1. Introduction :

D'après l'association Française de Normalisation (AFNOR)[2] :
« Un robot est un manipulateur commandé en position, reprogrammable, polyvalent, à plusieurs degrés de libertés, capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils et des dispositifs spécialisés, au cours du mouvements variables et programmés pour l'exécution d'une variété de tâches. Il a souvent l'apparence d'un ou plusieurs bras se terminant par un poignet. Son unité de commande utilise, notamment un dispositif de mémoire et éventuellement de perception et d'adaptation à l'environnement et aux circonstances. Ces machines polyvalentes sont généralement étudiées pour effectuer la même fonction de façon cyclique et peuvent être adaptées à d'autres fonctions sans modification permanente du matériel ».

Dans cette définition, on retrouve les différentes composantes d'une cellule robotisée :
-Le mécanisme : ayant une structure plus ou moins proche de celle du bras humain, il permet de remplacer ou de prolonger son action. Sa motorisation est réalisée par des actionneurs électriques, pneumatiques ou hydrauliques qui transmettent leurs mouvements aux articulations par des systèmes appropriés.
-La perception : qui 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, mesure de distance, vision artificielle).
-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 de robot.
-L'interface homme-machine à travers laquelle l'utilisateur programme les tâches que le robot doit exécuter.
-Le poste de travail et les dispositifs qui constituent l'environnement dans lequel évolue le robot.
Dans ce chapitre, on parle des matrices de transformations et leurs nécessitées d'exprimer les situations des différents corps du robot les uns par rapport aux autres.
La conception et la commande des robots nécessitent le calcul de certains modèles mathématiques tels que :

- Les modèles géométriques direct et inverse qui expriment la situation de l'organe terminal en fonction des variables articulaires du robot et inversement.
- Les modèles cinématiques direct et inverse qui expriment la vitesse de l'organe terminal en fonction des vitesses articulaires et inversement.

Et encore, on parle des robots manipulateurs rigides et l'analyse de publications trouvées dans la littérature, ainsi les principaux axes de recherches concernant :

- Contrôle de la dynamique des robots manipulateurs.
- analyse de rigidité.

Puis, sur les robots manipulateurs flexibles et l'analyse de publications trouvées dans la littérature, avec les principaux axes de recherches concernant :

- Identification, modélisation des robots manipulateurs flexibles.
- Contrôle de la dynamique des robots manipulateurs flexibles.

1.1. Notions générales sur la robotique :

1.1.1. Le robot et la robotique [3]:

Un robot est un dispositif mécanique articulé capable d'imiter certaines fonctions humaines telles que la manipulation d'objets ou la locomotion, dans le but de se substituer à l'homme pour la réalisation de certaines tâches matérielles, cette réalisation est plus ou moins autonome selon les facultés de perception de l'environnement dont est doté le robot.
La robotique est l'ensemble des activités de construction et de mise en œuvre des robots,on peut dire aussi que tout dispositif comporte une partie [opérationnelle]qui réalise la tâche et une partie [décisionnelle ou commande]qui contrôle la partie opérationnelle.

1.1.2. Relation Homme-Tâche [3] :

La figure 1.1 représente schématiquement quatre modes de relations entre l'homme et la tâche qu'il doit effectuer à l'aide d'un outil (outil à prendre dans un sens très général), on va se préoccuper de la façon dont l'homme agit sur l'outil et de la façon de contrôler la bonne exécution de la tâche.

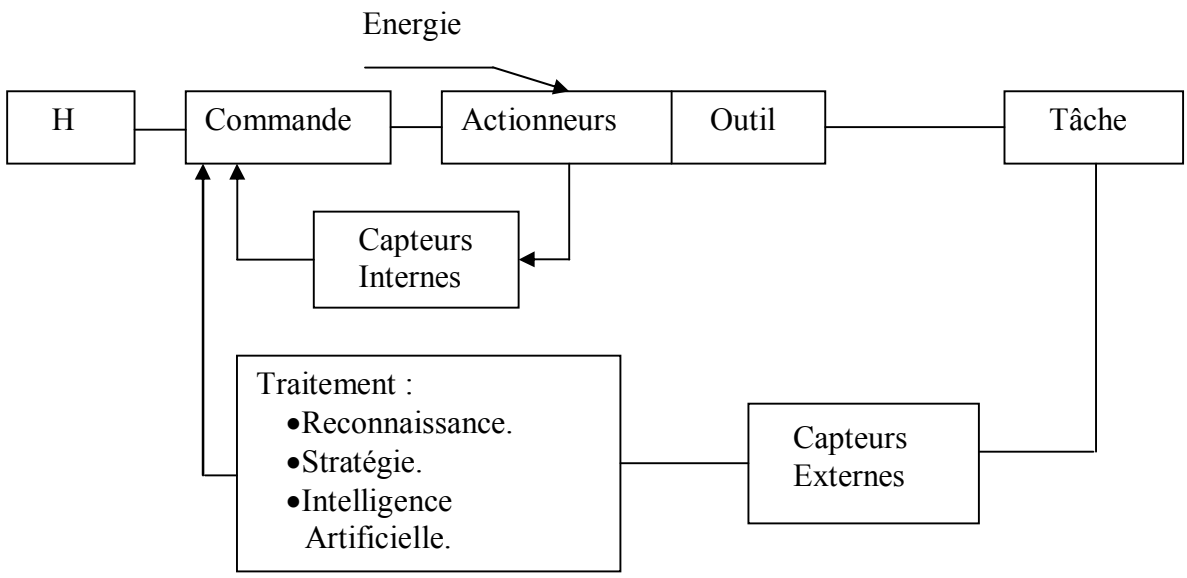

Figure1.1 : La relation Homme-tâche [3]

1.1.2.1.Types de tâche [3] :

Selon le type de tâche et le secteur d'application, le robot aura une architecture mécanique et un système de contrôle-commande différents parmi ces tâches peuvent être en milieu normale ou hostile:

- Manutention de pièces
- Soudage (assurer une bonne précision de la trajectoire de soudure).
- Peinture (il doit être animé d'une grande vitesse)
- Assemblage (l'exigence d'une très grande précision de positionnement)
- Aider le chirurgien dans une opération (robotique médicale).
- Robot mobile évoluant dans un environnement inconnu et sur sol accidentée (la robotique militaire).

1.1.3. Architecture mécanique :

1.1.3.1.Liaisons mécaniques [3]:

-Définition des liaisons usuelles : Un système mécanique articulé (SMA) est un ensemble de solides reliés entre eux par des liaisons schématisées figure1.2(a) par des points ,pour définir une liaison ,par exemple entre S_1 et S_2,il faut isoler S_1 et S_2 de l'ensemble selon la figure1.2(b).On définit alors le d.d.l(degré de liberté) de la liaison comme étant le nombre de mouvements indépendants possibles de S_2 par rapport à S_1 .Les liaisons les plus usuelles sont représentées dans le tableau de la figure1.3.

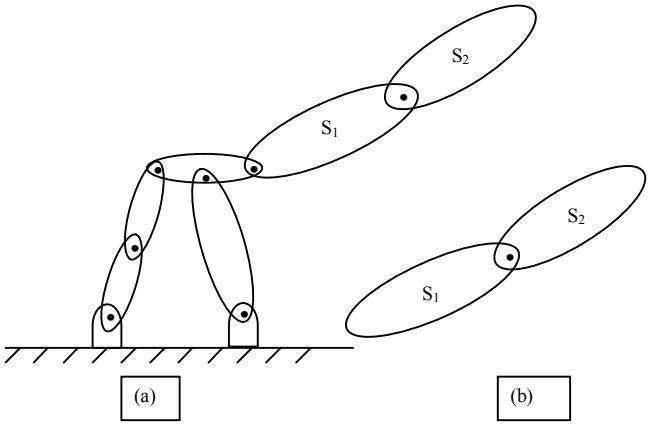

Figure1.2 (a),(b) : Schématisation d'un SMA.[3]

Liaison	Schémas	Mouvements de 2/1	d.d.l
Pivot (ou Rotoïde, ou de Rotation)		Rotation autour de l'axe z_1 de vitesse angulaire ω_{z_1}	1
Prismatique (ou Glissière, ou de Translation)		Translation suivant l'axe z_1 de vitesse V_{z_1}	1
Sphérique (ou Rotule)		3 mouvements de rotation indépendants autour des axes x_1, y_1, z_1 de vitesse ω_{x_1}, ω_{y_1}, ω_{z_1}	3
Cardan (ou Joint de Hooke)		2 mouvements de rotation indépendants autour des axes x_3 et y_3 du croisillon, de vitesse angulaire ω_{x_3}, ω_{y_3}	2
Appui ponctuel sans frottement		3 mouvements de rotation ω_{x_1}, ω_{y_1}, ω_{z_1} et 2 mouvements de translation V_{x_1}, V_{y_1}	5
Hélicoïdale		Un mouvement de rotation indépendant ω_{z_1} et un mouvement de translation V_{z_1} dépendant par $V_{z_1} = \text{pas} \times \omega_{z_1}$	1

Figure1.3-Liaisons usuelles [3]

1.1.4. Types d'architecture de SMA en robotique [3] :

Le nombre d'actionneurs (qui sera définit par la suite) représente ce qui d'usage d'appeler le d.d.l du robot .Sur la figure 1.4 les liaisons motorisées sont celles auxquelles sont associées les variables articulaires q_i de commande. C'est un moyen de distinguer les liaisons actives des liaisons passives.

