin{bmatrix} {}^{j-1}A^j & {}^{j-1}P^j \\ O_{1,3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\theta_j & -S\theta_j & 0 & d_j \\ C\alpha_j S\theta_j & C\alpha_j C\theta_j & -S\alpha_j & -r_j S\alpha_j \\ S\alpha_j S\theta_j & S\alpha_j C\theta_j & C\alpha_j & r_j C\alpha_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Et :

$${}^jT^{j-1} = \begin{bmatrix} {}^{j-1}A^{jT} & -{}^{j-1}A^{jT}{}^{j-1}P^j \\ O_{1,3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{j-1}A^{jT} & -d_j C\theta_j \\ & d_j S\theta_j \\ O_{1,3} & -r_j \\ & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Les paramètres géométriques sont regroupés dans le tableau suivant :

Le modèle géométrique direct (MGD) est l'ensemble des relations qui permettent d'exprimer la situation de l'organe terminal, c.à.d. les coordonnées opérationnelles du robot, en fonction des coordonnées articulaires. Dans le cas d'une chaîne ouverte simple, il peut être représenté par la matrice de passage  ${}^0T_n$  :

$${}^0T_n = {}^0T_1(q_1) {}^1T_2(q_2) \dots {}^{n-1}T_n(q_n) \quad (2.11)$$

Le modèle géométrique direct du robot peut être représenté par la relation :

$$X = f(q) \quad (2.12)$$

q étant le vecteur des variables articulaires tel que :

$$q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_n]^T$$

les coordonnées opérationnelles sont définies par :

$$X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_m]^T = [P_x \ P_y \ P_z \ n_x \ n_y \ n_z \ a_x \ a_y \ a_z]^T$$

## 2.10 Modèle géométrique inverse

### • Problème direct

Si les variables des articulations sont connues, la pose de l'effecteur peut être calculée d'une manière unique en utilisant la matrice de transformation homogène:

$$T_n^0(q) = A_1^0(q_1) A_2^0(q_2) \dots A_n^{n-1}(q_n) \quad (2.13)$$

Problème inverse Il s'agit de déterminer les coordonnées articulaires permettant d'obtenir une situation désirée pour l'effecteur. Problème beaucoup plus difficile pour les raisons suivantes:

1. Les équations à résoudre sont, en général, non linéaires.

En conséquence, il n'est pas toujours possible de trouver une solution de forme fermée (c'est-à-dire, une solution explicite)

2. Le problème peut avoir des solutions multiples

3. Le problème peut avoir un nombre infini de solutions

(par ex. pour des robots cinématiquement redondants)

4. Le problème peut n'avoir aucune

solution admissible

à cause de la structure cinématique du manipulateur Solutions multiples

. Ca dépend du nombre de DDL du robot mais aussi du nombre de paramètres de DH qui sont différents de zéro

- En général, plus le nombre de paramètres de DH différents de zéro est grand, plus le nombre des solutions admissibles est grand

. Pour un manipulateur à 6 DDL sans des butées mécaniques sur les articulations, il y a, en général, 16 solutions admissibles. On a donc besoin de trouver des critères pour choisir parmi ces solutions admissibles

. La présence de butées mécaniques sur les articulations des robots réels peut, éventuellement, réduire le nombre de solutions multiples

admissibles Solutions de forme fermée Pour trouver des solutions de forme fermée est nécessaire de la:

- Intuition algébrique pour trouver les équations significatives qui contiennent les inconnues

Ou

- Intuition géométrique pour trouver des points significatifs sur le robot que peuvent être utilisés pour exprimer la position et/ou orientation en

fonction du nombre des inconnues Solutions numériques Lorsque il n'y a pas des solutions de forme fermée ou elles sont difficiles à déterminer, on peut calculer une solution particulière du problème inverse par des procédures numériques (méthodes itératives d'optimisation non linéaire ou l'algorithme de Levenberg-Marquardt)

- Avantage: on peut appliquer les méthodes numériques à tous les robots

- Inconvénients: les méthodes numériques ne trouvent pas, en général, toutes les solutions admissibles.

