



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Laboratoire d'étude et de recherche en technologie industrielle

Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du Diplôme de Master 2 en
Construction Mécanique.

CINEMATIQUE INVERSE D'UN ROBOT 3R ET
VERIFICATION PAR LOGICIELS MATLAB ET
SOLIDWORKS.

Proposé et encadré par :
Pr.ALLALI Abderrazak.
M.C.A.Otmmani Boubacar.

Réalisé par :
Mr. Benali Abdelkrim.
Mlle.Atta Fairouz.

Année Universitaire 2018/2019.

DEDICACES

À nos très chers parents.

À nos frères et nos sœurs.

À toute la famille.

À tous nos amis.

À tous les Enseignants de Département de Génie Mécanique.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Le bon Dieu le tout puissant et le miséricordieux qui nous a offert le courage pour aboutir ce travail.

Au terme de ce travail, nous adressons nos remerciements à tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce projet. Nous tenons à remercier notre promoteur Pr. ALLALI .A. de nous avoir suggérer, conseiller et diriger pour mener à bout ce travail et à nos parents pour leurs sacrifices et leurs soutiens.

Nos vifs remerciements vont également aux Messieurs, Le Président de Jury et les membres du jury et enfin un grand remerciement à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation durant notre Cycle Universitaire.

Sans oublier nos amis (es) soient assurés de notre profonde gratitude.

Benali Abdelkrim.

Atta Fairouz.

RÉSUMÉ

Notre travail a consisté à faire l'étude cinématique inverse d'un robot 3R et vérification par logiciels MATLAB et SOLIDWORKS.

Nous avons commencé par l'état de l'art sur les robots et leurs domaines d'application

Après nous avons cité Les différents modèles cinématiques utilisés en robotique ont été présentés dans ce chapitre, tels que : le modèle géométrique direct et inverse, le modèles cinématique direct. Ainsi que la modélisation en utilisant le système de paramétrage de Denavit Hartenberg.

Ensuite l'étude de la cinématique inverse et les différentes méthodes utilisées en citant la méthode géométrique, algébrique et numérique.

Enfin un Application sur un bras manipulateur à 3ddl : Modélisation et simulation en utilisant deux méthodes afin de calculer la cinématique inverse.

ملخص

تألف عملنا في إجراء الدراسة الحركية العكسية للروبوت R3 والتحقق من برنامج MATLAB و SOLIDWORKS. لقد بدأنا بأحدث التقنيات عن الروبوتات ومجالات تطبيقها بعد أن نقلنا ، تم عرض النماذج الحركية المختلفة المستخدمة في الروبوتات في هذا الفصل ، مثل: النموذج الهندسي المباشر والعكس ، والنماذج الحركية المباشرة. وكذلك النمذجة باستخدام نظام المعلمات Denavit Hartenberg. ثم دراسة الحركية العكسية والأساليب المختلفة المستخدمة من خلال الاستشهاد بالطريقة الهندسية والجبرية والعديد. أخيراً ، تطبيق على ذراع مناوور ثلاثي الأبعاد : النمذجة والمحاكاة باستخدام طريقتين لحساب حركات معكوس.

ABSTRACT

Our job was to do the opposite kinematic study of a 3R robot and verification MATLAB and SOLIDWORKS.

We have started the state of the art robots and their application areas

After we cited The different kinematic models used in robotics have been presented in this chapter, such as: forward kinematics and reverse, the direct kinematic models. And modeling using Denavit Hartenberg parameterization system.

Then consideration of the inverse kinematics and the various methods used with usual geometrical method, algebraic and numeric.

Finally a Application of a manipulator arm 3ddl: Modeling and simulation using two methods to calculate the inverse kinematics.

TABLE DES MATIERES

DEDICACES.....	
REMERCIEMENTS	
RÉSUMÉ.....	
Tableau de matière	
Listes des figures et des tableaux	
INTRODUCTION GENERALE.....	01
1. GENERALITES SUR LES ROBOTS.....	03
1.1. Introduction	03
1.2. Histoire de la robotique	03
1.3. Définition d'un robot	04
1.4. Composition d'un robot.....	05
1- 5: Espace articulaire.....	08
1- 6: Espace opérationnel.....	08
1- 7: Redondance.....	09
1-8 : Configurations singulières.....	09
1-9 : Choix de nombre de degrés de liberté d'un robot.....	09
1-10 : Morphologies des robots manipulateurs.....	09
1-11: Caractéristiques d'un robot manipulateur.....	12
1- 12 : Boucle de décision.....	13
1- 13: Types de robots.....	13
1- 14 : Classification des robots.....	15
1- 16 : CONCLUSION.....	17
CHAPITRE 02 : CINEMATIQUE DES ROBOTS.....	18
2- 1 : Introduction.....	18
2- 2 : Modélisation des robots.....	18
2- 3 : Modèle géométrique.....	18
2 - 4 : Modèle cinématique.....	23
2- 5: Conclusion.....	26

CHAPITRE 3: PROBLEME CINEMATIQUE INVERSE.....	27
3- 1: Introduction.....	27
3- 2 : Problème général de la cinématique inverse.....	27
3- 3 : Solution analytique.....	28
3- 4 : Solution géométrique (approche intuitive).....	28
3- 5 : Chaîne cinématique	29
3-6 : Application.....	36
3-7: CONCEPTION DE NOTRE ROBOT.....	37
3- 8 : Modélisation de bras manipulateurs du type RRR.....	43
3-9: Conclusion.....	49
4- 1: Introduction.....	50
4- 2: Génération en variables articulaires.....	50
4- 3: Trajectoire cubique.....	51
4- 4 : Méthodes de planification de mouvement	54
4- 5 : Application	55
4- 6: CONCLUSION	68
CONCLUSION Générale	70

Listes des figures et des tableaux.

Figure 1-1 : Composition d'un robot.

Figure 1-2: Articulation rotoïde.

Figure 1-3: Articulation prismatique.

Figure 1-4: Structure d'un manipulateur à poigné rotule.

Figure 1-5: Architectures des porteurs.

Figure 1-6: Architecture des poignets.

Figure 1-7: Représentation des liaisons mécaniques entre deux corps (D'après N.F. EO4-O15).

Figure 1-8: Schéma représente un système bouclé d'articulation.

Figure 1-9: Robot industriel, l'outil qui réinvente l'usine.

Figure 1-10 : Da Vinci, l'incroyable robot chirurgical.

Figure 1-11 : Robots et fantassins(La Russie se projette dans le futur).

Figure 1-12: Bras de robot industriel.

Figure 1-13: Rethink (robot manipulateur).

Figure 1-14: Robot tondeuse.

Figure 1-15: Robot humanoïde HRP2.

Figure 1-16: Robots industriel utilisés dans le monde (source I F R).

Figure 1-17: Diagramme des robots industriel utilisés dans le monde.

Figure 1-18: Robots industriel neufs livrés chaque années dans le monde(source I F R).

Figure 1-19: Diagramme des robots industriel neufs livrés chaque années dans le monde.

Figure 2- 1: Relation entre l'espace articulaire et l'espace des coordonnées cartésiennes de l'effecteur.

Figure 2-2 : Définition des paramètres suivant Denavit-Hartenberg.

Figure 2-3 : Transformation du repère de l'outil par rapport au repère de l'atelier.

Figure 2-4 : Exemple de configurations multiples conduisant à la même position de l'organe d'extrémité (PUMA 560).

Figure 3- 1: Solution cinématique inverse donne les coordonnées articulaires (coordonnées moteurs, à gauche), en fonction des coordonnées spatiales (à droite).

Figure 3- 2: Architecture de la chaîne cinématique du manipulateur à structure RR.

Figure 3- 3: Configuration "Elbow up" et "Elbow down".

Figure 3- 4 Coordonnées de vitesse opérationnelle.

Figure 3- 5: Suivi de trajectoire traversant des points singuliers : (a) Changement brutal de configuration à proximité d'un point singulier. (b) Distribution des vitesses d'articulations.

Figure 3- 6: Structure cinématique du premier robot (RR).

Figure 3- 7: Structure cinématique du robot RR.

Figure 3- 8 : Format d'un SOLIDWORKS 2016.

Figure 3- 9: Mise en plan.

Figure 3-10: Vue d'ensemble du robot.

Figure 3- 11 : Architecture de la chaîne cinématique du manipulateur à structure RRR.

Figure 4- 1 : Génération de trajectoire.

Figure 4- 2 : Trajectoire cubique. Variable articulaire, vitesse, accélération.

Figure 4- 3 : Interpolation par Spline cubique.

Figure 4- 4 : Interpolation linéaire avec transition parabolique

Figure 4- 5 : Point de passage obligé.

Figure 4- 6 : Trajectoire rectiligne générée dans l'espace des coordonnées

Figure 4- 7 : Déplacement suivant X et Y.

Figure 4- 8 : Variation des angles θ_1 et θ_2

Figure 4- 9 : (a) Position initiale. (b) Position finale

Figure 4- 10: (a) Vérification à $t= 0(s)$. (b) Vérification à $t= 10 (s)$.

Figure 4- 11: Déplacement suivant X et Y.

Figure 4. 12: Variation des angles θ_1 et θ_2 .

Figure 4- 13: (a) Position initiale (b) Position finale.

Figure 4- 14: Vérification de la configuration 2 à $t=0(s)$ et à $t=10(s)$.

Figure 4- 14: Comparaison des angles θ_1 et θ_2 .

Figure 4- 15: Vitesse selon x et selon y.

Figure 4- 16: Accélération selon x et selon y.

Figure 4- 17 : Vitesses articulaires (a) Elbow down (b) Elbow up.

Figure 4- 18 : Variation du vecteur positions pour $0s \leq t \leq 2 s$ fait par Matlab:

Figure 4- 19 : Variation des vecteurs accélérations linéaires pour $0 \leq t \leq 2$ fait par Matlab

Figure 4- 19 : Variation du vecteur vitesse fait par Matlab.

Tableau 3- 1: Paramètres géométriques de robot (R.R).

Tableau 3- 2: Paramètres géométriques du robot.

Tableau 4- 1 : Variable articulaires et opérationnelles, du deuxième robot (le cas d'insertion de l'aiguille)

CONCLUSION GENERALE:

Dans les dernières décennies, la technologie de robot a été impliquée dans les applications industrielles telles que les opérations de manutention, de préhension, l'assemblage, le soudage, la distribution dans les applications de l'automobile et de l'aérospatiale, etc. La technologie robotique a également été utilisée dans des applications biologiques et de l'industrie médicale. Les robots remplissent un rôle de plus en plus important pour améliorer la sécurité des patients dans le rythme effréné des cliniques et des hôpitaux où l'attention aux détails et la fiabilité sont essentielles. Ces dernières années, les robots se rapprochent des soins aux patients, par rapport à leur précédent rôle de la fourniture de services dans l'infrastructure de la médecine.

La modélisation d'un robot implique l'étude de son comportement cinématique. Un modèle cinématique est préoccupée par le mouvement du robot sans tenir compte des forces qui produisent les mouvements. La cinématique d'un bras robotisé porte sur l'étude des propriétés géométriques sur la base et l'heure du mouvement. Il fournit une description analytique des mouvements spatiaux d'un robot.

Par conséquent, l'étude de la cinématique des manipulateurs se réfère à toutes les propriétés géométriques et temporelles de la motion. Du fait que les liens et les bras d'un robot sont modélisés comme des corps rigides, les propriétés de déplacement du corps rigide de prendre une place centrale dans la robotique.

Le problème ci-dessus peut être défini de deux manières fondamentales, à savoir vers l'avant ou cinématique directe et le second problème est la cinématique inverse. Étant donné que les variables indépendantes dans un bras robotique sont les variables communes et une tâche est généralement en termes de référence de coordonnées cadre. La cinématique d'un robot vers l'avant se réfère au calcul de la position et de l'orientation de son cadre effecteur d'extrémité à partir de ses valeurs communes. Denavit et Hartenberg (DH) introduit la représentation

matricielle d'une liaison dans le but de décrire la géométrie spatiale d'un robot manipulateur. L'avantage de la représentation de DH est qu'il nécessite le nombre minimum de paramètres pour décrire la cinématique du robot.

Comme résultats d'études dans ce volet de recherche nous avons conclu:

-Modélisation d'un manipulateur de robot plane 2-R est mise en œuvre, un géométrie directe et inverse du robot a été mis au point.