- **Architecture série (ou chaîne cinématique ouverte), figure1.4 (a)**

Il n'y a qu'un chemin possible pour aller du bâti à la pince, les segments du robot ainsi que les liaisons sont bien mises en série.

- **Architecture parallèle (ou chaîne cinématique multi boucle), figure1.4 (c)**

Pour aller de la pince au bâti, il y a six chemins différents et sur chaque chemin, une seule liaison active prismatique.

- **Architecture mixte, figure1.4 (b), (d), (e) et (f)**

On dit aussi série-parallèle ou parallèle-série selon la prédominance de liaisons en série ou en parallèle.

-Pour le robot manipulateur (b) présentant une boucle cinématique, si on part de la pince, on rencontre trois liaisons pivot actives en série de paramètres q_3 et q_2, enfin en série la liaison pivot active q_1.Les liaisons pivot en B, C, D sont passives. Les liaisons en série dominent, c'est donc un robot manipulateur série-parallèle, on dit aussi à une boucle.

-Pour le robot marcheur (d),la plate forme est reliée au bâti par quatre chaînes cinématique identiques en parallèle (les pattes),chacune d'elles,telle que $A_iB_iC_i$ comporte trois liaisons pivot motorisées et une liaison de contacte .Le robot marcheur est donc parallèle-série à 12 d.d.l .

-Le robot mobile (e) qui compte 8 d.d.l, les 6 d.d.l du bras manipulateur d'architecture série et les 2 d.d.l q_1 et q_2 du chariot en parallèle.

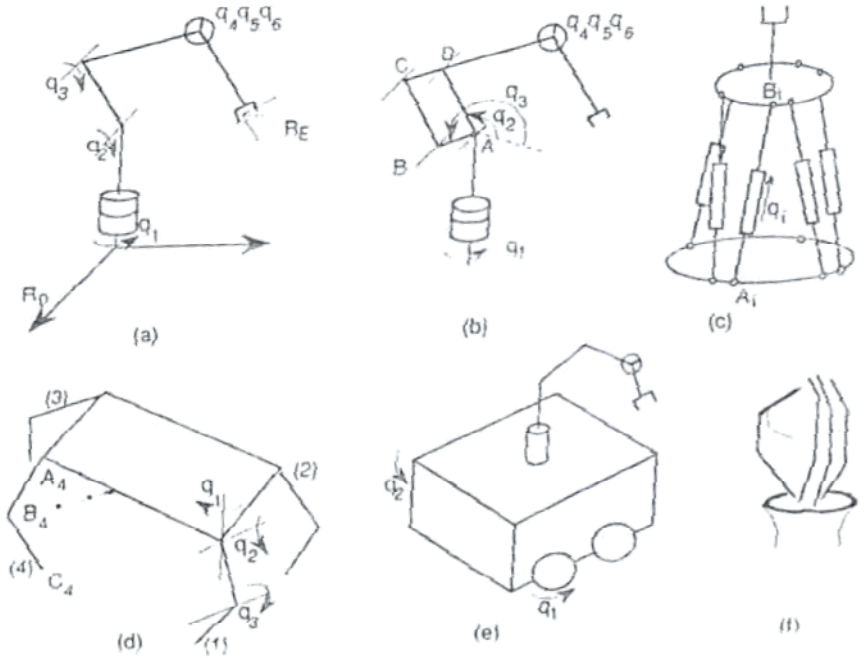

Figure1.4-Exemples d'architectures de SMA en robotique [3]

1.1.5. Robot à architecture série :

Il est d'usage de distinguer dans un robot manipulateur série le porteur et la poignet : figure 1.4b:

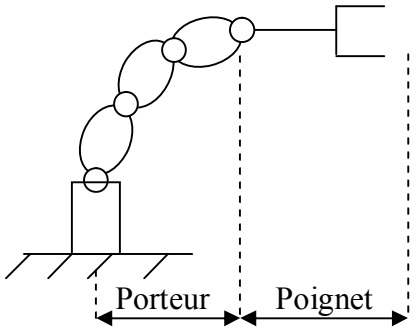

Figure 1.4b : structure générale d'un Robot manipulateur[2]

•Porteur, figure1.5 :

Les liaisons utilisées sont en général des articulations de rotation (liaison pivot) notée R et des articulations prismatiques (liaison prismatique) notée P

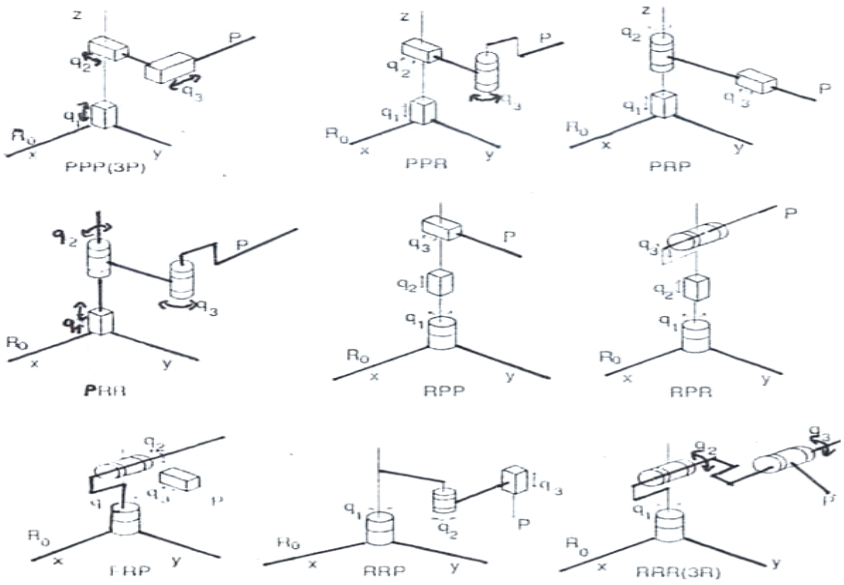

Figure1.5 : Principales architectures de porteurs [3]

•Poignet, figure1.6 :

Le poignet est distiné à l'orientation de la pince ou de l'outil porté par le robot, la structure la plus courante est représentée par la figure1.6 :

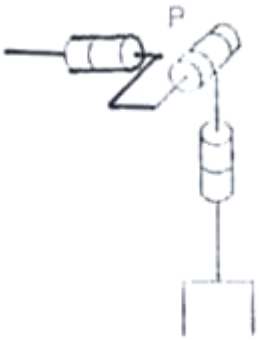

Figure1.6-Poignet [3]

1.1.6. Actionneurs [3]:

Pour être animé, le SMA comporte des moteurs le plus souvent avec des transmissions (l'ensemble constitue les actionneurs), des capteurs délivrant des informations sur l'état du SMA et à son extrémité un outil ou un préhenseur, ce que l'on qualifie plus généralement d'éffecteur car c'est lui qui aura un effet direct sur l'environnement. On distingue :

1.1.6.1.Robots électriques :

Les actionneurs les plus fréquents utilisent des moteurs électriques .Les mœurs classiques ont une vitesse de régime élevée par rapport au niveau d'une articulation pivot,le moteur sera suivi d'un réducteur ,ce qui permet d'avoir une amplification du couple moteur.

1.1.6.2.Robots hydrauliques :

Pour les robots devant manipuler de très lourdes charges, les actionneurs sont le plus souvent hydrauliques, agissant en translation (vérins hydrauliques) ou en rotation.

1.1.6.3.Robots pneumatiques (manipulateurs à cycles):

Les actionneurs pneumatiques sont d'un usage général pour les manipulateurs à cycles. Un manipulateur à cycle (automate ou bras transfert), est un SMA, permettant une succession de mouvements contrôlés uniquement par des capteurs de fin de course réglables manuellement à la course désirée.

1.1.7. Principe de fonctionnement [3]:

Pour bien comprendre le principe de réalisation d'une tache complexe par un robot, il est utile de commencer par la description d'un système robotique un peu plus particulier qui est le télémanipulateur.

-**Système maître-esclave :** Un ensemble de télémanipulation est constitué, comme indiqué sur la figure1.7(a) de deux ensembles mécaniques :

*Un bras articulé à motorisation asservie, ayant de grandes possibilités de mouvement, c'est le bras esclave.

*Un bras, qui est une réplique légère non motorisée du bras esclave mais doté de capteurs internes de position sur les articulations, c'est le bras maître.

Le fonctionnement est le suivant, le bras esclave est en permanence sous le contrôle de l'opérateur qui manipule le bras maître. L'information du capteur de position de l'articulation (i) du bras maître sert d'entrée de consigne q_{ci} de l'asservissement du moteur de l'articulation (i) du bras esclave.