Ils trouvent une solution locale au sens où elle dépend des conditions initiales. Ces méthodes sont pénalisantes du point de vue du temps de calcul

## 2.11 Méthode de solution

Pour trouver les solutions de l'équation [3.12] Paul a proposé une méthode qui consiste à pré multiplier successivement les deux membres de l'équation par la matrice  $J^T J_1$

### a) Étape 1

$$X = C T_n G_k$$

En développant :

$$C^{-1} X = C^{-1} C T_n G_k$$

$$C^{-1} X = T_n G_k$$

$$C^{-1} X G_{k-1}^{-1} = T_n G_k G_k$$

$$\underline{C^{-1} X G_k^{-1}} = \underline{T_n} \text{ tel que } \underline{C^{-1} X G_k^{-1}} : \text{connu et } \underline{T_n} : \text{inconnu}$$

où,  $T_n = A_1 A_2 \dots A_n$

⇒ 12 relations avec n'inconnus.

### b) Étape 2 : simplifier les équations.

Séparer certains d.d.l. (si possible)

### c) Étape 3 : résoudre les équations simplifiées.

**Généralement** ⇒ relations trigonométriques ;

⇒ relations non-linéaires ;

⇒ pas toujours facile à résoudre.

4 types d'équation souvent rencontrés :

L'inconnu de ces types d'équation est  $\theta$  et il est calculé avec  $\text{Atan2}(y,x)$  qui donne l'angle dans son cadre.

## **2.12 Conclusion**

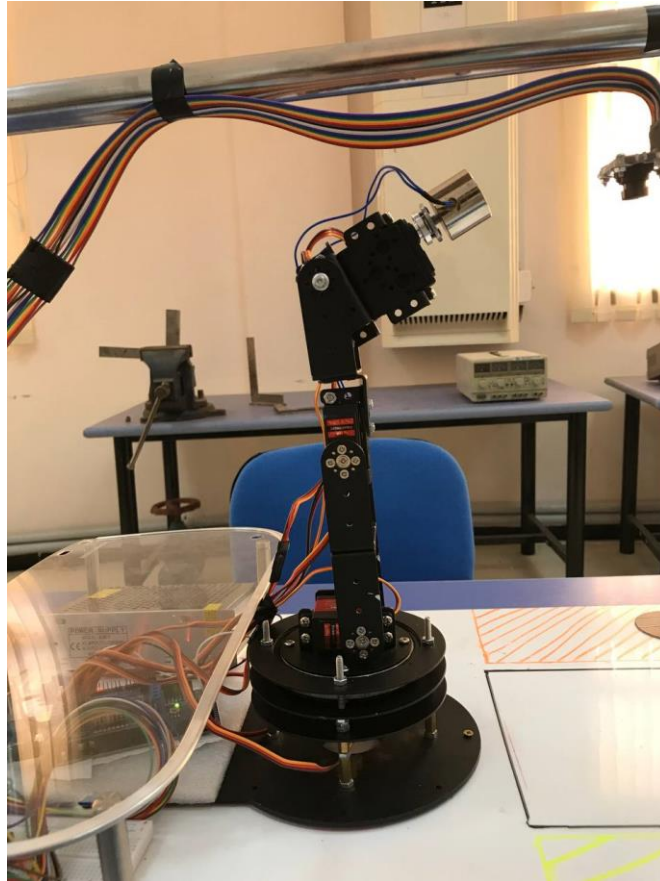
Au cours de ce chapitre nous avons exposé les concepts de base utilisés en robotique, qui comporte les outils mathématiques nécessaires pour la modélisation géométrique qui a été retenue pour modéliser le manipulateur.

## Chapitre3

### 3.1 introduction

L'objectif de cette partie est de calculer le modèle géométrique directe et inverse dans robot manipulateur. Puis la validation des modèles obtenus par simulation sur Matlab/Guide.

La figure suivante présente le robot manipulateur étudié:



**Fig3.1** robot manipulateur 5 DDL

### 3.2 Le modèle géométrique directe

Les figures suivantes présentes la géométrie du robot dans l'espace opérationnelle en fonction des articulations ( $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ ).