-Solution du problème inverse ne donne pas toujours une solution; la même pose effectrice finale peut être atteinte dans de nombreuses configurations différentes.

-Solutions mathématiques pour problème cinématique inverse ne correspondent pas toujours à des solutions physiques. En d'autres termes, il existe des restrictions de lien physique pour tout manipulateur réel. Par conséquent, chaque ensemble de Valeurs d'angle de lien doit être vérifié afin de déterminer ils sont identiques aux limites de liaison physique.

-Vérification des résultats obtenus par les deux logiciels, CATIA V5 et Matlab / boîte à outils, nous a permis de trouver les solutions de bobine du modèle étudié. En conclusion cela pourrait facilement être généralisé à 2-R robot et donc à un robot (Sacra, Puma, etc.), ou même un mécanisme complexe en utilisant le logiciel CATIA. Les valeurs de secousse sont améliorées avec sept-polynomiale degré. La longueur du joint peut être commandée de façon à diminuer les valeurs du joint de torsion. Dans un robot médical, ce qui permet une réduction des vibrations.

CHAPITRE 1: GENERALITES SUR LES ROBOTS

1- 1: Introduction:

Dans ce chapitre on propose les définitions et les notions nécessaires à l'étude des robots manipulateurs. Pour cela, nous introduisons la notion de robot industriel ; et classification des robots.

1- 2: Histoire de la robotique:[2]

Sans remonter aux premiers concepts de machine remplaçant l'homme dès le XVIIe siècle, la robotique est née, dans les années 1950, du croisement des besoins et des disponibilités de nouvelles technologies développées durant la seconde guerre mondiale : l'électronique, l'automatique, l'informatique... Les deux premières orientations de ces machines étaient de répondre aux besoins de l'industrie manufacturière et aux besoins de l'industrie en milieu hostile à l'homme.

La robotique industrielle a répondu dans un premier temps au besoin de manipuler de manière répétitive et automatique des objets entre les machines de fabrication proprement dite. Ce robot devait donc avoir au minimum un organe de saisie des pièces pouvant suivre des trajectoires programmables. Le robot industriel est maintenant un produit majeur et répandu à plus d'un million d'exemplaires, utilisé dans de nombreuses étapes de fabrication (manipulation, peinture, soudure) ;

il est complété maintenant dans le domaine manufacturier par des robots mobiles de transport ou d'assistance (AGV, *picking*, assistance au montage) qui ont beaucoup de points communs avec les robots de service. La robotique est par ailleurs considérée comme un élément clé de la compétitivité des entreprises industrielles, au point de susciter des soutiens publics massifs, en Europe comme aux États-Unis¹.

La robotique en milieu hostile répond aux besoins de manipulation d'objets à distance du fait de leur dangerosité (chimie, explosif), de la nocivité du milieu pour l'homme (nucléaire) ou de la difficulté à s'y rendre (espace). Les premières réalisations ont été justifiées et financées par l'industrie nucléaire dans les années 1950. Ces robots sont des systèmes électromécaniques, télé opérés. Les développements de l'électronique et de l'informatique ont permis d'introduire dans

ces équipements l'assistance à l'opérateur sous diverses modalités (retour d'effort, mouvement automatique sur commande de haut niveau) afin d'améliorer la précision, la vitesse d'exécution et d'enrichir les domaines d'application (déminage, lutte contre le

terrorisme, intervention post accident). Depuis une vingtaine d'années, des moyens importants en R & D ont été mis en place pour étendre les applications robotiques sur les théâtres d'opérations militaires.

Après la robotique industrielle et la robotique d'intervention, une troisième orientation est apparue avec les progrès en miniaturisation, microélectronique et micromécanique et les nouvelles capacités des systèmes de traitement de l'information et de communication qui ont créé les conditions technologiques favorables au développement de robots mobiles autonomes ou semi-autonomes pour réaliser des applications de service professionnel et de service personnel à des coûts et tailles raisonnables à moyen terme.

Les progrès en sciences cognitives et ceux réalisés dans la compréhension du vivant ouvrent également la porte à de nouvelles avancées sur les capacités d'apprentissage et d'intelligence d'entités artificielles, matérielles et à leur introduction dans des environnements en forte interaction avec l'homme.

Ces applications de la robotique de service sont très larges car elles peuvent couvrir des domaines très variés du monde professionnel (agriculture, médical, nettoyage...) et du monde grand public (jeux, éducation, tâches domestiques...).

1- 3 : Définition d'un robot:[3]

1.3.1 : Origine du nom Robot:

Mot d'origine tchèque (robota), signifiant travail forcé, corvée.

1.3.2 : Définition suivant « Petit Larousse »:

Appareil automatique capable de manipuler des objets ou d'exécuter des opérations selon un programme fixe ou modifiable.

1.3.3 : Définition suivant « dictionnaire Webster's »:

Un appareil automatique qui peut effectuer des fonctions normalement effectués par des humains.

1.3.4 : Définition suivant « A.F.N.O.R »:

L'Association Française de Normalisation (A.F.N.O.R.) définit un robot comme étant un système mécanique de type manipulateur commandé en position, reprogrammable, polyvalent (i.e., à usages multiples), à plusieurs degrés de liberté, capable de manipuler des matériaux,

des pièces, des outils et des dispositifs spécialisés, au cours de mouvements variables et programmés pour l'exécution d'une variété de tâches. Il a souvent l'apparence d'un, ou plusieurs, bras se terminant par un poignet. Son unité de commande utilise, notamment, un dispositif de mémoire et éventuellement de perception et d'adaptation à l'environnement et aux circonstances. Ces machines polyvalentes sont généralement étudiées pour effectuer la même fonction de façon cyclique et peuvent être adaptées à d'autres fonctions sans modification permanente du matériel.

1- 4: Composition d'un robot:[3]

Un robot est constitué des éléments suivants:

- Organe terminal
- Axe = Articulation
- Corps = Segment
- Effecteur = outil
- Actionneur = Moteur
- Base

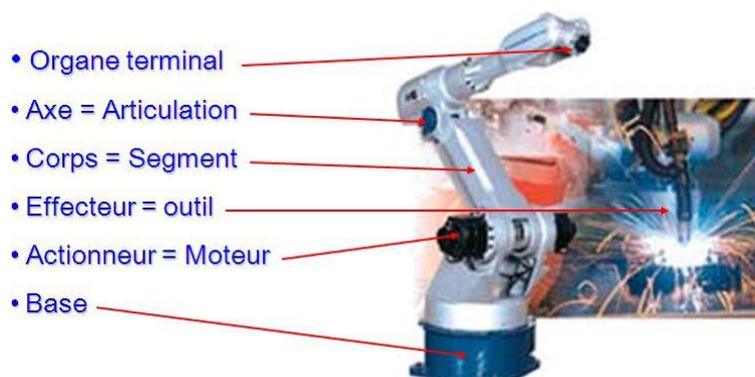


Figure 1-1 : Composition d'un robot.

On distingue classiquement 5 parties principales dans un robot :

- Système mécanique articulé (S.M.A.) + un organe terminal (voire plusieurs)
- Organe terminal
- Actionneurs
- Capteurs
- Système de commande

1- 4- 1: Système mécanique articulé (S.M.A):

Le système mécanique articulé (S.M.A.) est un mécanisme ayant une structure plus ou moins proche de celle du bras humain dans le cas des robots manipulateurs. Il permet de remplacer, ou de prolonger, son action. Son rôle est d'amener l'organe terminal dans une situation (position et orientation) donnée, selon des caractéristiques de vitesse et d'accélération données. 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.

a. Articulation:

Une articulation lie deux corps successifs en limitant le nombre de degré de liberté de l'un par rapport à l'autre. Soit m le nombre de degré de liberté résultant, encore appelé mobilité de l'articulation. La mobilité d'une articulation est telle que :

$$0 \leq m \leq 6$$

Lorsque $m = 1$; ce qui est fréquemment le cas en robotique, l'articulation est dite simple : soit rotoïde, soit prismatique.

***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 (voir la figure suivante).

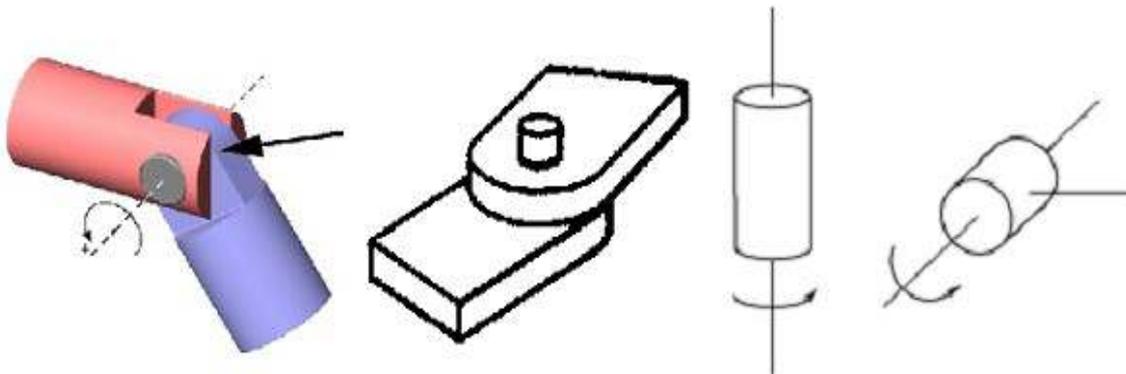


Figure 1-2: Articulation rotoïde.

***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 (voir la figure suivante).

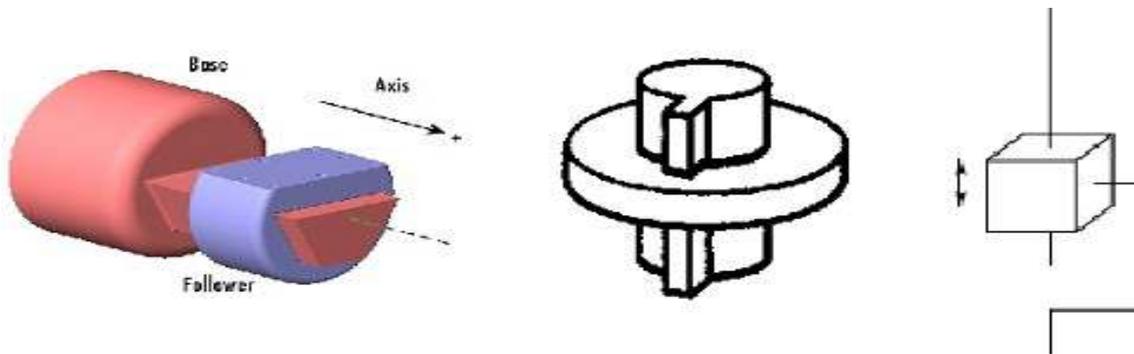


Figure 1-3: Articulation prismatique.

1- 4- 2: Organe terminal:

Désigne tout dispositif destiné soit à manipuler des objets comme les dispositifs de serrage (pinces à deux ou trois doigts), les dispositifs magnétiques ou à dépression (ventouse), soit à transformer (outils de découpe, torche de peinture, torche de soudage). Il s'agit d'une interface permettant au robot d'interagir avec son environnement.

1- 4- 3: Actionneurs:

Pour être animé, le S.M.A comporte des moteurs le plus souvent associés à des transmissions (courroies crantées), l'ensemble constitue les actionneurs. 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 mouvement contrôlés uniquement par des capteurs de fin de course désirée (asservissement en position difficile dû à la compressibilité de l'air).

1- 4- 4: 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).

1- 4- 5: Système de commande:

la partie commande synthétise les consignes des asservissement pilotant les actionneur, partir de la fonction de perception et des ordres de l'utilisateur.

1- 5: Espace articulaire :[4]

L'espace articulaire d'un robot est celui dans lequel est représentée la situation de tous ces corps.

La solution la plus simple consiste à utiliser les variables ou coordonnées articulaires.

L'espace de ces variables est appelé aussi *espace des configurations*. Sa dimension N est égale au nombre de variables articulaires indépendantes et correspond au nombre de degrés de liberté de la structure mécanique.

Dans une structure ouverte (simple ou arborescente), les variables articulaires sont généralement indépendantes, tandis qu'une structure fermée impose nécessairement des relations entre ces variables.