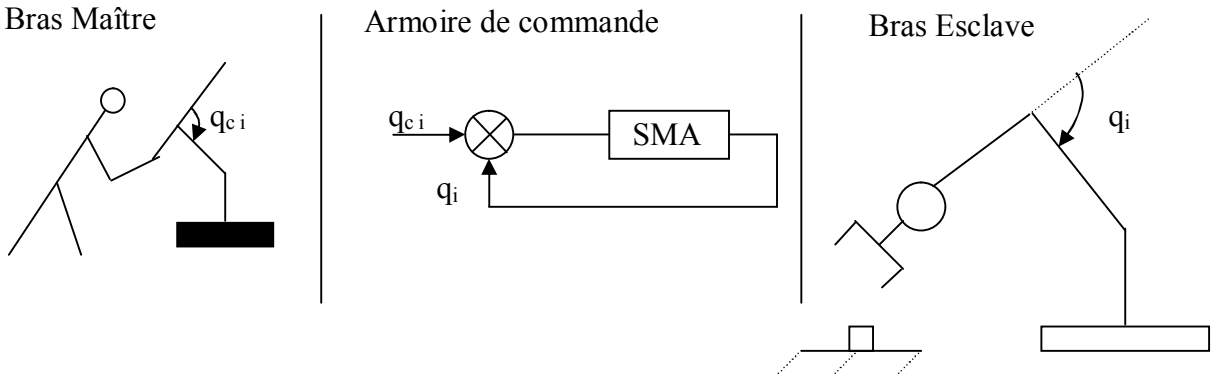

Figure 1.7 (a) : Principe de télémanipulateur maître- esclave [3]

1.1.8. Caractéristiques d'un robot [2]:

On peut mentionner quelques-unes qui permettent de choisir un robot en fonction de l'application envisagée :

-L'espace de travail.

-La charge utile ou charge maximale transportable par le robot.
-Les vitesses et accélérations maximales, qui conditionnent les temps de cycle.
-Les performances (exactitude, répétitivité).
-La résolution : c'est la plus petite modification de la configuration du robot à la fois observable et contrôlable par le système.

1.2. Matrices de transformation homogènes [2]:

La notion de transformation de repère est donc fondamentale, elle permet :
-D'exprimer les situations des différents corps du robot les uns par rapport aux autres.
-De spécifier les situations que doit prendre le repère associé à l'organe terminal du robot pour réaliser une tâche donnée.
-De décrire et de contrôler les efforts mis en jeu lorsque le robot interagit avec son environnement.
-D'intégrer à la commande les informations sensorielles issus de capteurs ayant chacun son système de référence propre.

1.2.1. Représentation d'un point :

Soit P un point de coordonnées cartésiennes p_x , p_y,p_z (figure 1.7(b)).On appelle coordonnées homogènes du point P les termes w. p_x ,w. p_y ,w. p_z et w où w est un facteur d'échelle égale à 1 en robotique. On représente alors les coordonnées homogènes d'un point par le vecteur :

$$P = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix}$$

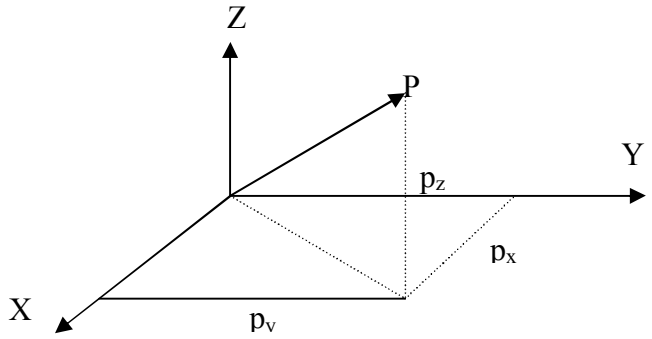

Figure1.7(b)Représentation d'un point [2]

1.2.2. Transformations homogènes des repères :

Faisons subir une transformation quelconque,de translation et ou de rotation au repère R_i,une transformation qui l'amène sur le repère R_j (figure 1.8).Cette transformation est définit par la matrice ${}^iT_j$ appelée matrice de transformation homogène,de dimension(4*4),telle que :

$$ {}^iT_j = \begin{bmatrix} {}^is_j & {}^in_j & {}^ia_j & {}^ip_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (1\text{-}1)$$

Oŭ, ${}^is_j$,${}^in_j$ et ${}^ia_j$ désignent respectivement les vecteurs unitaires suivant les axes x_j,y_j et z_j du repère R_j exprimés dans le repère R_i et ou ${}^iP_j$ est le vecteur exprimant l'origine du repère R_j dans le repère R_i.
On dit également que la matrice ${}^iT_j$ définit le repère R_j dans le repère R_i, comme on peut noter la matrice de transformation sous forme partitionnée :

$$ {}^{i}T_j = \begin{bmatrix} & {}^{i}A_j & & {}^{i}P_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{i}s_j & {}^{i}n_j & {}^{i}a_j & {}^{i}P_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

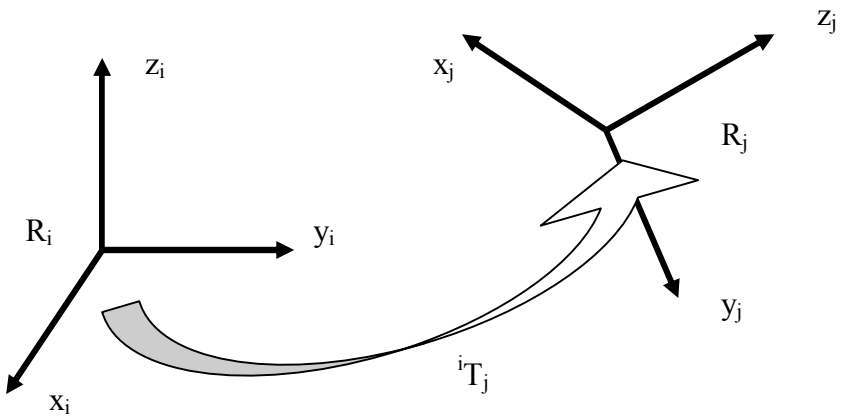

Figure 1.8 Transformation des repères [2]

1.2.3. Matrice de transformation de translation pure :

Soit Trans (a, b, c) cette transformation, oŭ a, b, et c désignent les composantes de la translation le long des axes x, y et z respectivement. L'orientation étant conservée dans cette transformation, Trans (a, b, c) a pour expression (figure 1.9) :

$$ {}^{i}T_j = Trans(a,b,c) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

Ainsi, la matrice Trans (a, b, c) peut être décomposée en un produit de trois matrices :
Trans (a, b, c)=Trans(x, a). Trans(x, b). Trans(x, c)

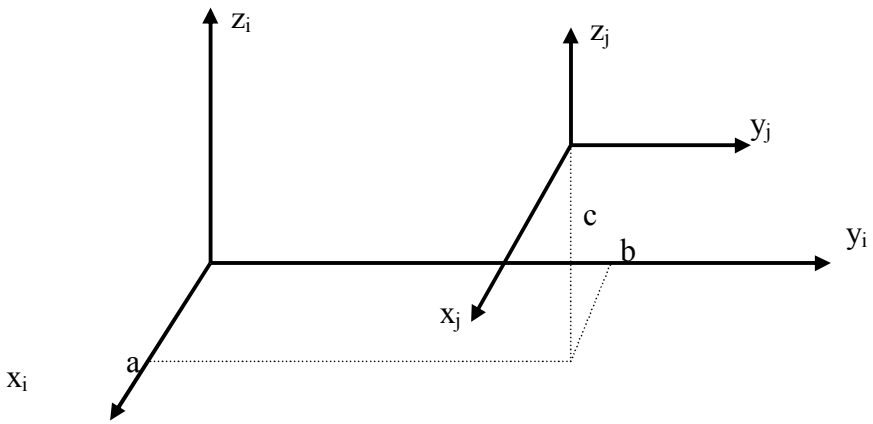

Figure 1.9 Transformation de translation pure [2]

1.2.4. Matrices de transformation de rotation autour des axes principaux [2] :

1.2.4.1.Une rotation θ autour de l'axe x :

Soit Rot(x, θ) cette rotation. On déduit de la figure (1.10) les composantes des vecteurs unitaires, ${}^{i}s_j$,${}^{i}n_j$ et ${}^{i}a_j$ portés respectivement par les axes x_j,y_j et z_j du repère R_j et exprimés dans le repère R_i. Si l'on Sθ et Cθ les sinus et cosinus de θ respectivement, elles s'écrivent :

$$\begin{cases} {}^{i}s_j = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \\ {}^{i}n_j = [0 \quad c\theta \quad s\theta \quad 0]^T \\ {}^{i}a_j = [0 \quad -s\theta \quad c\theta \quad 0]^T \end{cases} \qquad (1\text{-}2)$$

L'exposant T désignent la transposition, on obtient :

$${}^{i}T_j = Rot(x,\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta & -s\theta & 0 \\ 0 & s\theta & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & Rot(x,\theta) & & 0 \\ & & & 0 \\ & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (1\text{-}3)$$

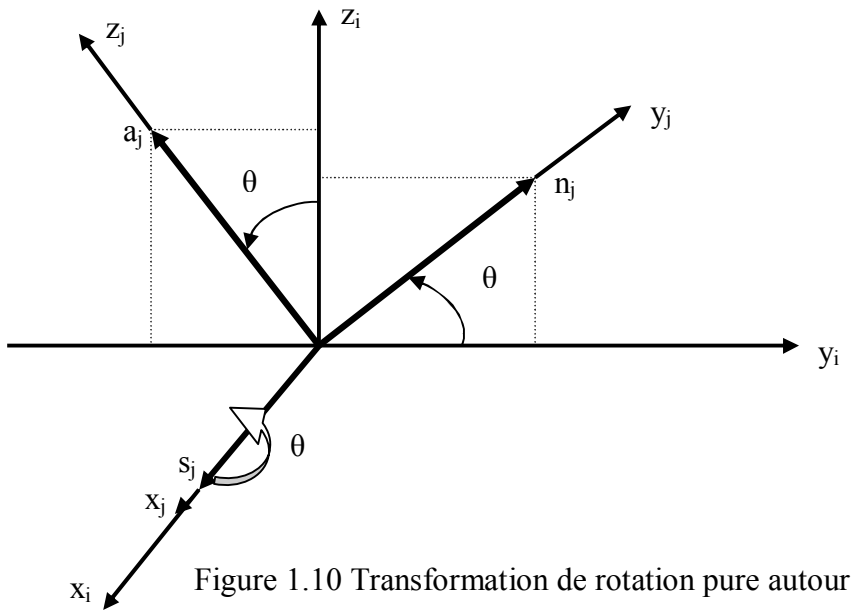

Figure 1.10 Transformation de rotation pure autour de l'axe x [2]