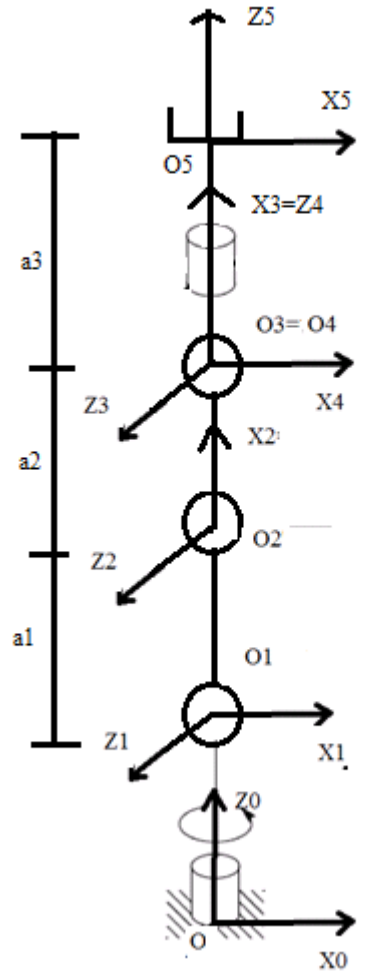


Fig 3.2 Fixage des repères du robot par la convention de D-H

	$A_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	$\pi/2$	0	$\theta_0$
2	$a_1$	0	0	$\theta_1 + \pi/2$
3	$a_2$	0	0	$\theta_2$
4	0	$-\pi/2$	0	$\theta_3 - \pi/2$
5	0	0	$a_3$	$\theta_4$

Tab 3.1 Les paramètres de D-H du robot

$$M_1^0 = \begin{pmatrix} C\theta_0 & 0 & S\theta_0 & 0 \\ S\theta_0 & 0 & -C\theta_0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_2^1 = \begin{pmatrix} -S\theta_1 & -C\theta_1 & 0 & -a_1 S\theta_1 \\ C\theta_1 & -S\theta_1 & 0 & a_1 C\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_3^2 = \begin{pmatrix} C\theta_2 & -S\theta_2 & 0 & a_2 C\theta_2 \\ S\theta_2 & C\theta_2 & 0 & a_2 S\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_4^3 = \begin{pmatrix} S\theta_3 & 0 & C\theta_3 & 0 \\ -C\theta_3 & 0 & S\theta_3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_5^4 = \begin{pmatrix} C\theta_4 & -S\theta_4 & 0 & 0 \\ S\theta_4 & C\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & a_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_5^0 = M_1^0 * M_2^1 * M_3^2 * M_4^3 * M_5^4$$

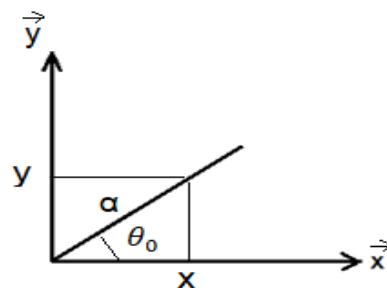
### 3.3 Modèle géométrique Inverse

Dans cette partie et a cause de la nature de l'outil du notre robot qui nécessite pas les orientations (figure 3.2) on s'intéresse uniquement aux articulations de porteur du robot ( $(x,y,z) \rightarrow (\theta_0, \theta_1, \theta_2)$ ).



**Figure 3.3** l'outil de robot étudié.

Les figures suivantes présentes la géométrie du robot dans l'espace opérationnelle en fonction des articulations ( $\theta_0, \theta_1, \theta_2$ ).