1- 6: Espace opérationnel :

L'espace opérationnel est celui dans lequel est représentée la situation de l'organe terminal (on considère donc autant d'espaces opérationnels qu'il y a d'organes terminaux).

Le nombre degrés de liberté maximal que peut avoir l'organe terminal égal au nombre de paramètres indépendants nécessaires pour décrire la situation de l'organe terminal dans l'espace.

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

1- 7: 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 (nombre d'articulations motorisées).

Cette propriété permet d'augmenter le volume de domaine accessible et de préserver les capacités de déplacement de l'organe terminal en présence d'obstacles.

1-8 : Configurations singulières :

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.

1-9 : Choix de nombre de degrés de liberté d'un robot :

Un robot non redondant doit disposer six degrés de liberté pour positionner et orienter un solide quelconque dans l'espace.

Toutefois, si ce solide présente une symétrie de révolution, cinq degrés de liberté suffisent puisqu'il n'est pas nécessaire de spécifier la rotation autour de l'axe de révolution. De même, pour situer un corps dans un plan, il ne faut que trois degrés de liberté : deux fixent les coordonnées d'un point du corps dans le plan, et le troisième détermine son orientation dans ce plan. A partir de ces constatations, on déduit que :

- Les caractéristique des solides manipulés par le robot, donc la classe de taches à réaliser, permettent de déterminer le nombre de degrés de liberté dont il doit disposer ;
- Une condition nécessaire mais non suffisante pour qu'il y ait compatibilité entre le robot et la tâche et que le nombre de degrés de liberté de l'organe terminal soit supérieur ou égale à celui de la tache ; le mécanisme peut alors placer l'organe terminal dans la situation désirée.

1-10 : Morphologies des robots manipulateurs :

La structure d'un robot industriel est divisée en deux sous-groupes figure 1-4 :

- Le porteur pour le positionnement.
- L'effecteur pour l'orientation

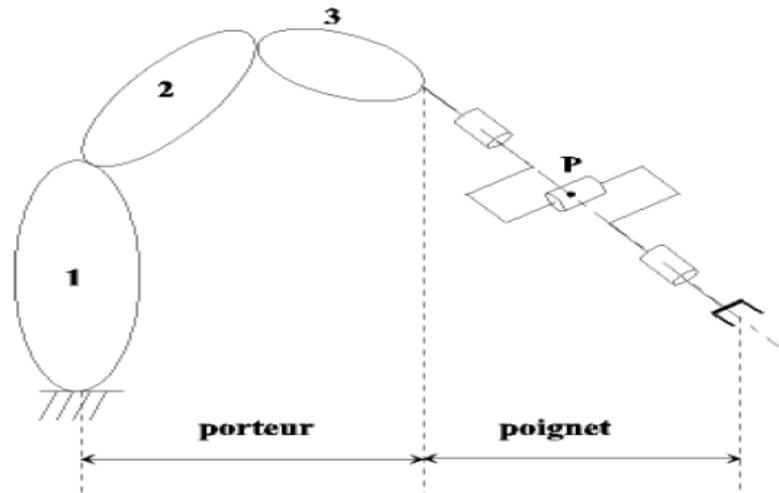


Figure 1- 4: Structure d'un manipulateur à poigné rotule.

1- 10- 1: Porteur :

On convient d'appeler les trois premiers degrés de liberté le *porteur du robot*. Les degrés de liberté résiduels forment le *poignet*, caractérisé par des dimensions beaucoup plus petites et une faible masse.

On dénombre 36 morphologies possibles de porteur. Parmi ces architectures, 12 seulement sont mathématiquement différentes et non redondantes

[Milenkovic 83].

Dans la pratique, on ne retrouve que les cinq structures suivantes :

- Les porteurs anthropomorphes (RRR), et plus précisément la première structure de cette classe dans la figure 1.7 comme par exemple les robots : STÄUBLI RX.
- Les porteurs sphériques (RRP) comme par exemple les robots : "STANFORD ARM" et PSA (BARNABE).
- Les porteurs toriques (RPR) et plus précisément la première structure de cette classe, comme par exemple les robots ACMA (H80), les robots de type SCARA (IBM, AXERA, ADEPT, ...);
- Les porteurs cylindriques (RPP) comme par exemple les robots : ACMA (TH8), AFAMA (ROV, ROH).
- Les porteurs cartésiens (PPP) comme par exemple les robots : ACMA (P80), IBM (7565), OLIVETTI (SIGMA). [1]

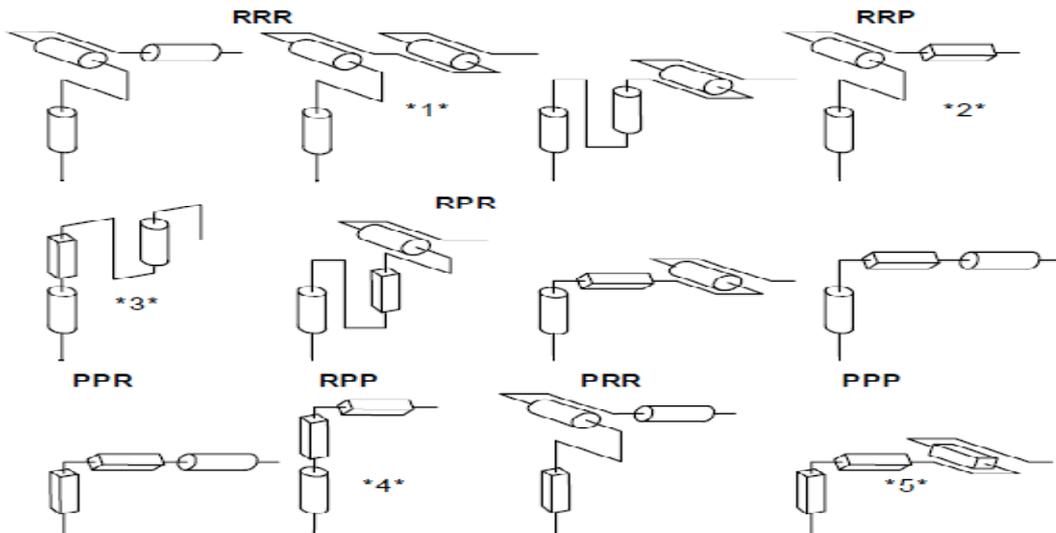


Figure 1- 5: Architectures des porteurs.

1- 10- 2: Poignet :[4].

Les poignets de robots sont à 1, 2 ou 3 axes, qui sont dans la quasi-totalité des cas des axes de rotation. Ils ne se distinguent pas par leur structure mais par la disposition relative des axes et par les positions des moteurs et des réducteurs dans les chaînes cinématiques. [2]

On distingue donc cinq configurations schématisées sur la figure 1.8

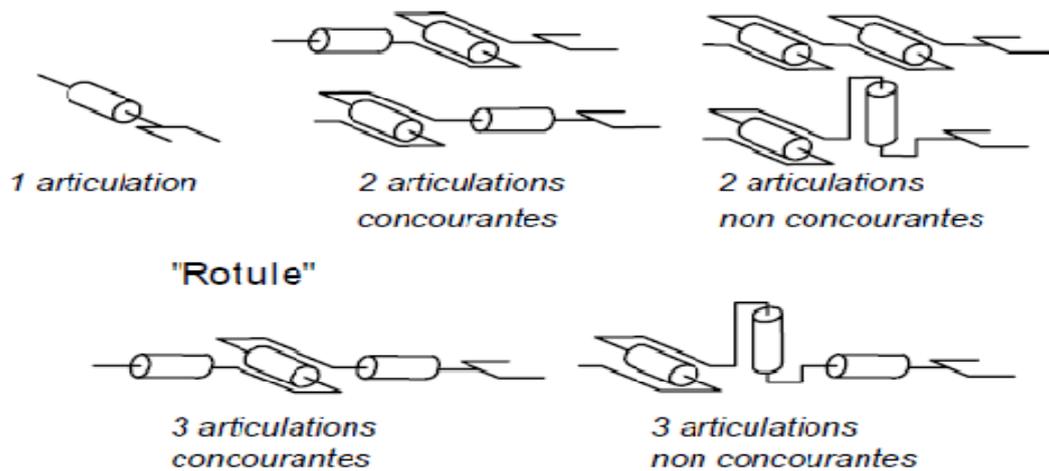


Figure 1- 6: Architecture des poignets.

Nom de Liaison	Mouvement relatifs	Nombre de Degré de liberté	Symbole
Encastrement	0: rotation 0: translation	0	
Pivot Articulation Cylindrique	1: rotation 0: translation	1	
Glissière Articulation Prismatique	0: rotation 1: translation	1	
Glissière Hélicoïdale	1: rotation 1: translation conjuguées	1	
Appui Plan	1: rotation 2: translation	3	
Rotule Articulation Rotoïde	0: rotation 3: translation	3	
Linéaire Rectiligne	2: rotation 2: translation	4	
Linéaire Annulaire	3: rotation 1: translation	4	
Ponctuelle	3: rotation 2: translation	5	
Libre	3: rotation 3: translation	6	Pas de symbole, pas de contact entre les deux corps

Figure 1- 7:Représentation des liaisons mécaniques entre deux corps (D'après N.F. EO4-O15).

1-11: Caractéristiques d'un robot manipulateur : [4]

La norme ISO 9946 spécifie les caractéristiques que les fabricants de robots doivent fournir. Parmi ces caractéristiques, on peut en mentionner quelques-unes qui permettent de choisir un robot en fonction de l'application envisagée.

- L'espace de travail.
- La charge utile.
- Les vitesses et accélérations.
- La résolution.

1- 12 : Boucle de décision:[5].

Un robot est capable d'extraire de l'information à partir de son environnement et d'utiliser ses connaissances pour décider comment agir. Un robot est équipé de capteurs et d'effecteurs.

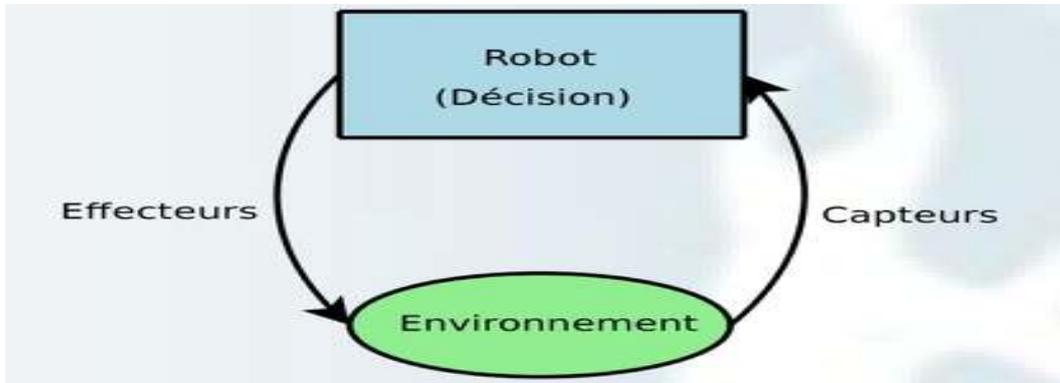


Figure 1- 8: Schéma représente un système bouclé d'articulation.

1- 13: Types de robots:

Dans la robotique ,les robots sont classés en différents types, en voici quelque uns:

1- 13- 1: Robot industriel :[6].

Un robot 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 ». Afin de différencier les robots que nous allons étudier des manipulateurs simples dont les mouvements sont déterminés par des butées rigides, nous parlerons de « robot industriel » dont la définition générale est donnée ci-dessous. « Un robot industriel est un manipulateur à plusieurs degrés de liberté contrôlé automatiquement, reprogrammable et multitâche qui peut être fixe ou mobile pour une application en automatisation industrielle » [17].



Figure 1- 9: Robot industriel, l'outil qui réinvente l'usine.

1- 13- 2: Robot médical : [7].

Dans la littérature, le terme «robot médical» a plusieurs sens selon les auteurs. Dans cet ouvrage, le robot médical désigne en premier lieu l'utilisation d'un «dispositif physique doué de possibilités de décision, de perception et d'action et connecté au monde numérique». Dans ce sens, le robot médical peut être un appareil de distribution de médicaments, une prothèse mécanisée, un dispositif d'aide au maintien de la posture ou encore une pompe cardiaque... Le robot porte-instrument est un type de robot médical d'après cette définition ; qu'il s'agisse d'une aiguille, d'une sonde ou d'un endoscope, l'idée de ce genre de robots est d'aider le praticien pour une opération en portant l'instrument à sa place.