1.2.4.2.Une rotation θ autour de l'axe y :

$${}^{i}T_j = Rot(y,\theta) = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & s\theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & rot(y,\theta) & & 0 \\ & & & 0 \\ & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (1\text{-}4)$$

1.2.4.3.Une rotation θ autour de l'axe z :

$$ {}^{i}T_{j} = Rot(z,\theta) = \begin{bmatrix} c\theta & -s\theta & 0 & 0 \\ s\theta & c\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & rot(z,\theta) & & 0 \\ & & & 0 \\ & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (1\text{-}5) $$

1.2.5. Propriétés des matrices de transformation homogène [2]:

$$ T = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & P_x \\ s_y & n_y & a_y & P_y \\ s_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & A & & P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (1\text{-}6) $$

-La matrice A est orthogonale, c'est à dire que la matrice inverse est égale à la matrice transposée.
-L'inverse de la matrice ${}^{i}T_{j}$ définit la matrice ${}^{j}T_{i}$.
-u : une direction donnée.

$$ Rot^{-1}(u,\theta) = Rot(u,-\theta) = Rot(-u,\theta) \qquad (1\text{-}7) $$

$$ Trans^{-1}(u,d) = Trans(-u,d) = Trans(u,-d) \qquad (1\text{-}8) $$

-Si un repère R_0 a subit k transformations consécutives et si chaque transformation i (i=1,.., k) est définie par rapport au repère courant R_{i-1} ,alors la transformation ${}^{0}T_{k}$ peut etre déduite de la composition des multiplications à droite de ces transformations :

$$ {}^{0}T_{k} = {}^{0}T_{1}\,{}^{1}T_{2}\,{}^{2}T_{3} \ldots {}^{k-1}T_{k} \qquad (1\text{-}9) $$

1.3. Modèle géométrique direct des robots à chaîne ouverte simple (MGD) [2]:

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

* Les modèles géométriques direct et inverse qui expriment la situation de l'organe terminal en fonction des variables articulaires du mécanisme et inversement.

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

1.3.1. Description de la géométrie des robots à structure ouverte simple :

Une structure ouverte simple est composée de (n+1) corps notés $C_0,\ldots,C_n$ 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} (figure 1.11).
La méthode de description est fondée sur les règles suivant et conventions suivantes :

-Les corps sont supposés parfaitement rigides, ils sont connectés par des articulations considérées comme idéales (pas de jeu mécanique), soit rotoïdes, soit prismatiques.

-Le repère R_j est lié au corps C_j.

-La variable de l'articulation j est notée q_j.

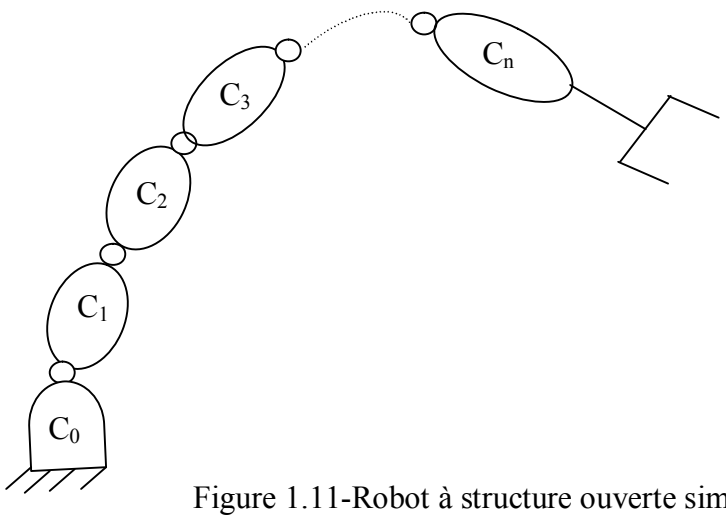

Figure 1.11-Robot à structure ouverte simple [2]

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}.

Le passage du repère R_{j-1} au repère R_j s'exprime en fonction des quatre paramètres géométriques suivants (figure 1.12) :

- α_J : angle entre les axes z_{j-1} et z_j correspondant à une rotation autour de x_{j-1}.
- d_j : distance entre z_{j-1} et z_j le long de x_{j-1}.
- θ_j : angle entre les axes x_{j-1} et x_j correspondant à une rotation autour de z_j.
- r_j : distance entre x_{j-1} et x_j le long de z_j.

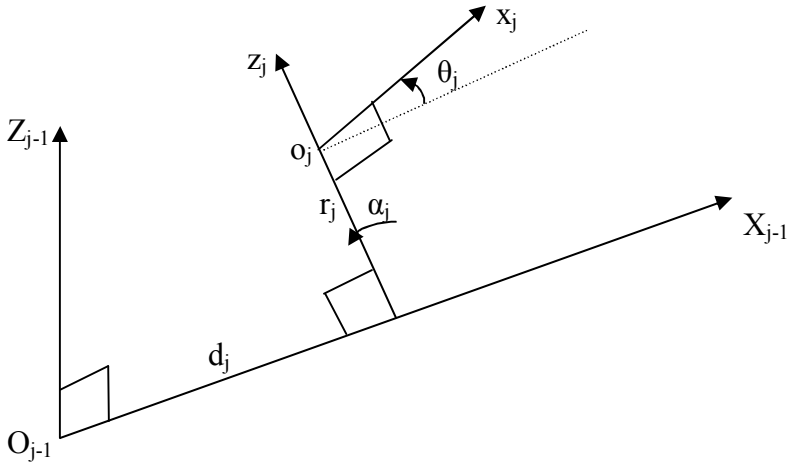

Figure 1.12-Paramètres géométriques d'une structure ouverte simple [2]

La variable articulaire q_j associé à la $j^{ième}$ articulation est soit θ_j, soit r_j, selon que cette articulation est de type rotoïdes ou prismatique, ce qui se traduit par la relation :

$$q_j = \overline{\sigma_j}\theta_j + \sigma_j r_j \qquad (1\text{-}10)$$

Avec :

- $\sigma_j = 0$ si l'articulation j est rotoïdes.
- $\sigma_j = 1$ si l'articulation j est prismatique.
- $\overline{\sigma_j} = 1 - \sigma_j$.

La matrice de transformation définissant le repère R_j dans le repère R_{j-1} est donnée par la (figure 1.12) :

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

$$= \begin{bmatrix} c\theta_j & -s\theta_j & 0 & d_j \\ c\alpha_j s\theta_j & c\alpha_j c\theta_j & -s\alpha_j & -r_j s\alpha_j \\ s\alpha_j s\theta_j & s\alpha_j c\theta_j & c\alpha_j & r_j c\alpha_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (1\text{-}11)$$

Lorsqu'une cinématique comporte deux ou plusieurs axes parallèles consécutifs, on peut se ramener à une seule matrice de transformation équivalente faisant intervenir la somme des variables articulaires.

Par exemple, si $\alpha_{j+1} = 0$, c'est-à-dire si z_j et z_{j+1} sont parallèles, la transformation directe s'écrit :

$$^{j-1}T_{j+1} = {}^{j-1}T_j\,{}^{j}T_{j+1}$$

$$= Rot(x,\alpha_j)Trans(x,d_j)Rot(z,\theta_j)Trans(z,r_j)$$

$$Trans(x,d_{j+1})Rot(z,\theta_{j+1})Trans(z,r_{j+1})$$

$$= \begin{bmatrix} c(\theta_j+\theta_{j+1}) & -s(\theta_j+\theta_{j+1}) & 0 & d_j + d_{j+1}c\theta_j \\ c\alpha_j s(\theta_j+\theta_{j+1}) & c\alpha_j c(\theta_j+\theta_{j+1}) & -s\alpha_j & d_{j+1}c\alpha_j s\theta_j - (r_j + r_{j-1})s\alpha_j \\ s\alpha_j s(\theta_j+\theta_{j+1}) & s\alpha_j c(\theta_j+\theta_{j+1}) & c\alpha_j & d_{j+1}s\alpha_j s\theta_j + (r_j + r_{j-1})c\alpha_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (1\text{-}12)$$

1.3.2. Exemple 1 [2]:

Description de la géométrie du robot Stäubli RX-90 (figure 1.13), la cinématique du porteur est de type RRR et le poignet comporte trois rotations d'axes concourants, équivalentes à une rotule.

D'un point de vue méthodologique, on place d'abord les axes z_j sur les axes articulaires, puis les axes x_j selon les règles énoncées précédemment.