**Figure 3.4** la projection de l'effecteur dans le plan XY

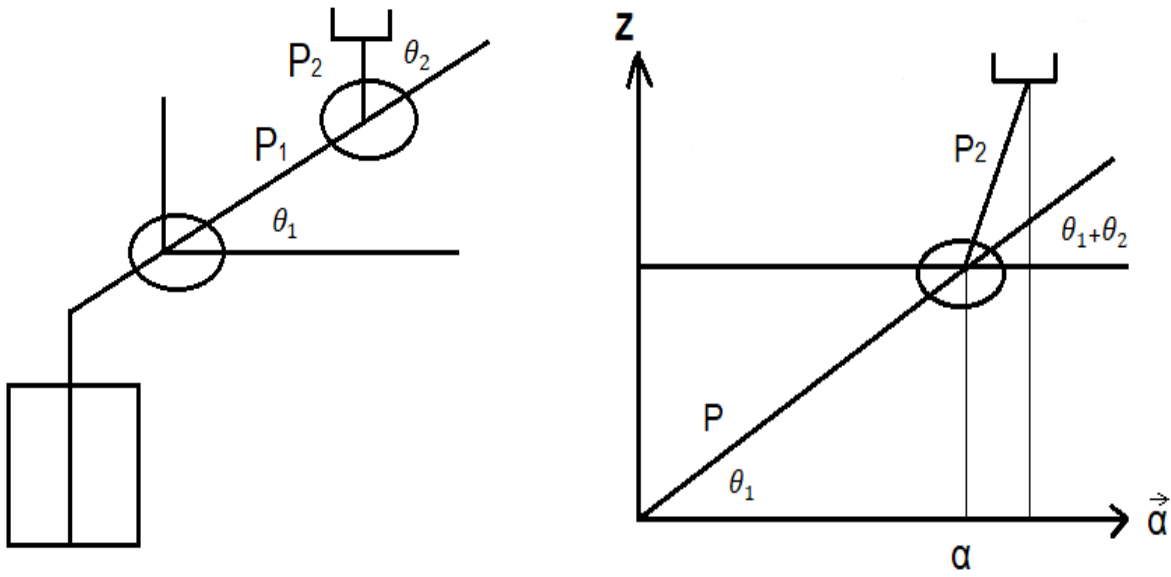


Fig3.5 Géométrie du robot dans l'espace opérationnelle et le plan  $\alpha z$

$$a = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.1)$$

$$\tan \theta_\alpha = \frac{y}{x}$$

$$\theta_0 = \arctan \frac{y}{x} \quad (3.2)$$

$$\begin{cases} a = P_1 \cos \theta_1 + P_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ z = P_1 \sin \theta_1 + P_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (3.3)$$

$$a^2 + z^2 = \{(P_1 \cos \theta_2 + P_2 \cos(\theta_1 + \theta_2))\}^2 + \{P_1 \sin \theta_1 + P_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)\}^2 \quad (3.4)$$

$$= P_1^2 \cos^2 \theta_1 + 2 P_1 P_2 \cos \theta_1 \cos(\theta_1 + \theta_2) + P_2^2 \cos^2(\theta_1 + \theta_2) + P_1^2 \sin^2 \theta_1 + 2 P_1 P_2 \sin \theta_1 \sin(\theta_1 + \theta_2) + P_2^2 \sin^2(\theta_1 + \theta_2) \quad (3.5)$$

$$a^2 + z^2 = p_1^2 + p_2^2 + 2 P_1 P_2 \cos \theta_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + \sin \theta_1 \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

$$=p_1^2 + P_2^2 + 2P_1P_2 \cos \theta_2 \quad (3.6)$$

$$\cos \theta_2 = \frac{\alpha^2 + z^2 - P_1^2 - P_2^2}{2P_1P_2} \quad (3.7)$$

$$\theta_2 = \text{Arc} \cos \frac{\alpha^2 + z^2 - P_1^2 - P_2^2}{2P_1P_2} \quad (3.8)$$

$$\begin{cases} l_1 \cos \theta_1 = a - l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \sin \theta_1 = z - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\cos(x - B) = \cos x \cos B + \sin x \sin B$$

$$\cos(x + B) = \cos x \cos B - \sin x \sin B$$

$$\sin(x + B) = \sin x \cos B + \cos x \sin x$$

$$l_1 \cos \theta_1 = d - l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 - \sin \theta_1 \sin \theta_2$$

$$l_1 \sin \theta_1 = Z - l_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + \cos \theta_1 \sin \theta_2$$

$$(l_1 + l_2 \cos \theta_2) \cos \theta_1 - l_2 \sin \theta_2 \sin \theta_1 = z \quad (3.10)$$

$$\{l_1 + l_2 \cos \theta_2 \sin \theta_1 + l_2 \sin \theta_2 \cos \theta_1 = \alpha$$

On pose

$$A=(l_1 + l_2 \cos \theta_2) \text{ et } B=l_2 \sin \theta_2 \cos \theta_1$$

$$\begin{cases} A \cos \theta_1 - B \sin \theta_1 = z \\ A \sin \theta_1 + B \cos \theta_1 = \alpha \end{cases} \quad (3.11)$$