Figure 1-10 : Da Vinci, l'incroyable robot chirurgical.

1- 13- 3: Robot militaire :[8].

En qui concerne l'armement, est appelé robot un système d'armes possédant des capacités de perception, de décision, d'action et de communication, parfois capable d'améliorer propres performances par apprentissage automatique ou supervisé par des hommes, pour:

- Agir dans un environnement ouvert ou confiné, dynamique et imparfaitement modélisé, voire très mal connu;
- Exécuter, de façon autonome ou en relation avec des humains, des tâches d'observation, d'exploration, de manipulation et /ou d'intervention sur l'environnement ou sur l'ennemi;
- Interagir le cas échéant avec autres machines (dont des robot) ou avec des être humains.



Figure 1- 11 : Robots et fantassins(La Russie se projette dans le futur).

1- 14 : Classification des robots:[5]

les deux grandes catégories de robots sont :

1- 14- 1 : Robots manipulateurs :

robots ancrés physiquement à leur place de travail et généralement mis en place pour réaliser une tâche précise ou répétitive.

- **Automates** : le robot exécute une même série d'actions indéfiniment. sans aucune perception de son environnement.

- **robots réactifs** : le robot exécute une action une action selon l'état actuel de l'environnement dans lequel il évolue (le mapping état/action étant fixé initialement).

- **robots cognitifs** : le robot analyse son environnement et calcule la meilleure action à effectuer.

- **robots industriels** : chaines de montage, test qualité, manipulation de produits chimiques,...

- robots pour l'assistance médicale.

- Robots mobiles : robots explorateurs

ils sont destinés à explorer des environnements ou l'homme ne peut pas se rendre :

- exploration d'autres planètes comme: Mars, Sojourner, Spirit

- exploration d'épaves ou de décombres : recherche de tremblements de terre

- déminage de terrains

-exploration de zones radioactives : entretien de réacteurs. de piscine de stockage, etc...



Figure 1- 12: Bras de robot industriel.



Figure 1- 13: Rethink (robot manipulateur).

1- 14- 2 : Robots mobiles (Robots de service) :

robots capables de se déplacer dans un environnement. ils sont équipés ou non de manipulateurs suivant leur utilisation.

Robots de service: Ils sont destinés à aider l'homme pour certaines tâches :

- robots agricoles.
- robots de transport de marchandises : robots docker.
- robots ménagers : aspirateur, tondeuse .
- guide de musée : cité de l'espace à Toulouse.
- aide au personnes : personnes âgées ou ayant un handicap



Figure 1- 14: Robot tondeuse.



Figure 1- 15: Robot humanoïde HRP2.

1- 16: CONCLUSION:

Dans ce chapitre nous avons fait le point sur des généralités et des définitions dans le domaine de la robotique, qui vont nous être utiles dans la suite de notre étude. Nous avons également présenté les différents critères de classification des robots. Dans le chapitre suivant nous allons présenter : le modèle géométrique direct et inverse, le modèles cinématique direct. Ainsi que la modélisation en utilisant le système de paramétrage de Denavit Hartenberg.

CHAPITRE 02 : CINEMATIQUE DES ROBOTS.

2- 1 : Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les différents modèles utilisés en robotique ; nous introduisons brièvement les modèles géométriques direct et inverse qui donnent les différentes relations entre les grandeurs articulaires d'un robot manipulateur et la position et l'orientation de son organe terminal dans l'espace cartésien. De même, nous présentons les modèles cinématiques direct et inverse du premier et second ordre qui fournissent les relations entre vitesses et accélérations de l'espace articulaire et l'espace cartésien.

2- 2 : Modélisation des robots [12] :

La conception et la commande des robots nécessitent le calcul de certains modèles mathématiques, tels que :

- Modèles de transformation entre l'espace opérationnel (dans lequel est définie la situation de l'organe terminal) et l'espace articulaire (dans lequel est définie la configuration du robot). Parmi ces modèles, on distingue :
- Modèles **géométriques direct** et **inverse** qui expriment la situation de l'organe terminal en fonction de la configuration du mécanisme et inversement,
- Modèles **cinématiques direct** et **inverse** qui expriment la vitesse de l'organe terminal en fonction de la vitesse articulaire et inversement.

Définir les différentes tâches d'un robot réclame de pouvoir positionner l'organe terminal par rapport à un repère de référence.

2- 3 : Modèle géométrique : [23, 13 et 14]

Pour le chercheur, la première interrogation face à un robot est “comment calculer sa position”. Plus précisément : “où va se trouver l’outil du robot si chaque articulation possède tel angle (moteur rotatif) ou allongement (actionneur linéaire)”

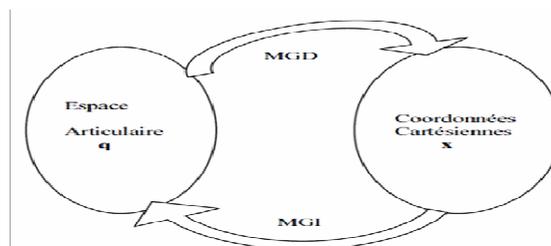


Figure 2- 1: Relation entre l'espace articulaire et l'espace des coordonnées cartésiennes de l'effecteur.

2- 3- 1: Modèle géométrique direct (M.G.D) : [15, 16, 17, 18, 19 et 20]

On s'intéresse à la relation liant l'espace articulaire associé aux différentes liaisons du robot avec l'espace opérationnel dans lequel est définie la situation de l'organe terminal. Cette relation s'exprime à l'aide de l'équation suivante :

$$x = f(q) \dots\dots\dots(2.1)$$

Où :

$q = [q_1, q_2, \dots, q_n]^T \in R^n$: Vecteur des variables articulaires.

$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in R^m$: Vecteur des variables opérationnelles, $m \leq n$.

Par exemple, si le manipulateur se déplace dans l'espace on pose $m=6$ (3 coordonnées pour la position et 3 coordonnées pour la rotation). S'il se déplace dans un plan on pose $m=2$ et si en plus, on est concerné par la rotation on pose $m=3$.

Le modèle géométrique direct est construit à partir de la modélisation de **Denavit-Hartenberg** modifiés qui place un repère sur chaque articulation. C'est la technique la plus répandue pour décrire la géométrie des chaînes cinématiques sérielles.

L'intérêt de cette méthode est qu'elle permet d'exprimer le passage entre deux repères en utilisant un nombre minimum de paramètres appelés paramètres géométriques.

2- 3- 2: Paramètres de Denavit-Hartenberg :

Le placement des repères s'effectue de la manière suivante :

- O_{i-1} est le pied de la perpendiculaire commune aux axes des liaisons L_{i-1} et L_i , situé sur L_{i-1} .
- Si les axes des liaisons sont parallèles, il faut choisir arbitrairement une perpendiculaire commune ;
- x_{i-1} est le vecteur unitaire de cette perpendiculaire commune, orienté de L_{i-1} vers L_i . Si les axes des deux liaisons sont concourants ou confondus, l'orientation est arbitraire (règle avant, droite, haut);
- z_{i-1} est un vecteur unitaire de l'axe de la liaison L_{i-1} , librement orienté. On privilégie généralement les débattements positifs pour les liaisons prismatiques et on symétrise généralement par rapport à 0 le débattement des liaisons rotondes.

- y_{i-1} est tel que le repère R_{i-1} soit orthonormé direct.

Ensuite, le repère R_0 est défini librement en suivant des considérations de simplicité. De même, le point O_{n-1} est choisi de façon à annuler un maximum de paramètres. Un point O_n est associé à l'organe Terminal.

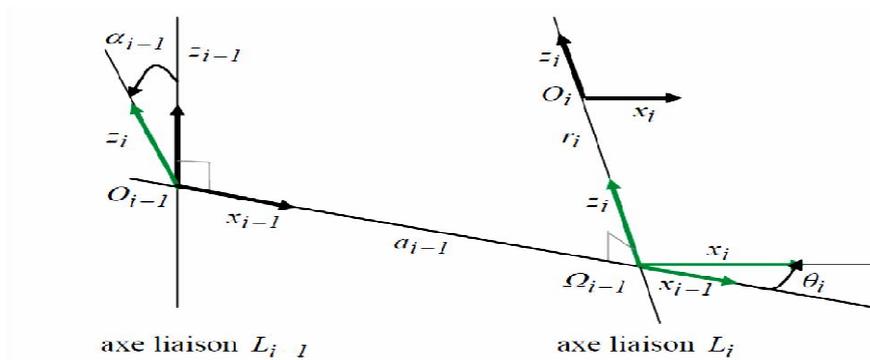


Figure 2- 2: Définition des paramètres suivant Denavit-Hartenberg.

$$\begin{cases} r_i \\ \theta_i \end{cases} \text{ Variables articulaires.}$$

$$\begin{cases} a_i \\ \alpha_i \end{cases} \text{ Paramètres dimensionnels.}$$

Les paramètres α_{i-1} , a_{i-1} , θ_i et r_i , avec $i=1, 2, 3, \dots, n$, placés sur cette figure sont appelés paramètres de Denavit-Hartenberg. Textuellement, on peut les définir comme suit:

- α_{i-1} : Angle algébrique entre Z_{i-1} et Z_i mesuré autour de X_{i-1} ;
- a_{i-1} : Distance arithmétique de la perpendiculaire commune aux axes des liaisons L_{i-1} et L_i , mesurée le long de L_{i-1} ;
- θ_i : Angle algébrique entre X_{i-1} et X_i , mesuré autour de Z_i ;
- r_i : Distance algébrique du point O_i à la perpendiculaire, mesurée le long de Z_i .

Remarque :

Un coefficient σ_i permet de distinguer les liaisons rotoïdes et prismatiques:

$$\sigma_i = \begin{cases} 0 & \text{si la liaison est de type rotoides.} \\ 1 & \text{si la liaison est de type prismatique} \end{cases}$$

Posons de plus :

$$\bar{\sigma}_i = 1 - \sigma_i \dots \dots \dots (2.2)$$

Ceci permet de définir l'ⁱème coordonnée généralisé q_i à l'aide de la formule (2.2) :

$$q_i = \bar{\sigma}_i \theta_i + \sigma_i r_i \dots \dots \dots (2.3)$$

Le calcul du M.G.D. consiste donc à exprimer la position du point O_n et l'orientation du repère R_n lié à l'O.T, en fonction de sa configuration. Il faut pour cela multiplier les matrices de passage homogènes successives reliant le repère R_0 lié au bâti au repère R_n lié à l'O.T.

Conformément au paramétrage de Denavit-Hartenberg, la matrice homogène entre les corps C_{i-1} et C_i est donc:

$${}^{i-1}T_i = R_x(\alpha_i). T_i(a_i). R_i(\theta_i). T_z(r_i) \dots \dots \dots (2.4)$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos a_{i-1} & -\sin a_{i-1} & 0 \\ 0 & \sin a_{i-1} & \cos a_{i-1} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & a_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots (2.5)$$

$R(\chi_{i-1}, \alpha_{i-1})$ Translation de $(\alpha_{i-1}, \chi_{i-1})$ $R(z_i, \theta_i)$ Translation (r_i, z_i)

Soit:

$${}^{i-1}T_i = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \cos a_{i-1} \sin \theta_i & \cos a_{i-1} \cos \theta_i & -\sin a_{i-1} & -r_i \sin a_{i-1} \\ \sin a_{i-1} \sin \theta_i & \sin a_{i-1} \cos \theta_i & \cos a_{i-1} & r_i \cos a_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots \dots \dots (2.6)$$

Qui prend la forme :

$$T_{i-1,i} = \begin{pmatrix} R_{i-1,i} & P_{i-1,i} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \dots \dots \dots (2.7)$$

Où $R_{i-1,i}$ représente la rotation entre les repères R_{i-1} et R_i . $P_{i-1,i}$ La translation entre ces mêmes repères.

Ce qui permet d'obtenir la matrice de transformation du repère de l'outil par rapport au repère de l'atelier (figure).