On détermine ensuite les paramètres géométriques du robot. Le placement est indiqué sur la figure 1.13 et les paramètres géométriques sont donnés dans le tableau 1

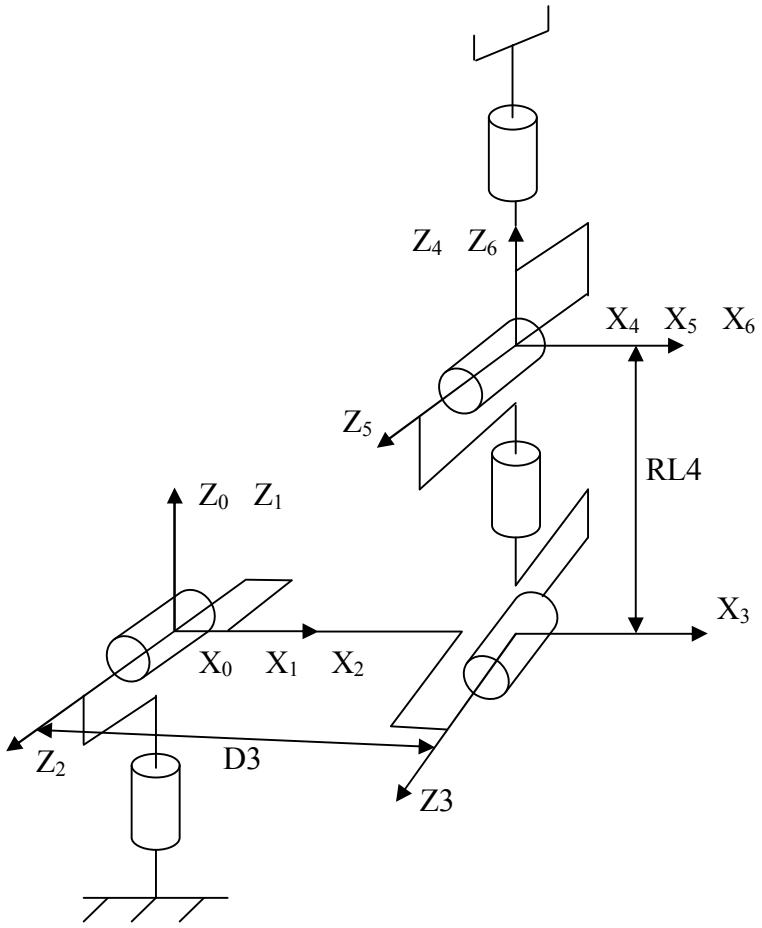

Figure 1.13-Placement des repères pour le robot Stäubli [2]

J	σ_j	α_j	d_j	θ_j	r_j
1	0	0	0	θ_1	0
2	0	90	0	θ_2	0
3	0	0	D3	θ_3	0
4	0	-90	0	θ_4	RL4
5	0	90	0	θ_5	0
6	0	-90	0	θ_6	0

Tableau 1-1 : Paramètres géométriques du robot Stäubli [2]

1.3.3. Modèle géométrique direct des robots à structure ouverte simple (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. Dans le cas d'une chaîne ouverte simple, il peut être représenté par la matrice de passage ${}^{0}T_n$:

$${}^{0}T_n = {}^{0}T_1(q_1)\,{}^{1}T_2(q_2)\ldots{}^{n-1}T_n(q_n) \qquad (1\text{-}13)$$

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

$X=f(q)$ (1-14)

q: étant le vecteur des variables articulaires tel que :

$q = [q_1\ q_2\ .\ .\ .q_n]^T$ (1-15)

Les coordonnées opérationnelles sont définies par :

$$X = [x_1 x_2 \ldots x_m]^T \qquad (1\text{-}16)$$

Par exemple, avec les éléments de la matrice ${}^{0}T_n$:

$$X = [P_x P_y P_z s_x s_y s_z n_x n_y n_z a_x a_y a_z]^T \qquad (1\text{-}17)$$

1.3.4. Exemple 2 [2]:

Modèle géométrique direct du robot Stäubli RX-90, à partir du tableau 1-1 et compte tenu de la relation (1.11),on écrit les matrices de transformation élémentaires ${}^{j-1}T_j$:

$${}^{0}T_1 = \begin{bmatrix} c1 & -s1 & 0 & 0 \\ s1 & c1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^{1}T_2 = \begin{bmatrix} c2 & -s2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s2 & c2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{2}T_3 = \begin{bmatrix} c3 & -s3 & 0 & D3 \\ s3 & c3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Comme les axes 2 et 3 sont parallèles, on peut trouver directement la transformation ${}^{1}T_3$ par la relation (1-12) :

$${}^{1}T_3 = \begin{bmatrix} c23 & -s23 & 0 & c2D3 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s23 & c23 & 0 & s2D3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

avec :

$c23 = cos(\theta_2 + \theta_3)$

$s23 = sin(\theta_2 + \theta_3)$

$$ {}^{3}T_4 = \begin{bmatrix} c4 & -s4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & RL4 \\ -s4 & -c4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^{4}T_5 = \begin{bmatrix} c5 & -s5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s5 & c5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, {}^{5}T_6 = \begin{bmatrix} c6 & -s6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s6 & -c6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

Afin de calculer ${}^{0}T_6$, il est préférable de calculer le produit des matrices ${}^{j-1}T_j$ en partant de la dernière matrice de transformation, ceci pour deux raisons :
-Les résultats intermédiaires ${}^{j}T_6$, notés U_j , seront utilisés pour l'obtention du modèle géométrique inverse(qui sera décrit par la suite).
-On minimise ainsi le nombre d'opérations du modèle.
On écrit donc successivement les U_j pour j = 5,…,0 :

$$ U_5 = {}^{5}T_6 $$

$$ U_4 = {}^{4}T_6 = {}^{4}T_5 U_5 = \begin{bmatrix} c5c6 & -c5s6 & -s5 & 0 \\ s6 & c6 & 0 & 0 \\ s5c6 & -s5s6 & c5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ U_3 = {}^{3}T_6 = {}^{3}T_4 U_4 = \begin{bmatrix} c4c5c6 - s4s6 & -c4c5s6 - s4c6 & -c4s5 & 0 \\ s5c6 & -s5s6 & c5 & RL4 \\ -s4c5c6 - c4s6 & s4c5s6 - c4c6 & s4s5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ U_2 = {}^{2}T_6 = {}^{2}T_3 U_3 $$

Les vecteurs s, n, a, P de U_2 ont pour composantes :

$$ s_x = c3(c4c5c6 - s4s6) - s3s5c6 $$
$$ s_y = s3(c4c5c6 - s4s6) + c3s5c6 $$
$$ s_z = -s4c5c6 - c4s6 $$
$$ n_x = -c3(c4c5s6 + s4c6) + s3s5s6 $$
$$ n_y = -s3(c4c5c6 + s4c6) - c3s5s6 $$
$$ n_z = s4c5s6 - c4c6 $$
$$ a_x = -c3c4s5 - s3c5 $$
$$ a_y = -s3c4s5 + c3c5 $$
$$ a_z = s4s5 $$
$$ P_x = -s3RL4 + D3 $$
$$ P_y = c3RL4 $$
$$ P_z = 0 $$

$U_1 = {}^1T_6 = {}^1T_2 U_2 = {}^1T_3 U_3$

Les vecteurs s, n, a, P correspondants sont :

$s_x = c23(c4c5c6 + s4s6) - s23s5c6.$

$s_y = s4c5c6 + c4s6$

$s_z = s23(c4c5c6 - s4s6) + c23s5c6$

$n_x = -c23(c4c5s6 + s4c6) + s23s5s6$

$n_y = -s4c5s6 + c4c6$

$n_z = -s23(c4c5s6 + s4c6) - c23s5s6$

$a_x = -c23c4s5 - s23c5$

$a_y = -s4s5$

$a_z = -s23c4s5 + c23c5$

$P_x = -s23RL4 + c2D3$

$P_y = 0$

$P_z = c23RL4 + s2D3$

finalement :

$U_0 = {}^0T_6 = {}^0T_1 U_1$

Les vecteurs s, n, a, P correspondants sont :

$s_x = c1(c23(c4c5c6 - s4s6) - s23s5c6) - s1(s4c5c6 + c4s6)$

$s_y = s1(c23(c4c5c6 - s4s6) - s23s5c6) + c1(s4c5c6 + c4s6)$

$s_z = s23(c4c5c6 - s4s6) + c23s5c6$

$n_x = c1(-c23(c4c5s6 + s4c6) + s23s5s6) + s1(s4c5s6 - c4c6)$

$n_y = s1(-c23(c4c5s6 + s4c6) + s23s5s6) - c1(s4c5s6 - c4c6)$

$n_z = -s23(c4c5s6 + s4c6) - c23s5s6$

$a_x = -c1(c23c4s5 + s23c5) + s1s4s5$

$a_y = -s1(c23c4s5 + s23c5) - c1s4s5$

$a_z = -s23c4s5 + c23c5$

$P_x = -c1(s23RL4 - c2D3)$

$P_y = -s1(s23RL4 - c2D3)$

$P_z = c23RL4 + s2D3$

1.4. Modèle géométrique inverse des robots à structure ouverte simple (MGI):

Le modèle géométrique inverse consiste à calculer les coordonnées articulaires correspondant à une situation donnée de l'organe terminal. Il y a plusieurs méthodes de calcul du MGI :

-La méthode de Paul qui traite séparément chaque cas particulier.