La solution de l'équation (3.11) donne :

$$\begin{cases} \cos \theta_1 = \frac{AZ+B\alpha}{A^2+B^2} \\ \sin \theta_1 = \frac{A\alpha-BZ}{A^2+B^2} \end{cases}$$

$$\theta_1 = \arctan(\sin \theta_1 \cos \theta_1)$$

### 3.4 Simulation des modèles proposés

#### Toolbox

Robotics System Toolbox™ propose des outils et des algorithmes pour concevoir, simuler, tester et déployer des applications de robots manipulateurs et mobiles. Pour les robots manipulateurs, la toolbox offre des algorithmes de détection de collision, de planification et de génération de trajectoire, de cinématique directe et inverse, mais aussi de dynamique qui utilisent des représentations d'arbre à corps rigides. Pour les robots mobiles, elle propose des algorithmes de cartographie, de localisation, de planification et de suivi de trajectoires, et de contrôle du mouvement.

La toolbox vous permet de générer des scénarios de test et d'utiliser des exemples de référence prédéfinis pour valider des applications de robotique industrielle communes. Elle comprend également une bibliothèque de modèles de robots industriels disponibles dans le commerce que vous pouvez importer, visualiser, simuler et utiliser avec les applications de référence.

Vous pouvez développer un prototype de robot fonctionnel en combinant les modèles cinématiques et dynamiques fournis. La toolbox vous permet de cosimuler vos applications de robotique en vous connectant directement au simulateur Gazebo. Pour vérifier vos designs sur du hardware, vous pouvez vous connecter à des plateformes de robotique comme Kinova Gen3 ou aux robots de la série UR d'Universal Robots, puis générer et déployer du code (avec [MATLAB Coder™](#) ou [Simulink Coder™](#)).[13]