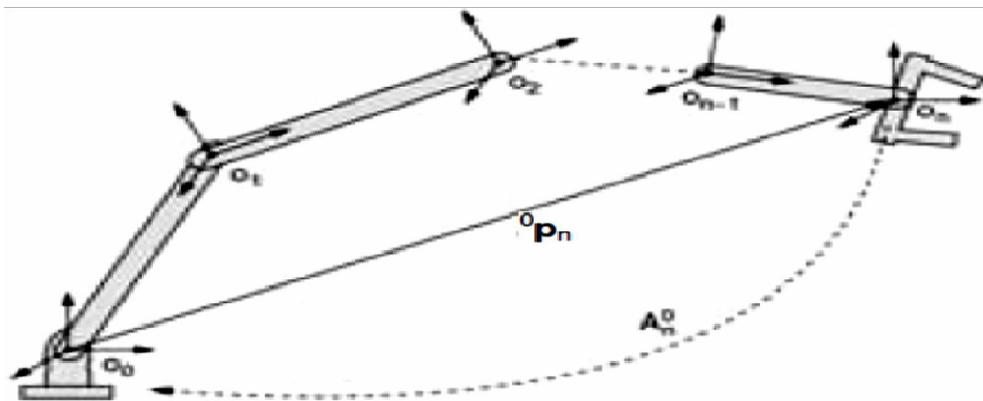


Figure 2- 3: Transformation du repère de l'outil par rapport au repère de l'atelier.

$${}^0T_n = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \dots {}^{n-2}T_{n-1} \cdot {}^{n-1}T_n = \prod_{i=1}^n {}^{i-1}T_i \dots \dots \dots (2.8)$$

2- 3- 3 : Modèle géométrique inverse (M.G.I) : [21, 22]

Le modèle géométrique inverse est le problème inverse qui permet de connaître les variables articulaires en fonction de la situation de l'organe terminal, ce qui peut se représenter par la relation:

$$q = f^{-1}(x) \dots \dots \dots (2.9)$$

Quand une solution existe, elle n'est pas en général unique. La même configuration de l'organe d'extrémité peut être obtenue pour différentes valeurs des variables articulaires (Fig. 2.3).

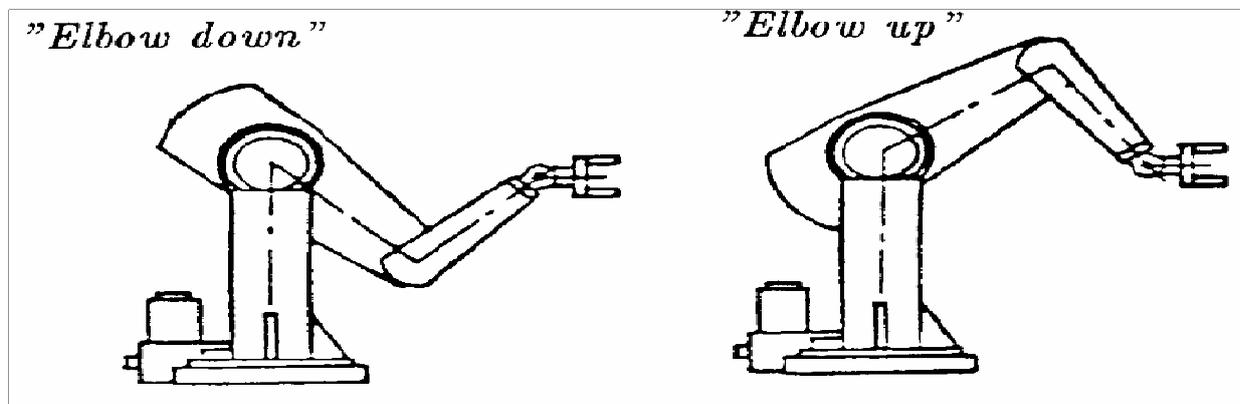


Figure 2- 4: Exemple de configurations multiples conduisant à la même position de l'organe d'extrémité (PUMA 560).

2 - 4 : Modèle cinématique :

Le modèle cinématique est, littéralement, un modèle des vitesses. Il exprime les relations entre les vitesses articulaires de chaque joint et les vitesses cartésiennes d'un point de la chaîne cinématique, généralement l'organe terminal.

Le modèle cinématique permet donc non seulement de compléter éventuellement le modèle géométrique en tenant compte des vitesses, mais aussi de remplacer le modèle géométrique : en agissant par accroissements successifs, on peut se déplacer d'un point donné à un autre.

Le modèle cinématique possède une propriété essentielle : il est une différentiation du modèle géométrique. Il est donc une linéarisation du système d'équations non linéaire représentant le modèle géométrique. Par conséquent, on peut toujours facilement obtenir les

transformations inverses puisqu'elles proviennent de l'inversion d'un problème linéaire.

2-4- 1 : Modèle cinématique directe.

Le modèle est décrit par l'équation :

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \dots\dots\dots (2.10).$$

Où J est la matrice Jacobéenne.

Matrice Jacobéenne :

L'outil principalement utilisé pour traiter le problème de la cinématique des robots est la matrice Jacobéenne. Elle représente un opérateur permettant de lier les vitesses des corps d'un robot exprimées dans différents espaces vectoriels.

Considérons le modèle géométrique d'un robot possédant m degrés de liberté évoluant dans un espace à n dimensions (m et n indépendants) :

$$X_1 = f_1(q_1, q_2, \dots, q_m) \dots\dots\dots (2.11)$$

$$X_2 = f_2(q_1, q_2, \dots, q_m) \dots\dots\dots (2.12)$$

$$X_n = f_n(q_1, q_2, \dots, q_m) \dots\dots\dots (2.13)$$

Représente le vecteur de la position de l'organe terminal dans l'espace de la tâche, et le vecteur des coordonnées articulaires.

On peut simplifier l'écriture en mettant (2.14) sous forme vectorielle :

$$X = f(q) \dots\dots\dots (2.14)$$

Si maintenant nous différencions l'équation (2.14), nous obtenons :

$$\delta X_1 = \frac{\partial f_1}{\partial q_1} \delta q_1 + \frac{\partial f_1}{\partial q_2} \delta q_2 + \dots + \frac{\partial f_1}{\partial q_m} \delta q_m \dots\dots\dots (2.15)$$

$$\delta X_2 = \frac{\partial f_2}{\partial q_1} \delta q_1 + \frac{\partial f_2}{\partial q_2} \delta q_2 + \dots + \frac{\partial f_2}{\partial q_m} \delta q_m \dots\dots\dots (2.16)$$

$$\delta X_1 = \frac{\partial f_n}{\partial q_1} \delta q_1 + \frac{\partial f_n}{\partial q_2} \delta q_2 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial q_m} \delta q_m \dots\dots\dots (2.17)$$

Ou sous forme condensée :

$$\delta X = \frac{\partial f}{\partial q} \delta q \dots\dots\dots (2.18)$$

Nous posons alors comme définition de la matrice Jacobéenne J :

$$[J(q)] \equiv \left[\frac{\partial f}{\partial q} \right] \dots\dots\dots (2.19)$$

En divisant les deux côtés de l'équation (2.19) par l'élément différentiel de temps, on peut voir la matrice Jacobéenne comme l'opérateur reliant les vitesses cartésiennes aux vitesses articulaires.

Si les fonctions sont non linéaires, alors leurs dérivées partielles sont en fonction de la matrice jacobéenne est donc un opérateur linéaire dépendant de la position instantanée du robot.

2- 4- 2 : Modèle cinématique inverse:

Le modèle cinématique inverse permet de déterminer la vitesse des variables articulaires en fonction de la vitesse des variables opérationnelles. Pour les manipulateurs non redondants, le modèle s'écrit :

$$\dot{q} = J^{-1}(q) \dot{\chi} \dots\dots\dots (2.20)$$

La solution de l'équation (2.20) existe si (J) est de rang plein, cela est valable tant que le manipulateur ne passe pas par une configuration singulière. Pour les manipulateurs redondants, le modèle cinématique inverse admet plusieurs solutions possibles.

On déduit donc, par dérivation des relations (2.20) et (2.19) les modèles cinématiques directs et inverses du second ordre qui lient les accélérations articulaires et cartésiennes:

$$\ddot{\mathbf{X}} = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q} \dots\dots\dots (2.21).$$

$$\ddot{q} = J^{-1}(q) \left[\ddot{\mathbf{X}} - \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q} \right] \dots\dots\dots (2.22)$$

2- 5: Conclusion:

Pour modélisé un robot sériel à n articulations, il faut représenter le comportement du ce robot sous la forme d'un modèle, une telle démarche s'appelle la modélisation, d'une manière générale, on recherche toujours le modèle le plus simple qui permet d'expliquer, de manière satisfaisante, le comportement du processus dans son domaine d'application; les modèles de transformation entre l'espace opérationnel et l'espace articulaire. On distingue :

- Les modèles géométriques qui expriment la situation de l'organe terminal en fonction de la configuration du mécanisme.
- Les modèles cinématiques permettent de contrôler la vitesse de déplacement du robot afin de connaître la durée d'exécution d'une tâche.

Pour développer ces deux modèles il faut suivre une méthode systématique. Il s'agit de la méthode Denavit-Hartenberg qui reste toujours la méthode de long temps la plus utilisée en robotique sérielle.

CHAPITRE 3: PROBLEME CINEMATIQUE INVERSE.

3- 1: Introduction:

Le problème de la cinématique inverse se compose à la détermination des variables articulaires correspondant à une position et à une orientation données de l'organe terminal. La solution à ce problème est d'importance fondamentale afin de transformer les caractéristiques de mouvement, assigné a l'organe terminal dans l'espace opérationnel, en mouvements d'espace communs correspondants cela permettent l'exécution du mouvement désiré. Le problème de la cinématique inverse est beaucoup plus compliqué pour les raisons suivantes :[22]

Les équations à résoudre sont en général non linéaires, et il n'est pas ainsi toujours possible de trouver une solution exacte. • Les solutions multiples peuvent exister. • Les solutions infinies peuvent exister, par exemple, dans le cas d'un manipulateur cinématiquement redondant. • Il ne pourrait y avoir aucune solution admissible, en raison de la structure cinématique de manipulateur.

L'existence des solutions est garantie seulement si la position et l'orientation données de l'organe terminal appartiennent à la zone de travail adroite de manipulateur. [23]

3- 2 : Problème général de la cinématique inverse :

Le problème général de la cinématique inverse peut être énoncé comme suit : donné une transformation homogène de 4x4:

$$T_H^R = \begin{bmatrix} R & O \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(3.1)$$

Trouver les solutions possibles de cette équation :

$$T_n^0(q_1, \dots, q_n) = T_H^R \dots\dots\dots(3.2)$$

On a :

$$T_n^0(q_1, \dots, q_n) = A_1(q_1) \dots\dots\dots A_n(q_n) \dots\dots\dots(3.3)$$

Sachant que H représente la position et l'orientation désirées de l'organe terminal et notre Problème est de trouver les valeurs des articulations (q1..... qn) de sorte que :

$$T_n^0(q_1, \dots, q_n) = T_H^R \dots\dots\dots(3.4)$$

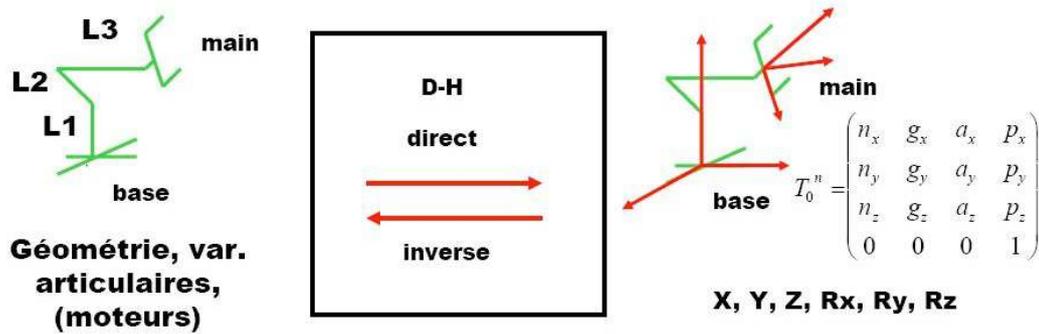


Figure 3- 1: Solution cinématique inverse donne les coordonnées articulaires (coordonnées moteurs, à gauche), en fonction des coordonnées spatiales (à droite).