-La méthode de Pieper qui permet de résoudre le problème pour les robots à six degrés de liberté possédant trois articulations rotoïdes ou prismatiques.
-La méthode générale de Raghavan et Roth qui donne la solution générale des robots à six articulations.
Dans cette partie d'étude, on présente seulement la méthode de Paul.

1.4.1. La méthode de Paul [2]:

Considérons un robot manipulateur dont la matrice de transformation homogène a pour expression :

$$^{0}T_n = {}^{0}T_1(q_1)\,{}^{1}T_2(q_2)\ldots{}^{n-1}T_n(q_n) \qquad (1\text{-}18)$$

Soit U_0 la situation désirée telle que :

$$U_0 = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x & P_x \\ s_y & n_y & a_y & P_y \\ s_z & n_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (1\text{-}19)$$

On cherche à résoudre le système d'équations suivant :

$$U_0 = {}^{0}T_1(q_1)\,{}^{1}T_2(q_2)\ldots{}^{n-1}T_n(q_n) \qquad (1\text{-}20)$$

Pour trouver les solutions de l'équation (1-20), Paul a proposé une méthode qui consiste à prémultiplier successivement les deux membres de l'équation (1-20) par les matrices $^{j}T_{j-1}$ pour j variant de 1 à n-1.Des opérations qui permettent d'isoler et d'identifier l'une après l'autre les variables articulaires que l'on recherche.
Pour un robot à six degrés de liberté, on procède comme suit :

-Multiplication à gauche de l'expression (1-20) par $^{1}T_0$:

$$^{1}T_0 U_0 = {}^{1}T_2\,{}^{2}T_3\,{}^{3}T_4\,{}^{4}T_5\,{}^{5}T_6 \qquad (1\text{-}21)$$

Le terme de droite est en fonction des variables q_2,…, q6.Il a été déjà calculé avec le modèle géométrique direct (MGD), le terme de gauche n'est fonction que des éléments de U_0 et de la variable q_1.

- Identification terme à terme des deux membres de l'équation (1-21).
-Multiplication à gauche de l'expression (1-21) par $^{2}T_1$ et calcul de q_2.

La succession des équations permettent le calcul de tous les q_j est la suivante :

$$U_0 = {}^{0}T_1\,{}^{1}T_2\,{}^{2}T_3\,{}^{3}T_4\,{}^{4}T_5\,{}^{5}T_6$$
$$^{1}T_0 U_0 = {}^{1}T_2\,{}^{2}T_3\,{}^{3}T_4\,{}^{4}T_5\,{}^{5}T_6$$
$$^{2}T_1 U_1 = {}^{2}T_3\,{}^{3}T_4\,{}^{4}T_5\,{}^{5}T_6$$
$$^{3}T_2 U_2 = {}^{3}T_4\,{}^{4}T_5\,{}^{5}T_6$$
$$^{4}T_3 U_3 = {}^{4}T_5\,{}^{5}T_6$$
$$^{5}T_4 U_4 = {}^{5}T_6$$

avec,

$$U_{j+1} = {}^{j+1}T_j U_j \rightarrow j = 0,\ldots,4$$

L'utilisation de la méthode sur un grand nombre de robots industriels a permis de constater que les principaux types rencontrés sont présentés dans le tableau 1-2, certains types ont une solution évidente, d'autres nécessitent quelques développements.

Type 1	$Xr_i = y$
Type 2	$Xs\theta_i + Yc\theta_i = Z$
Type 3	$X1s\theta_i + Y1c\theta_i = Z1$ $X2s\theta_i + Y2c\theta_i = Z2$
Type 4	$X1r_j s\theta_j = Y1$ $X2r_j c\theta_j = Y2$
Type 5	$X1s\theta_i = Y1 + Z1r_j$ $X2c\theta_i = Y2 + Z2r_j$
Type 6	$Ws\theta_j = Xc\theta_i + Ys\theta_i + Z1$ $Wc\theta_j = Xs\theta_i - Yc\theta_i + Z2$
Type 7	$W1c\theta_j + W2s\theta_j = Xc\theta_i + Ys\theta_i + Z1$ $W1s\theta_j - W2c\theta_j = Xs\theta_i - Yc\theta_i + Z2$
Type 8	$Xc\theta_i + Yc(\theta_i + \theta_j) = Z1$ $Xs\theta_i + Ys(\theta_i + \theta_j) = Z2$

Tableau 1-2-Types d'équations rencontrées avec la méthode de Paul [2]

1.5. Le modèle cinématique direct des robots à structure ouverte simple :

Le modèle cinématique direct d'un robot manipulateur décrit les vitesses des coordonnées opérationnelles en fonction des vitesses articulaires, il est noté :

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \qquad (1\text{-}22)$$

ou,

$$J(q) = \frac{\partial X}{\partial q} \qquad (1\text{-}23)$$

Ou J (q) : désigne la matrice jacobiènne de dimension (m*n) du mécanisme et fonction de la configuration q.

La même matrice jacobiènne intervient dans le calcul du modèle différentiel direct qui donne les variations élémentaires dX des coordonnées opérationnelles en fonction des variations élémentaires des coordonnées articulaires dq :

dX = J(q) dq (1-24)

1.5.1. Calcul de la matrice jacobiènne par dérivation du MGD[2]:

Le calcul de la matrice jacobiènne peut se faire en dérivant le MGD, X = f(q), à partir de la relation suivante :

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i(q)}{\partial q_j} \qquad i = 1,\ldots,m \quad ;j = 1,\ldots,n \qquad (1\text{-}25)$$

ou J_{ij} est l'élément (i,j) de la matrice jacobiènne J.

1.5.2. Exemple 03 :

Soit le robot plan à trois degrés de liberté d'axes rotoïdes parallèles représenté sur la figure 1-14.On note L1, L2, L3 les longueurs des segments. La matrice de transformation homogène de l'outil dans le repère Ro est donnée par :

$$^{0}T_E = \begin{bmatrix} c123 & -s123 & 0 & c1L1+c12L2+c123L3 \\ s123 & c123 & 0 & s1L1+s12L2+s123L3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

avec,

$c123 = cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$

$s123 = sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)$

$c12 = cos(\theta_1 + \theta_2)$

$s12 = sin(\theta_1 + \theta_2)$

$c1 = cos\,\theta_1$

$s1 = sin\,\theta 1$

On choisit comme coordonnées opérationnelles les coordonnées (P_x,P_y) du point E dans le plan (x_0, y_0) et l'angle α du dernier segment avec l'axe x_0 :

$P_x = c1L1 + c12L2 + c123L3$

$P_y = s1L1 + s12L2 + s123L3$

$\alpha = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$

a matrice jacobiènne est calculée en dérivant ces trois relations par rapport à θ_1, θ_2 et θ_3 :

$$J = \begin{bmatrix} -s1L1 - s12L2 - s123L3 & -s12L2 - s123L3 & -s123L3 \\ c1L + c12L2 + c123L3 & c12L2 + c123L3 & c123L3 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

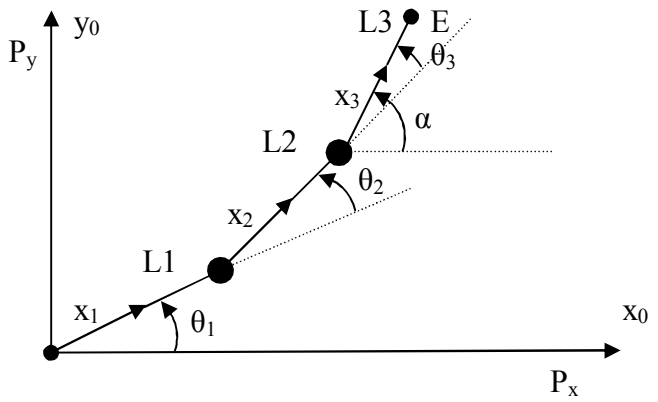

Figure.1-14-Exemple d'un robot plan à trois degrés de liberté [2]

1.6. Le modèle cinématique inverse des robots à structures ouvertes simples [2]:

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

$$\dot{q} = J^{-1}\dot{X} \qquad (1\text{-}26)$$

1.7. Robots manipulateurs rigides :

Les robots manipulateurs sont largement utilisés pour aider l'être humain dans les travaux dangereuses, monotones et fatigants. La plupart des robots qui existent sont dessinés et construits de manière à maximiser leur rigidité, pourvue de minimiser la vibration de poignet afin d'avoir une bonne précision de position pour ce dernier. Alors,la grande rigidité implique leur poids est grand,cela fait que les robots manipulateurs ont une grande consommation d'énergie avec limitation des vitesses de mouvement lors d'une manipulation d'une charge utile.

1.7.1. Contrôle de la dynamique des robots manipulateurs :

Le positionnement réel d'un bras manipulateur, s'écarte inévitablement et pour des différentes causes, de sa position désirée. De même, un bras manipulateur ne se positionne jamais au même endroit lorsque la même trajectoire est répétée plusieurs fois.

Ces erreurs de positionnement sont classées grossièrement en deux classes :

-Certaines sont de nature purement aléatoires et ne peuvent être réduites que par une technologie appropriée.

-Les autres, de nature systématique, peuvent être corrigées, en utilisant un modèle de compensation.