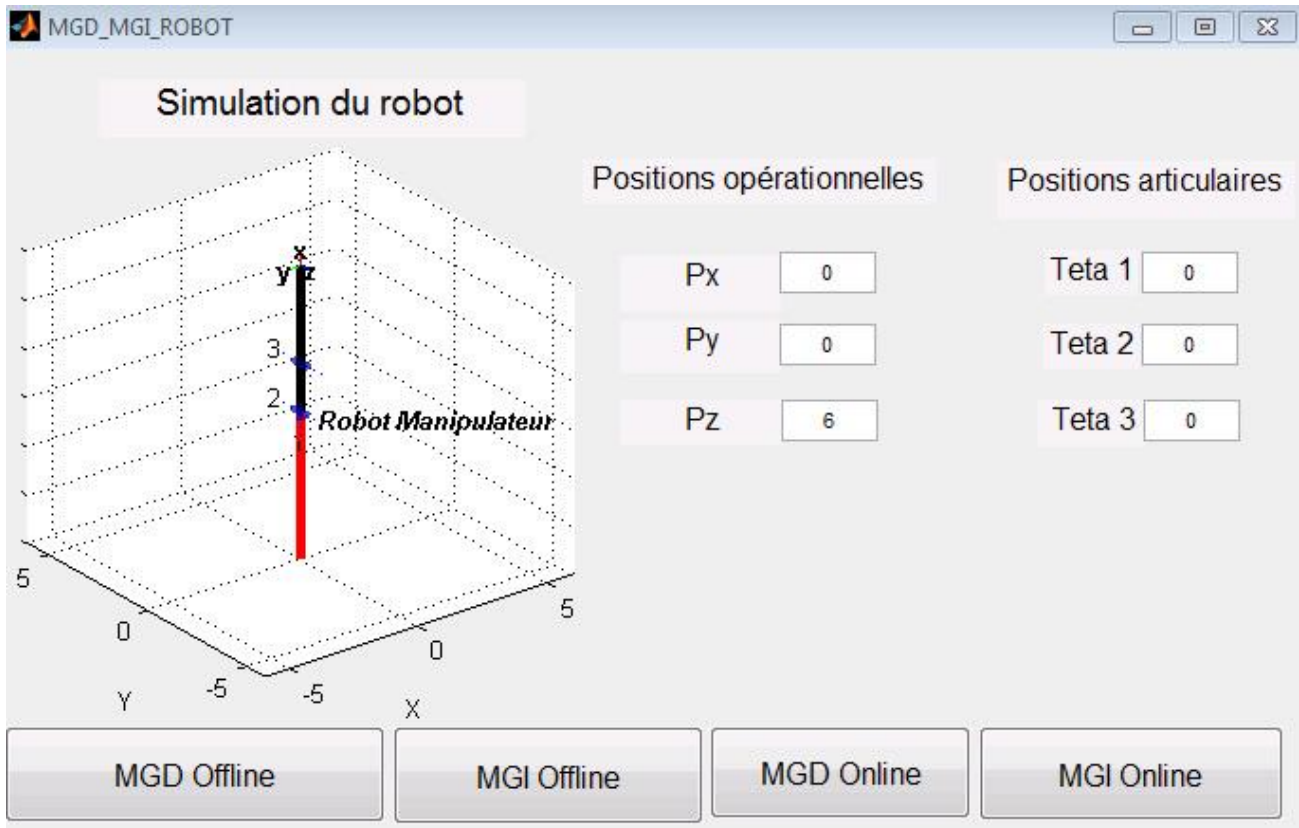


Fig3.6 Le robot dans la position initiale