3- 3 : Solution analytique:

Bien qu'on dispose d'équations liant les variables articulaires et les éléments de la matrice du bras, la solution analytique est délicate pour plusieurs raisons:

- Équations transcendantes
- Solutions multiples possibles
- Dégénérescence possible (par exemple axes alignés), d'où
- Absence de solution ou solutions en nombre infini.

3- 4 : Solution géométrique (approche intuitive):

Bien que l'on ne dispose pas de solution systématique pour le problème cinématique inverse, il est souvent possible de poser les équations nécessaires par des considérations géométriques. Une classe de situations favorables rassemble les bras dont les axes de rotations du poignet se coupent en un même point. On peut alors sparer le problème en deux parties:

- A.** Solution relative au positionnement, c'est-à-dire aux trois premières articulations. On utilise alors comme point auxiliaire le centre du poignet.
- B.** Solution relative à l'orientation. De manière analogue au cas précédent, les dernières articulations sont exprimées en fonction des termes de la matrice du bras.

3-5 : Chaîne cinématique : [24]

Nous déterminons maintenant l'architecture de la chaîne cinématique qui est la caractérisation de la position et de l'orientation relative des membrures et des articulations du manipulateur. Pour ce faire, nous utilisons la notation de Denavit-Hartenberg standard. La Figure ci-dessous (fig.3.2) permet de comprendre cette architecture.

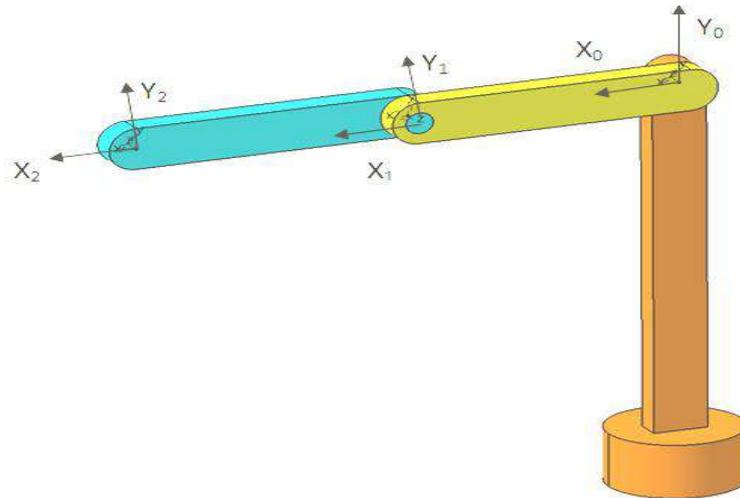


Figure 3- 2: Architecture de la chaîne cinématique du manipulateur à structure RR.

3-5- 1 : Paramètres de (D-H) du robot choisi :

À partir de l'architecture de la chaîne cinématique nous pouvons définir les paramètres de Denavit-Hartenberg (DH).

Tableau 3- 1: Paramètres géométriques de robot (R.R).

Type de couple	Valeur des paramètres			
	θ_i	α_i	d_i	a_i
Rotatif	θ_1	0	0	l_1
Rotatif	θ_2	0	0	l_2

3- 5- 2 : Calcul de Modèle géométrique directe M.G.D :

Pour la modélisation du bras manipulateur, nous appliquons le formalisme de Denavit Hartenberg. On associe à chacun des corps i ($i = 0, 1, 2,3$) du bras manipulateur un repère $R_i = (o_i x_i y_i z_i)$ (fig.3.2). Ensuite, on détermine les matrices de passage des Repères R_{i-1} aux repères R_i , exprimées par les matrices homogènes ${}^{i-1}T_i$. La détermination du modèle géométrique direct (M.G.D) consiste à trouver la transformation 0T_2 qui permet de décrire la situation du repère final par rapport au repère de base choisi. Pour cela, on effectue le produit matriciel de toutes es ${}^{i-1}T_i$

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & l_1 C_1 \\ S_1 & C_1 & 0 & l_1 S_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.5)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & l_2 C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & l_2 S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.6)$$

Sachant que :

C_i : représente le $\cos\theta_i$.

S_i : représente le $\sin \theta_i$

C_{ij} : représente le $\cos (\theta_i +\theta_j)$

S_{ij} : représente le $\sin (\theta_i +\theta_j)$

Les équations du modèle cinématique directe sont données donc :

$${}^0T_2 = {}^0T_1 {}^1T_2 \dots\dots\dots (3.7)$$

$${}^0T_2 = \begin{bmatrix} S_x & N_x & A_x & P_x \\ S_y & N_y & A_y & P_y \\ S_z & N_z & A_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.8)$$

$${}^0T_2 = \begin{bmatrix} C_{12} & -S_{12} & 0 & l_1C_1 + l_2C_{12} \\ S_{12} & C_{12} & 0 & l_1S_1 + l_2S_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.9)$$

Donc :

$$\begin{cases} P_x = l_1C_1 + l_2C_{12} \\ P_y = l_1S_1 + l_2S_{12} \\ P_z = 0 \end{cases} \dots\dots\dots (3.10)$$

3- 5- 3 : Calcule du modèle géométrique inverse (M.G.I) :

Le point ‘p’ est la position où l’on fixe la sonde ultrason pour le premier Robot, et l’aiguille pour le deuxième :

La position 0dp fournit 2 équations en fonction de 3 coordonnées articulaires θ_1, θ_2 .

C’est facile de calculer la cinématique inverse analytiquement à partir des équations de la position de l’organe terminale, on a :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1C_1 + l_2C_{12} \\ l_1S_1 + l_2S_{12} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.11)$$

Donc,

$$X^2 + Y^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2 \cos\theta_2 \dots\dots\dots (3.12)$$

$$\cos\theta_2 = \frac{X^2 + Y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \dots\dots\dots (3.13)$$

L’expression de θ_2 est donnée par la relation suivante :

$$\theta_2 = \cos^{-1} \frac{X^2 + Y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \dots\dots\dots (3.14)$$

La fonction arc tan donne des résultats plus précis. On utilise donc la relation suivante :

$$\tan^2 \frac{\theta}{2} = \frac{1 - \cos\theta}{1 + \cos\theta} \dots\dots\dots (3.15)$$

Pour trouver θ_2 en fonction de la fonction atan2 :

$$\theta_2 = \mp 2 \operatorname{atan2} \sqrt{\frac{(l_1 + l_2)^2 - (X^2 + Y^2)}{(X^2 + Y^2) - (l_1 - l_2)^2}} \dots\dots\dots (3.16)$$

Le signe donne deux solutions appelées ‘elbow up’ et ‘elbow down’ comme la (figure 3.3) montre.

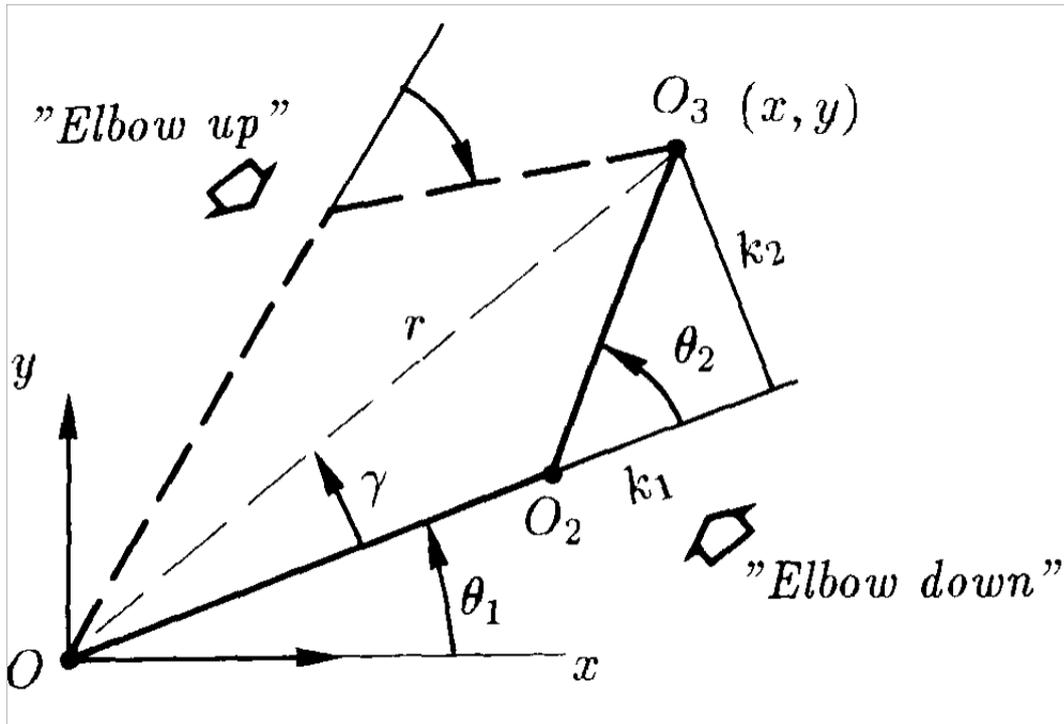


Figure 3- 3: Configuration ‘Elbow up’ et ‘Elbow down’.

Ayant obtenu θ_2 , l’angle θ_1 sera obtenu géométriquement. Finalement θ_1 , s’obtient simplement pour la configuration de ‘elbow up’ par :

$$\theta_1 = \operatorname{atan2} \frac{Y}{X} + \operatorname{atan2} \frac{l_2 \sin\theta_2}{l_1 + l_2 \cos\theta_2} \dots\dots\dots (3.17)$$

Et pour la configuration de ‘elbow down’ on a :

$$\theta_1 = \operatorname{atan2} \frac{Y}{X} - \operatorname{atan2} \frac{l_2 \sin\theta_2}{l_1 + l_2 \cos\theta_2} \dots\dots\dots (3.18)$$

3- 5- 4 : Matrice Jacobine :

L’outil principalement utilisé pour traiter le problème de la cinématique, et particulièrement des modèles géométriques et cinématique des robots est « la matrice Jacobéennes » .elle représente

un opérateur permettant de lier les vitesses des corps d'un robot exprimées dans différents espaces vectoriels.

On utilise les coordonnées de O_3 pour déterminer la matrice Jacobéenne. (Fig.3.4)

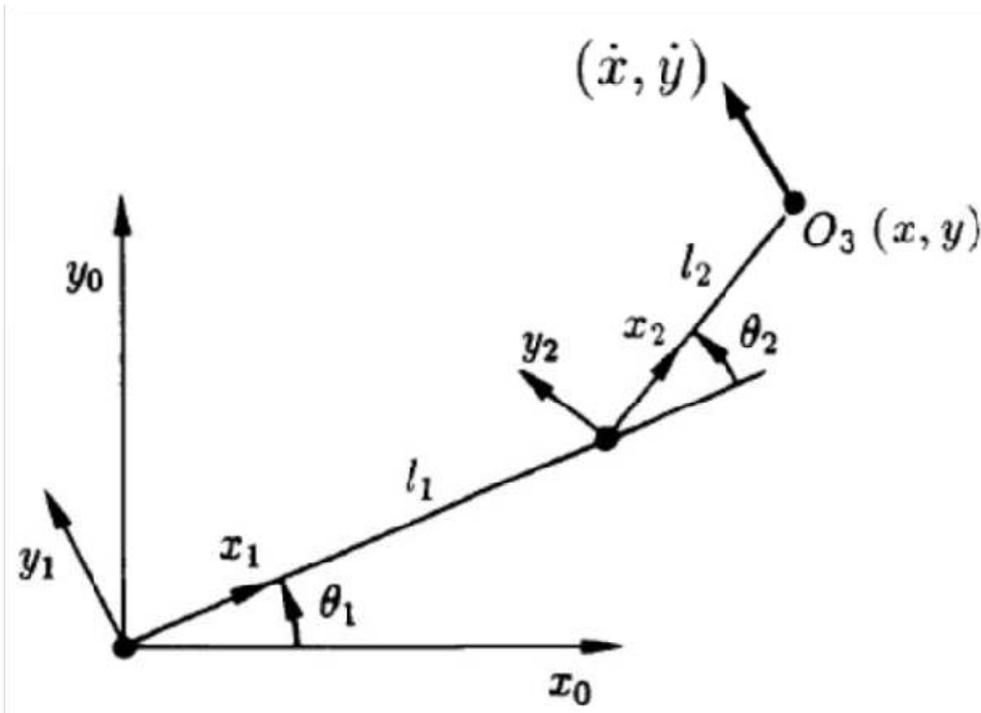


Figure 3- 4 Coordonnées de vitesse opérationnelle.