Les erreurs de positionnement d'un bras manipulateur sont de deux natures :

a- **Les erreurs géométriques :** Elles regroupent les imprécisions de fabrication dans les corps et les liaisons et les erreurs d'initialisation des offsets codeurs (les valeurs des offsets codeurs correspondants à la configuration initiale géométrique dans laquelle les variables articulaires sont nulles.

b- **Les erreurs non géométriques :** Elles regroupent les déformations, les jeux dans les chaînes cinématiques, les erreurs liées à la résolution des capteurs et aux performances des asservissements. Elles ne sont pas accessibles à la calibration géométrique.

La procédure d'identification géométrique distingue trois niveaux de complexité :

1-Niveau 1 : ou <<calibration des articulations>>, l'objectif est d'établir la relation la plus exacte entre le signal produit par les capteurs de position et les déplacements articulaires. Ceci, implique généralement la calibration de la cinématique des organes d'entraînement (réducteurs, …, etc.), les mécanismes des codeurs et les valeurs de offsets codeurs.

2-Niveau 2 : ou<<calibration géométrique globale >>dans ce niveau, on doit identifier tous les paramètres géométriques de description du bras manipulateur. L'objectif de ce niveau est de déterminer le modèle géométrique de base, qui lie les coordonnées opérationnelles aux coordonnées articulaires (ou valeurs de commande des actionneurs).

3-Niveau 3 : ou<<calibration non géométrique>>, elle porte sur les possibilités de compenser les erreurs d'ordre non géométriques à savoir les déformations des articulations et des segments et les frottements.

Pour utiliser le modèle dynamique, il faut connaître les valeurs numériques des paramètres de masse (masse, centre de masse, matrice d'inertie) relatifs aux différents corps et qui interviennent dans le modèle dynamique.

Afin d'effectuer la simulation dynamique d'un robot manipulateur ou concevoir le système de commande avancé pour lui, il est nécessaire de donner les équations dynamiques du

mouvement décrivant le comportement dynamique du manipulateur. Actuellement, plusieurs méthodes ont été employées dans ce but, parmi eux on a la méthode de Lagrange-Euler qui est la plus utilisée et sera décrite en détail dans le deuxième chapitre. La méthode peut être appliquée à la conception des systèmes de commande, à la simulation dynamique, et au calcul des forces ou des couples généralisés du manipulateur.
Dans ce domaine, plusieurs articles ont été publiés :

- Le système de contrôle de position à deux degrés de libertés pour un robot manipulateur avec articulation passive [Hirohiko Arai et Susumu Tachi][4]:

Les auteurs proposent une méthode permettant de contrôler la position d'un manipulateur avec des articulations passifs(non-motorisées) qui ont des freins au lieu d'actionneurs,ils utilisent la formulation de Lagrange-Euler pour l'obtention des équations de mouvement du robot manipulateur. Le système de contrôle qui traite trois manières :

1. Le contrôle Feed back qui commande l'angle et la vitesse angulaire de l'articulation passif à suivre les valeurs désirées quand le freinage est engagé.
2. La trajectoire désirée et le contrôle de la trajectoire pour l'articulation passive quand le freinage est engagé.
3. Le contrôle point par point du robot manipulateur en se basant sur l'arrêt du frein et le contrôle de l'articulation active.

- Le contrôle de position du robot manipulateur avec des articulations passives en utilisant le couplage dynamique [Hirohiko Arai][5] :

Cet article décrit une méthode qui permet de contrôler la position du manipulateur par deux manières :

1. On cherche la contrôlabilité du robot manipulateur avec les articulations passives.
2. On cherche la contrôlabilité de sortie du système.

Les articulations passives ont des freins au lieu des actionneurs, quand les freins sont desserrés, les articulations passives sont indirectement contrôlées par le mouvement des articulations actives en utilisant les caractéristiques de couplage dynamique du manipulateur. Si les freins sont engagés, les articulations passives sont fixes et les articulations actives sont contrôlées. La position du manipulateur est contrôlée par la combinaison de ces deux modes.

- Modélisation dynamique d'un robot parallèle. Application à un simulateur chirurgical [N.Leroy, A.M.Kokosy et W. Perruquetti][6]:

Les auteurs proposent une méthode de calcul simplifier pour calculer les équations dynamiques qui sont obtenues en utilisant la formulation de Lagrange-Euler appliquée au robot parallèle. Les robots chirurgicaux sont économiques, ils ont besoin d'être contrôlé par ne bonne précision toute en ayant un rapport de vitesse élevé donnant une bonne performance. Les robots parallèles sont une excellente solution pour avoir un système rigide mais ces modèles sont un peu compliqués et demande beaucoup de calcul.

- Dynamique et contrôle de mouvement d'un robot manipulateur à deux bras avec articulation passive [Kee Ho Yu, Takahashi et Hikaru Inooka][7] :

Les auteurs utilisent la formulation de Lagrange-Euler pour l'obtention des équations de mouvement du robot manipulateur. Ils établissent un algorithme de contrôle simple, théoriquement basé sur les caractéristiques dynamiques du robot analysé.

- La modélisation dynamique d'un robot manipulateur multi-bras [Wen Chen][8] :

Dans cet article, l'auteur a établit le modèle dynamique généralisé pour un manipulateur à n bras flexibles en tenant en compte de la rigidité des bras. La méthode des modes propres est

adoptée pour le calcul de déformation élastique de chaque bras. La formulation de Lagrange-Euler est établie pour la détermination des équations de mouvements.

- L'atténuation dynamique (amortissement dynamique) des bras manipulateurs est aussi dans la littérature, tel que des algorithmes pour le calcul de couple sont employés pour compenser la dynamique changeante des bras manipulateurs afin d'assurer qu'un niveau d'atténuation est maintenue pour toutes les configurations.

En raison des rapports élevés de vitesse de la plupart des manipulateurs industriels, ils sont commandés efficacement par des contrôleurs proportionnel-dérivative (PD).Pour s'assurer qu'un robot manipulateur ne dépasse jamais sa cible (avec des conséquences propablement catastrophiques), amorti par des contrôleurs PD doit être placé suffisamment pour des configurations de manipulateur avec de grands inerties.

- La commande de trajectoire des manipulateurs rigides par réseau de neurones est aussi trouvés dans la littérature :

La commande d'état d'un système pour suivre une trajectoire désirée est un problème important, dans la plupart des stratégies de commande proposées pour ce problème, une commande dépendante fortement du modèle feedforward est en général nécessaire. Avec la propriété bien connue d'un réseau de neurones pour rapprocher ce feedforward, la plupart des recherches peuvent être classifiées dans les catégories suivantes :

-Etude directe de la dynamique inverse : La dynamique inverse du système non linéaire est étudié par un réseau de neurones avec entraînement supervisée (neural network through supervised training).Après que l'entraînement soit fini,le réseau qualifié est utilisé comme contrôleur pour conduire le système à suivre la trajectoire désirée.

-Etude basée sur l'erreur de poursuite en sortie : cette approche essaye de mettre à jour les poids du contrôleurs neural en réduisant au minimum une fonction objective qui mesure l'erreur de poursuite. Le maître d'entraînement de réseau de neurones pour la dynamique inverse est le control des commandes désirées. Cependant, ces commandes désirées ne sont pas disponibles. Certaines des approches impliquent l'excitation du manipulateur en employant l'entrée aléatoire et puis la sortie correspondante.

- La dynamique d'impact et le contrôle des forces de contact entre le manipulateur et l'environnement :

Beaucoup d'applications avancées des bras manipulateurs telles que faire des tâches de service aussi bien l'automatisation industrielle, beaucoup de tâches de manipulation exigent souvent une série d'opérations de contact. Un mouvement de contact est typiquement obtenu par transition de phase d'un mouvement sans contrainte à un mouvement contraint. Dans la plupart des applications pratiques l'environnement étant entré en contact rigide. La capacité de commander la force de contact le long des directions arbitraires est essentielle d'accomplir de telles tâches de mouvement contraint, particulièrement quand la forme des objets étant entrée en contact. En outre, le contrôle de grandeur exacte de la force d'interaction est important pour l'exécution réussie de ces tâches. Beaucoup de stratégies pour le contrôle de mouvement :

-Le contrôle d'impédance : Il fournit un contrôle stable pour une structure ou le contrôle de mouvement est contraint,mais la sortie de la force ne peut pas être réglée à moins que le modèle exact de l'environnement ait été connu et intégré dans le plan de mouvement.

-Le contrôle hybride de force/position : Cette méthode découple structurellement les contrôleurs de forces et de position selon les contraintes géométriques à satisfaire pendant l'exécution de tâche. Cependant, cette stratégie de commande exige la connaissance détaillée de la géométrie de l'environnement.

- Le contrôleur neuronale –flou (fuzzy-neural) pour la commande de force de contacte du robot manipulateur à un environnement inconnu : Un contrôleur pour un robot manipulateur,qui approche entre un contact et application de force avec l'environnement,est conçu en utilisant la logique flou. L'erreur entre la force désirée et la force mesurée ainsi que la vitesse du manipulateur sont employées comme signaux d'entrée du contrôleur comme nouvelle méthode. La vitesse d'approche à l'environnement doit être commandée pour être lente en réduisant la force initiale appliquée. Les résultats de simulation prouvent que la force de contact est commandée efficacement par le contrôleur proposé même avec la force d'impact dans la mesure ou la vitesse d'approche du manipulateur est lente figure 1.15.