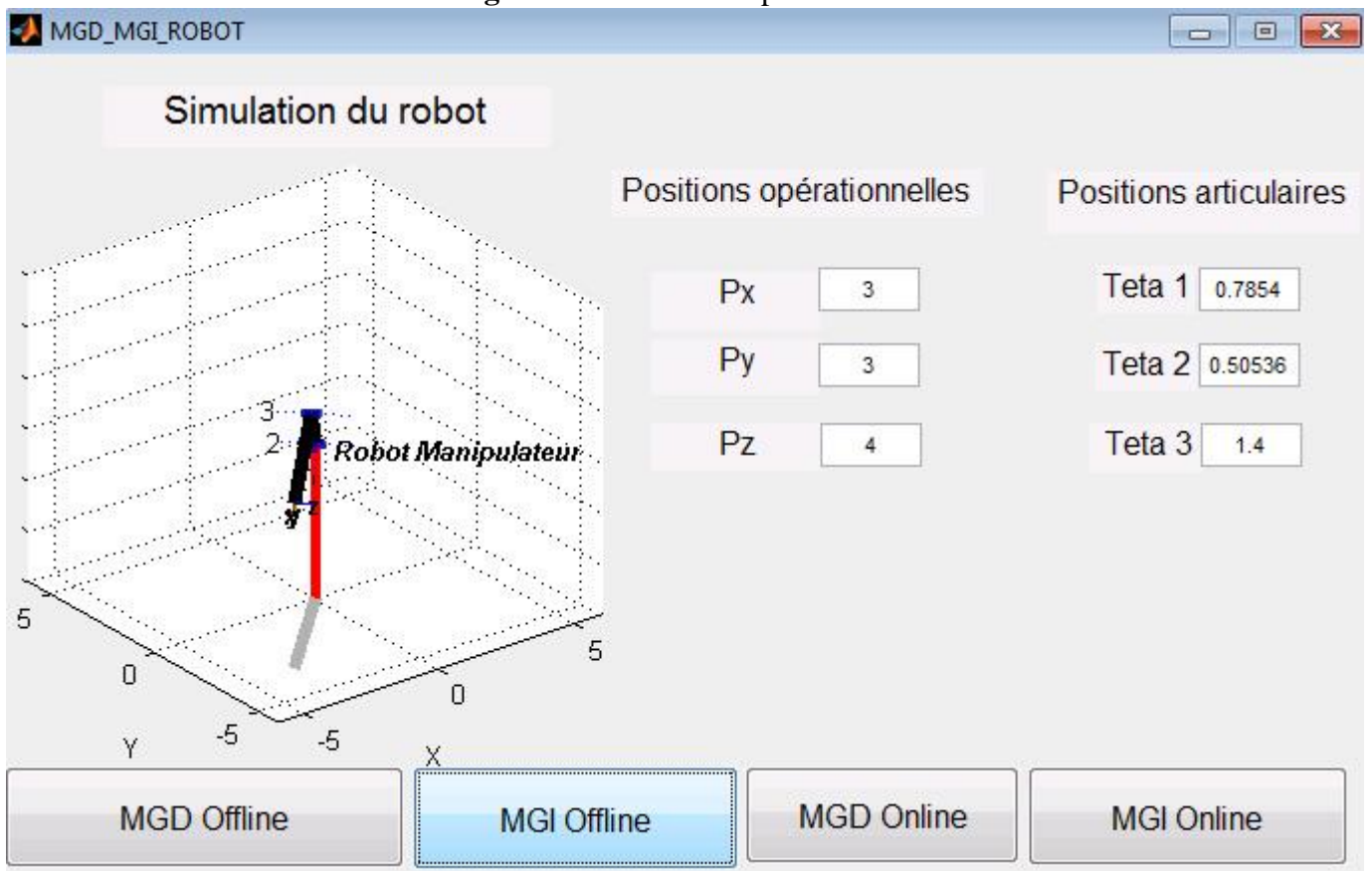
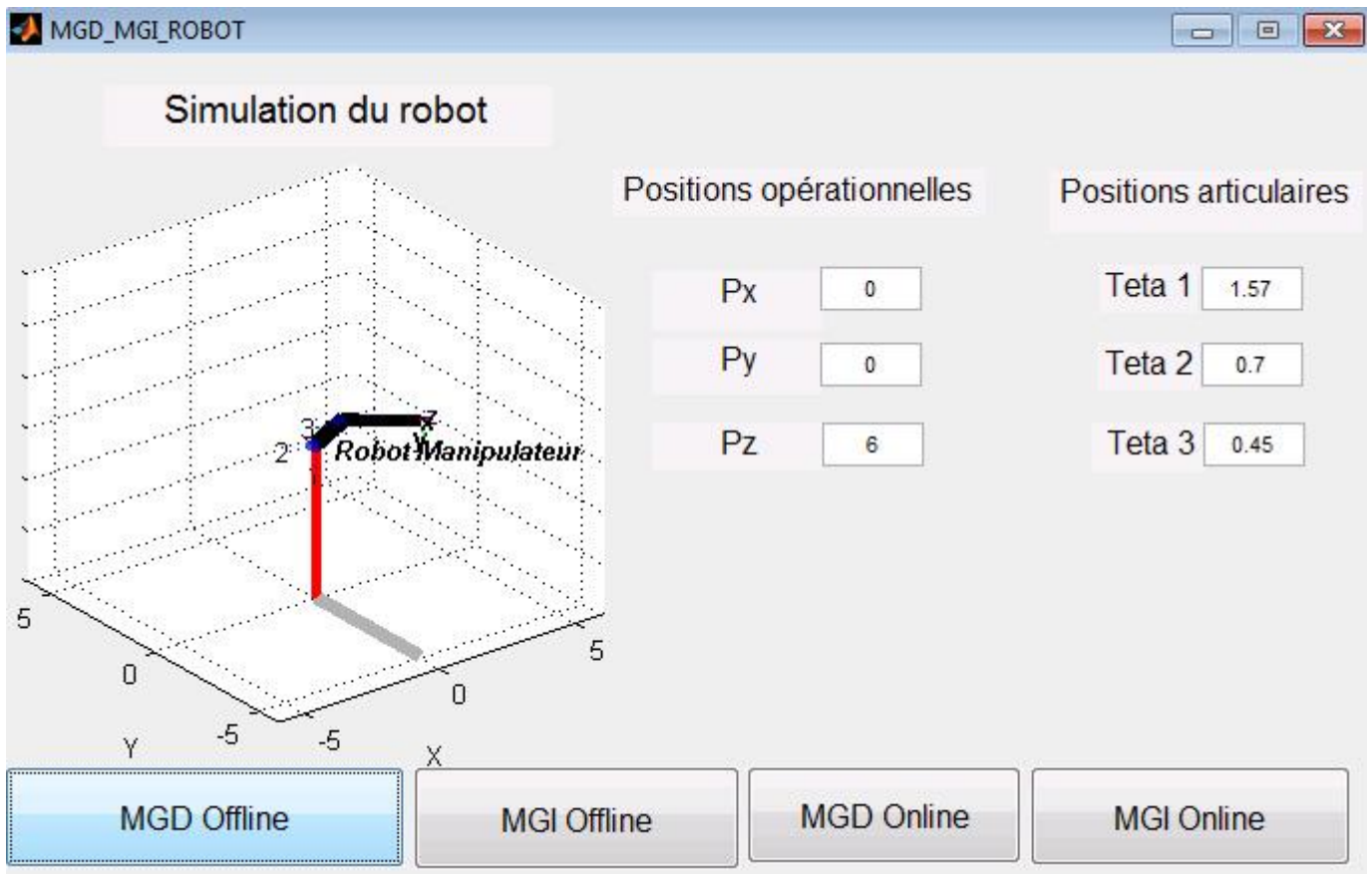