Les coordonnées de l'origine O_3 dans le référentiel $\{0\}$ s'expriment :

$$P_x = l_1 C_1 + l_2 C_{12} \dots\dots\dots (3.19)$$

$$P_y = l_1 S_1 + l_2 S_{12} \dots\dots\dots (3.20)$$

La jacobine, exprimée dans le référentiel $\{0\}$, s'obtient directement par dérivation :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = J_0(\theta_1, \theta_2) \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} \dots\dots\dots (3.21)$$

$$J_0 = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -l_1 S_1 - l_2 S_{12} & -l_2 S_{12} \\ l_1 C_1 + l_2 C_{12} & l_2 C_{12} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (3.22)$$

3- 5- 5 : Jacobine inverse, singularité :

Le Jacobine définit une relation linéaire entre les vitesses de l'organe d'extrémité et les vitesses articulaires. Il dépend cependant de la configuration du manipulateur.

Dans la réalité du contrôle de la trajectoire d'un robot manipulateur, l'intérêt se porte plutôt sur le problème inverse qui consiste à déterminer les vitesses articulaires nécessaires pour obtenir une vitesse désirée de l'organe d'extrémité.

Nous allons faire ressortir les caractéristiques essentielles pour un système dont l'espace opérationnel et l'espace articulaire ont la même dimension ($n = m = 2$). La matrice J_0 reste carrée et s'inverse aisément sous la forme :

$$\begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{l_1 l_2 s_2} \begin{pmatrix} l_2 c_{12} & l_2 s_{12} \\ -l_1 c_1 - l_2 c_{12} & -l_1 s_1 - l_2 s_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (3.23)$$

Cette relation permet, pour chaque valeur de θ_1 et de θ_2 , calculé les $\dot{\theta}_1$ et $\dot{\theta}_2$ nécessaires pour obtenir les vitesses \dot{x} et \dot{y} . Elle est singulière pour $\theta_2 = \pi$ ou $\theta_2 = 0$. Pour ces valeurs, le Jacobine n'est plus de rang maximum, puisque ses colonnes deviennent proportionnelles :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\theta_1 \\ \cos\theta_1 \end{pmatrix} [(l_1 \mp l_2)\dot{\theta}_1 \mp l_2\dot{\theta}_2] \dots\dots\dots (3.24)$$

Les signes (+) se rapportent à $\theta_2 = 0$ et les signes(-) à $\theta_2 = \pi$, respectivement. Cette relation indique que les vitesses selon x et y sont plus indépendantes mais tangentes à un cercle. La solution de $\det(J)=0$, est indépendante du référentiel utilisé.

En un point singulier, il existe au moins une direction selon laquelle l'organe d'extrémité ne peut être déplacé, quelles que soient les vitesses d'articulations. A proximité des singularités, toute composante de vitesse dans une direction interdite entraîne des vitesses angulaires très importantes, comme illustré à la figure 3.5. Sur cette figure, le manipulateur, avec $l_1=l_2$, doit parcourir successivement les axes de coordonnées avec une vitesse linéaire aussi uniforme que possible, en suivant la trajectoire ABCD. La configuration du manipulateur en différentes positions de la trajectoire est indiquée sur la figure 3.5.a. La configuration est singulière en A et D, ainsi qu'à l'origine.

La figure 3.5.b montre la distribution des vitesses d'articulations nécessaires pour obtenir une vitesse de déplacement uniforme. On observe que $\dot{\theta}_1$ et $\dot{\theta}_2$ tendent vers l'infini en A et D, et que $\dot{\theta}_1$ tend vers l'infini à l'origine.

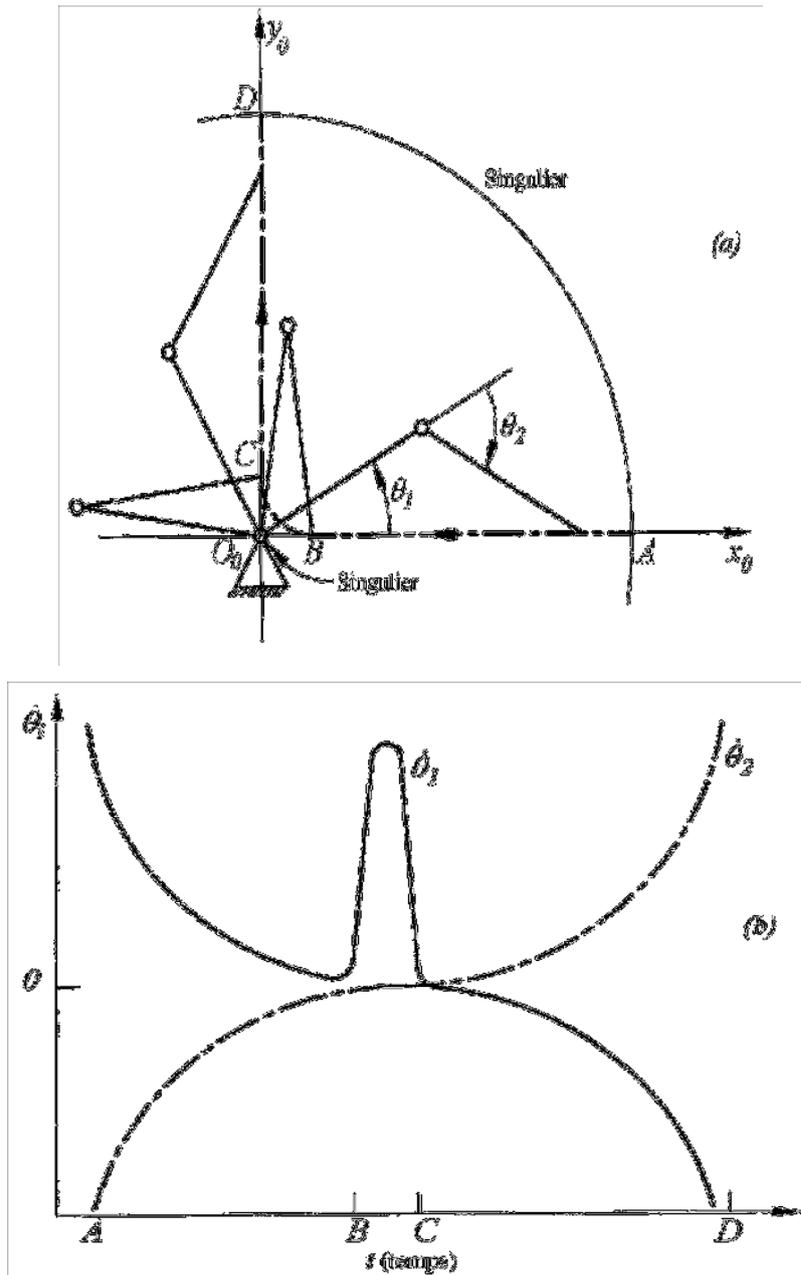


Figure 3- 5: Suivi de trajectoire traversant des points singuliers : (a) Changement brutal de configuration à proximité d'un point singulier. (b) Distribution des vitesses d'articulations.

3-6 : Application :

On va faire la modélisation de bras manipulateurs, est du type RR à deux degrés de liberté

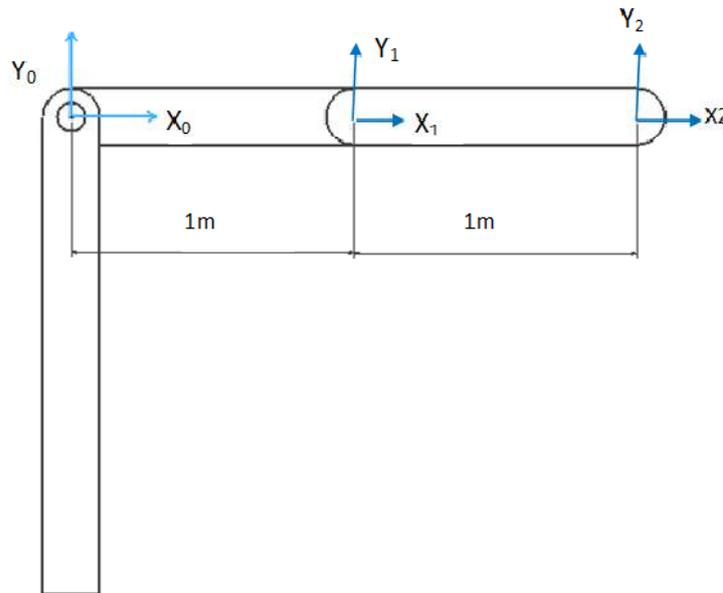


Figure 3- 6: Structure cinématique du premier robot (RR).

Notre robot, a deux degrés de liberté, les longueurs de bras sont identiques de 0.25m.

$$L1=L2=0.25m$$

Le déplacement doit suivre une ligne droite de l'équation suivante :

$$X = -0.25998 X + 0.3705 \dots\dots\dots (3.25)$$

Le robot est supposé se déplacer de point P₁ au point P₂ dans un espace de temps de 10(s).

$$X_{P_1}=0.41122 \text{ m} \qquad Y_{P_1}=0.26359 \text{ m}$$

$$X_{P_2} = -0.0282 \text{ m} \qquad Y_{P_2}=0.37783 \text{ m}$$

On peut déterminer la fonction polynomiale de X, Y à l'aide d'une interpolation cubique :

$$X = 0.41122 - 0.0131826t^2 + 0.00087884t^3 (m) \dots\dots\dots (3.26)$$

$$Y = -0.00022848 t^3 + 0.003427 t^2 + 0.26359 (m) \dots\dots\dots (3.27)$$

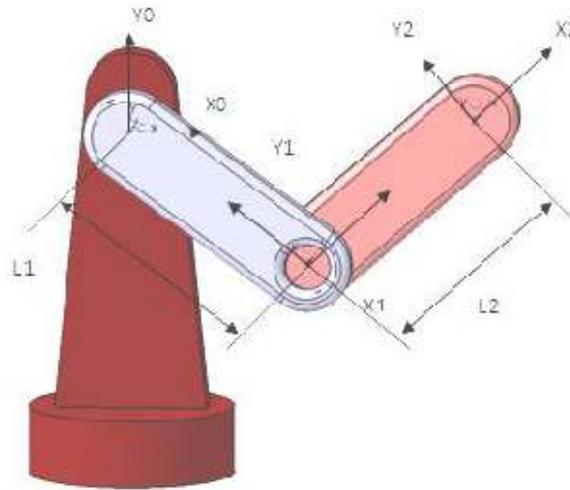


Figure 3- 7: Structure cinématique du robot RR.

3- 7 : CONCEPTION DE NOTRE ROBOT :

3- 7- 1 : Conception Assistée Par Ordinateur (CAO):

La conception assistée par ordinateur (**CAO**) permet de créer une vue virtuelle d'un projet servant de maquette pour la simulation. Cette technique est très importante, compte tenue de l'enjeu économique et financier de certains projets, elle est aussi utilisée pour réaliser des séquences cinématographiques qu'il serait impossible ou trop onéreux de tourner véritablement. Les différentes applications de la **CAO** permettent de créer des objets en (2D) ou (3D) et de les visualiser en modèles, surfaciques, volumiques, ou encore sous forme de solides avec leur texture. On procède par la discrétisation des pièces à étudier en éléments ou bien volumes finis en les calculant numériquement.

Elle est utilisée dans tous les services de la recherche et de développement de nombreux métiers liés à l'industrie (automobile, armement, aéronautique, etc...), mais également dans des applications nécessitant une représentation graphique fidèle de ce que l'on envisage de réaliser, comme en architecture. La conception assistée par ordinateur (**CAO**) est devenue une technique incontournable dans l'industrie aérospatiale.