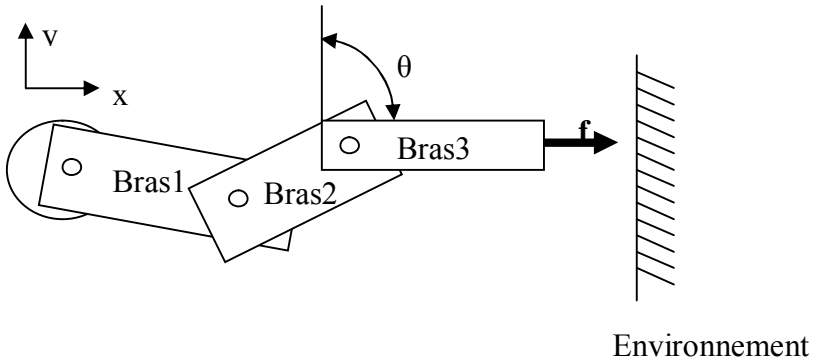

Figure 1.15-Les trois degrés de libertés d'un robot manipulateur plane.

- Le problème de la dynamique d'impact de l'espace des systèmes robotiques :Qui se compose d'un manipulateur rigide soutenu par une structure flexible,en raison de l'accouplement dynamique entre le manipulateur et sa structure porteuse,le mouvement inconnu du système se produit après qu'il fasse le contact impulsif avec l'environnement. On emploie le modèle dynamique du système pour estimer le mouvement du système après l'impact. Cette méthode qui peut être employée pour trouver des moyens pour réduire au minimum l'effet de l'impact et les vibrations de la structure porteuse due à l'impact.

Les résultats expérimentaux prouvent que la force d'impact et le mouvement de système après l'impact puisse être réduit si la configuration du manipulateur avant l'impact et les gains de contrôleurs sont correctement choisis.

1.7.2. Analyse de rigidité :

Connaître la rigidité d'un robot manipulateur est de l'importance primordiale pour conduire avec succès le contact et les tâches de non contact. En fait, la rigidité des robots manipulateurs représente généralement la précision exigée pour satisfaire les commandes de position et de force. De plus, il y a accouplement entre ces mouvements de translation et de rotation, cet accouplement se montre également dans la matrice de rigidité non diagonal vue au point final du robot manipulateur. En conséquence, la structure d'outil de manipulateur (the manipulator tool frame) tourne quand une force au point final est appliquée le long d'un des degrés de liberté. Si la rigidité vue au point final de manipulateur est modelée et identifiée exactement, il serait possible de compenser l'accouplement et les erreurs de positions provoquées par les forces externes.

Les valeurs de rigidité minimum ou maximum, qui sont les valeurs propres maximum et minimum de la matrice de rigidité et leurs directions, qui sont les vecteurs propres correspondants,peuvent être connues à l'avance. Par conséquent, les configurations les plus appropriées pour certaines tâches peuvent être choisies. La formulation conventionnelle de rigidité est valide seulement quand le manipulateur est dans une configuration quasi statique sans chargement, ou quand il a une matrice jacobiènne constante dans toute la zone de travail.

-D' autres ont également présenté une méthodologie pour modeler la rigidité de terminal due aux flexibilités du bras manipulateurs avec des liens reliés en série.

Ils ont démontré que la méthodologie pourrait être appliquée à toutes les topologies des manipulateurs séries possibles pour décrire la rigidité de terminal et le choix de configuration de manipulateur la plus appropriée compatible avec les conditions de conformité de la tâche actuelle.

- La modélisation de la rigidité augmentée et analyse des bras manipulateurs, et une méthode pour leur identification et caractérisation de la rigidité :

En supposant que les liaisons des manipulateurs sont infinement rigides, le modèle augmenté de rigidité contient la rigidité passive et active des joints avec la rigidité active crée par le changement de la configuration de manipulateur, et par le vecteur externe de force agissant sur le point final de manipulateur.

La comptabilité de formulation de rigidité pas pour le dernier n'est connue entant que formulation conventionnelle de rigidité,qui n'est évidement pas complète et elle est valide seulement quand le manipulateur est dans une configuration quasi statique déchargée ou la matrice jacobiènne du manipulateur est constante dans toute la zone de travail.

- La matière des manipulateurs cinématiquement redondant a été intensivement discutée dans la communauté de recherche en matière de robotique.

1.8. Robots manipulateurs flexibles :

1.8.1. Identification, modélisation des robots manipulateurs flexibles :

Pendant les décennies passées, les robots industriels sont devenus un facteur très important dans l'industrie.

Des robots sont appliqués à de nouveaux secteurs chaque jour. Pour pouvoir entrer dans les marchés les robots exigent souvent une meilleure exécution et d'un prix inférieur. Afin de satisfaire ces demandes, des structures physiques de robot sont construites plus légers pour des nouvelles applications technologiques industrielles.

La réduction de poids induit nécessairement la flexibilité du bras, ainsi la commande de la déformation élastique et de la vibration sont nécessaire.

Par conséquent, un nombre considérable d'études ont été consacrés aux manipulateurs flexibles. Certaines méthodes ont été appliquées à la modélisation des manipulateurs flexibles pour l'analyse de vibration des systèmes flexibles.

1.8.2. Contrôle de la dynamique des robots manipulateurs :

Les structures légères et de hautes-mobilitées dans les robots manipulateurs causent l'élasticité aux liaisons et aux articulations. Pour commander le point final (terminal du bras) de tels genres de manipulateurs, la déformation doit être compensée. La plupart des manipulateurs courants ont un effecteur terminal ou une pince au bout. Cependant, dans la

commande de point final des manipulateurs flexibles, le problème de la stabilité surgit. Pour contrôler le point final rapidement et avec précision, la dynamique du manipulateur devrait être prise en compte.

- Hassan Zohoor et Sayyid Mahdi Khorsandijou [9] ont étudié le modèle dynamique d'un manipulateur volant avec haute flexibilité des bras : lorsqu'on veut concevoir un manipulateur volant avec un poids léger, charge utile grande, faible consommation d'énergie, plus de degrés de maneuvrabilité, actionneurs de taille réduit et un espace de travail grand, la flexibilité des bras ne peut pas être ignoré. En retournant à ces avantages citées ci-dessus, la modélisation dynamique du manipulateur volant devient très compliquée.

- Mehrdad Farid et Stanislaw A. Lukasiewicz [10] ont étudié la modélisation dynamique des manipulateurs spatial avec flexibilité des bras et des articulations : En se basant sur l'efficacité de la méthode des éléments finis et la formulation de Lagrange –Euler pour l'obtention des équations de mouvement ou ils ont montré l'interaction entre de nombreuses flexibilités et leurs rôle important dans le comportement dynamique du système.

- Amer S. Al-Yahmadi, jamil Abdo et T.C.Hsia [11]ont étudié la modélisation et le contrôle de deux robots manipulateurs portant un objet flexible : Cette étude expose le problème de manipulation du modèle mathématique qui décrit le système, ainsi les lois de contrôle pour manier une poutre flexible suivant une trajectoire en supprimant toute vibration qui excite le système durant son mouvement.

- M.Vakil, R.Fotouhi et P.N.Nikiforuk [12]ont étudié le contrôle des manœuvres des robots manipulateurs flexibles multi-bras : L'énorme consommation de l'énergie et le poids élevé des bras manipulateurs réduisent leurs mobilités et leurs efficacités. Pour remédier à ce problème on utilise de léger bras qui diminue leurs masses et augmente leurs mobilités. Cependant, ces bras légers vibrent et se plient pendant, ou après ou à la fin du manœuvre, pour cela on a conçu un nouveau contrôleur.

- G.Piras, W.L.Cleghorn et J.K.Mills [13]ont étudié l'analyse dynamique en utilisant la méthode des éléments finis pour un robot manipulateur avec des bras flexibles, planaire avec une vitesse élevée et une grande précision : l'étude montre, pour avoir un mouvement rapide, la configuration du mécanisme a une influence ségnifiante sur la nature des résultats concernant la vibration.

- B.Subudhi et A.S.Morris [14]ont étudié la modélisation dynamique, la simulation et le contrôle pour robot manipulateur avec des bras et articulations flexibles : Ils utilisent la formulation de Lagrange-Euler et la méthode des modes propres pour leur étude.

- Z.Mohamed, J.M.Martins, M.O.Tokhi, J.Sa da Costa et M.A.Botto [15]ont étudié le contrôle de vibration d'un robot manipulateur possédant une grande flexibilité : Cette étude présente les recherches expérimentales pour le développement des schémas de contrôle (feedback et feedforward) pour le contrôle de vibration.

- H.Karagulle et L.Malgaca [16]ont étudié l'analyse de vibration pour le point terminal pour un robot manipulateur à deux bras en utilisant CAD/CAE : L'analyse de vibration est fait

par un logiciel (I-DEAS), en supposant que la trajectoire est circulaire dans leur exemple et en prenant plusieurs valeurs d'accélération, on détermine la trajectoire de la structure ainsi le point terminal.

1.9. Conclusion :

Nous avons donné dans ce chapitre quelques définitions de termes concernant la robotique, les types de tâches, différents types d'architectures, les actionneurs et le principe de fonctionnement, ainsi les caractéristiques d'un robot manipulateur.

La nécessité d'étudier les matrices de transformations homogènes et leur application dans l'étude des différents modèles géométriques (directs, inverses), et les modèles cinématiques (directs, inverses).

Une analyse de publications concernant les axes principaux de recherches liées aux robots manipulateurs rigides et robots manipulateurs flexibles.

Nous aborderons dans le chapitre suivant, la formulation dynamique du système à deux barres.