Fig3.7 commande du robot par MGI



**Fig3.8** commande du robot par MGD

### 3.5 Conclusion

Au cours de ce dernier chapitre on a calculé le modèle géométrique directe et inverse d'un robot manipulateur. Les modèles obtenus sont validés on utilisant le toolboxrobotics

Système de petercorke dans une interface graphique homme/machine programmée sur Matlab/guide.

## **Conclusion générale**

Dans ce travail nous avons fait la synthèse d'une commande pour un robot manipulateur par le modèle géométrique inverse du robot. Dans un premier temps, nous avons calculé le modèle géométrique direct du robot pour la simulation du robot dans Matlab Robotics System Toolbox. Puis on a calculé le modèle géométrique inverse du robot par une solution géométrique.

Les modèles obtenus sont validés par simulation en utilisant Matlab Robotics System Toolbox à travers une interface homme/machine dans Matlab/guide.

Les résultats de simulation montrent l'efficacité des modèles calculés pour la simulation et la commande du robot manipulateur. De plus la bibliothèque Matlab Robotics System Toolbox et l'outil Matlab/guide nous ont donné une flexibilité dans la conception et la programmation du robot et de l'interface interactive homme/machine, ils nous ont également permis de concevoir une interface graphique pour afficher le robot et divers résultats avec une haute qualité graphique.

1. S.BORSALI, “ Modélisation des Robots Master Automatique S2 “,cours, UNIVERSITÉ abou\_bekrbelkaid Tlemcen,2012.
2. Malik MALLEM ; “ENSIIE2 Option : Robotique & Réalité Virtuelle“, Cours : Robotique (IRO) « MODELISATIONS GEOMETRIQUE ET CINEMATIQUE DE ROBOTS » ; Ecole Nationale Supérieure d’Informatique pour l’Industrie et l’Entreprise,2016.
3. Jean-Louis Boimond , "Robotique ISTIA", Université Angers ;.
4. M01 ChebbahAbdelouahab " commande des Robots Manipulateurs " mémoire de fin étude ; Université de SAAD DAHLAB, 2019 .
5. ABDELLAOUI Zakarya et BENKHELIFA Badreddine, "Contrôle d’un robot mobile " , thèse, Université Abou BekrBelkaïd Tlemcen, année 2016.
6. HEDDOUCHE Kamel, "Etude et conception d’un Robot marchant ",cours,UniversitéMohamed Khider Biskra, année 2014.
7. BOUR Djilali & CHERIEF Makhlouf, "Commande d'un robot mobile Khepera IV" ,PFE,Université Djilali BOUNAAMA Khemis Miliana, année 2016.
8. SALHI Farid et REZKI Dahmane " Commande à distance d’un chariot mobile avec évitement d’obstacle " ,mémoire fin d’étude ,Université Mouloud MAMMERI, TiziOuzou 2010.
9. SLIMANE Noureddine , "Système de localisation pour robots mobiles“ ,cours, université de batna, 2005.
10. "<https://sites.google.com/site/typesderobots/home/types-de-robots> " ,24 /05/2022
11. W. Khalil et E. Dombre, " Modélisation, identification et commande des robots " édition, Hermes Science publication, Paris, 1999.

12. A. Liegois, " Modélisation, et commande des manipulateur ",Technique de l'ingénieur, article S7730.
13. "<https://petercorke.github.io/robotics-toolbox-python/intro.html>",10/06/2022