3- 7- 2 : Logiciel SolidWorks :

Inventé par l'éditeur américain en 1995, et qui a été acheté par la société Dassault Systèmes. Les grandes entreprises qui utilisent le **SOLIDWORKS** sont : Michelin, Patek Philippe, MegaBloks,

Axiome, ME2C, SACMO, et le Boulch Robert Renaud. Le **SOLIDWORKS** est un modéleur 3D utilisant la conception paramétrique.

Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage, et la mise en plan. De nombreux logiciels viennent compléter l'éditeur **SOLIDWORKS**. Des utilitaires orientés métiers (tôlerie, bois, BTP...), mais aussi des applications de simulation mécanique ou d'image des synthèses travaillent à partir des éléments de maquette virtuelle.

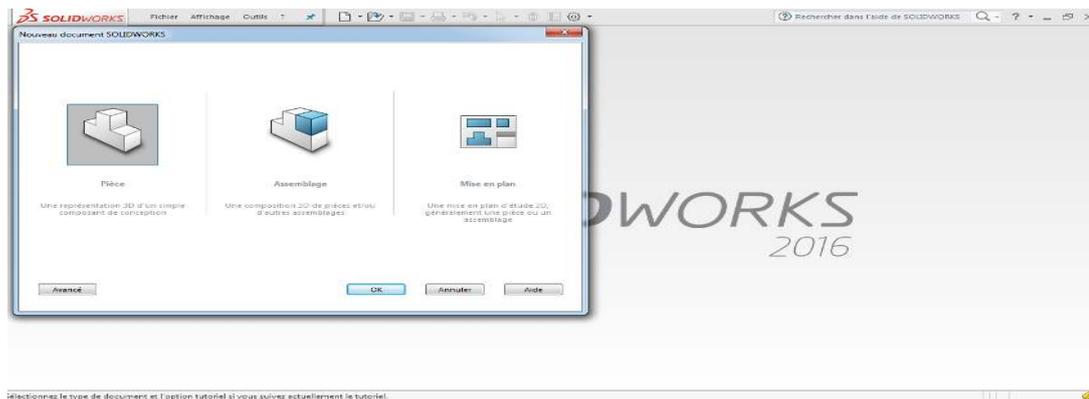


Figure 3- 8 : Format d'un SOLIDWORKS 2016.

3- 7- 3 : Mise en plan.

C'est un dessin de définition établi avec **SOLIDWORKS**. Il concerne à la fois les pièces (dessin de définition) ou les assemblages (dessin d'ensemble). Pour aboutir à un plan fini d'une pièce, on peut estimer de mettre deux fois de temps qu'avec un outil **CAO** (temps de conception et exécution du dessin). En effet, en **CAO**, chaque trait est indépendant et c'est au dessinateur de savoir quelles entités graphiques sont concernées par une modification. Le logiciel 3D ne fait qu'une projection de l'objet. Les modifications éventuelles sont opérées sur l'objet représenté, et ne concernent pas directement le plan.

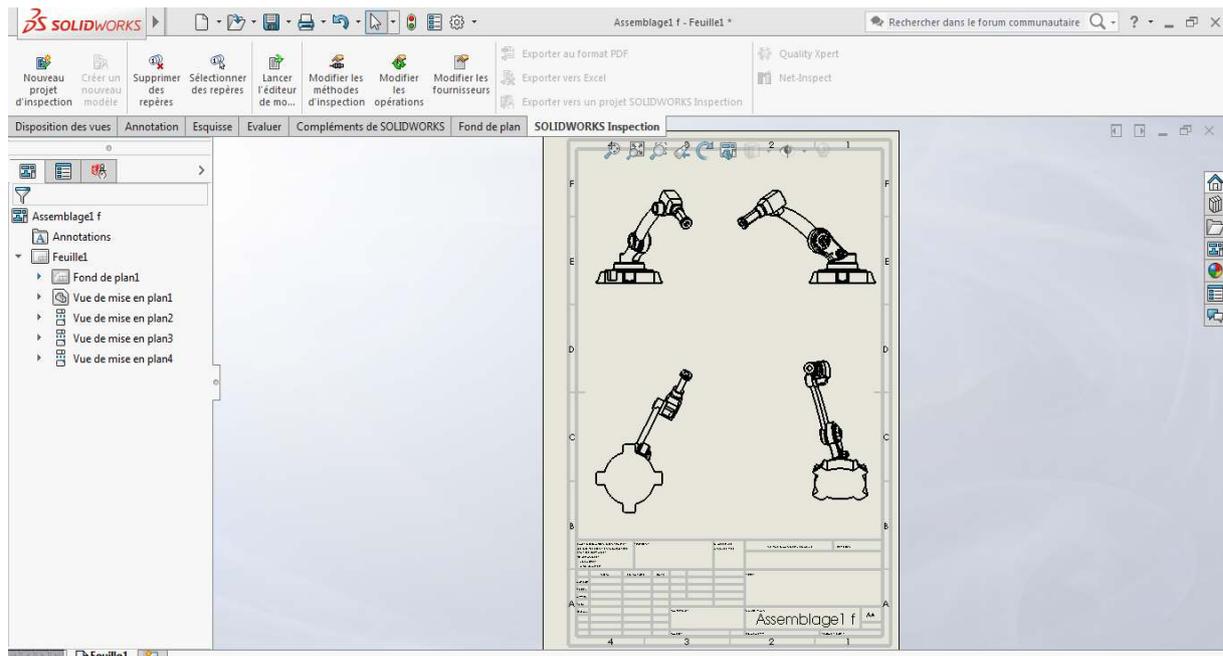


Figure 3- 9 : Mise en plan.

- **Vues :** la projection sur plan de modèle ne pose aucun problème. Aujourd’hui il est très facile d’obtenir un plan, forcément juste (avec un logiciel de **CAO** il est possible d’éditer un plan faux). Les vues en coupes, les vues partielles, perspectives, sont exécutées d’un simple clic. Les seuls problèmes encore rencontrés concernent la représentation des filetages et taraudages dans les assemblages.

De plus, chaque vue peut être exécuté avec habillage différent, filaire, conventionnel

Ou ombré rendant encore plus accessible la lecture de plans aux non-initiés.

- **Cotation :** La cotation regroupe l’ensemble des spécifications géométriques définissant la pièce, les paramètres déclarés des esquisses en font partie. Ils peuvent être automatiquement intégrés, de manière équilibrée, à la mise en plan. À ce niveau il est encore possible de modifier la pièce en changeant la valeur des côtes. L’indépendance de ces paramètres, se rapproche du principe dit d’indépendance (cotation **GPS**). Cependant, la mise en forme définitive de la cotation demande encore un peu de travail (avec un éditeur **DAO** ou sur le calque aussi).
- **Fond de plan :** **SOLIDWORKS** par défaut propose ses propres fonds de plan. Mais il est possible de les faire soi-même ; il existe deux types de fond de plan :
 - Le fond de plan statique, où il faut remplir à la main chacun des champs.
 - Le fond de plan dynamique, où il se remplit automatiquement suivant les paramètres mis dans l’assemblage ou dans la pièce.

- **Nomenclature** : Le fichier assemblage contient chacune des pièces qui composent l'assemblage, on peut donc sortir de façon automatique la nomenclature appartenant à la maquette 3D.
- **Extensions des fichiers** : La simple ouverture d'un fichier dans une version ultérieure le rend inutilisable pour toutes versions antérieures. Vu leur très faible interopérabilité et le fait que leur contenu soit sauvé sans que l'on utilise la commande de sauvegarde, ces fichiers **SOLIDWORKS** ne doivent pas être considérés comme des sauvegardes à long terme d'un contenu, mais comme une simple extension de mémoire physique ayant la propriété de rémanence.

Chaque type de fichier possède une extension qui lui est propre. On trouve :

.solder, pour les fichiers pièce.

.soldas, pour les fichiers assemblage.

.solder, pour les fichiers plans.

.soldat ; pour les fichiers de fond de plan. Certains formats proposés par le logiciel permettent d'envisager une sauvegarde à long terme.

3- 7- 4 : Assemblage :

Il est obtenu par la juxtaposition de pièces. La mise en position des pièces est définie par un ensemble de contraintes d'assemblage associant, deux entités respectives par une relation géométrique (coïncidence, tangence, coaxial ite...).

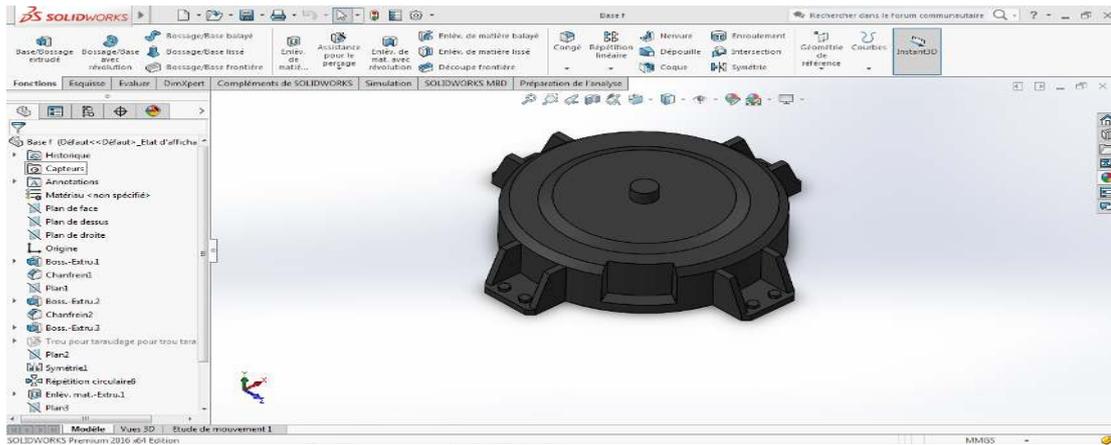
Dans une certaine mesure, ces associations de contraintes s'apparentent aux liaisons mécaniques entre les pièces. Le mécanisme monté, s'il possède encore des mobilités, peut être manipulé virtuellement. On peut alors aisément procéder à des réglages à l'aide des différents outils disponibles (déplacement composants, détection de collision, mesure des jeux, etc.).

Comme pour les pièces, la gestion de l'ensemble est portée par un arbre de création qui donne accès à l'arbre de création de chaque pièce. Il est d'ailleurs possible d'assembler des assemblages, donc de former des sous-groupes de pièces. Cette opération étant préalable ou en cours d'édition.

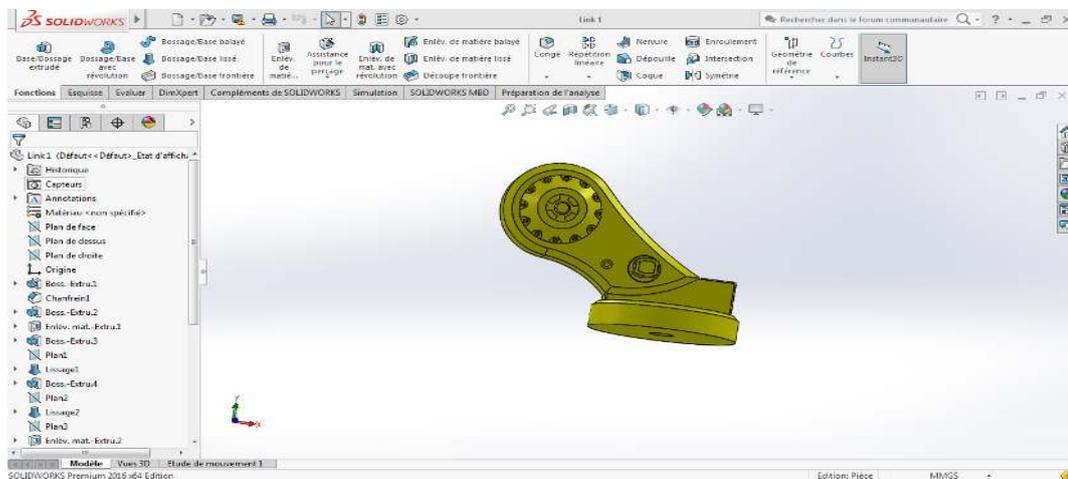
L'intérêt de cet outil, c'est qu'il rend possible la création d'une pièce dans l'assemblage, c'est qu'il propose la même méthode au concepteur que celle qu'il appliquait sur la table à dessin: tout concevoir en même temps. En effet, à part sur les petits ensembles simples (ou déjà définis), il n'est pas raisonnable de concevoir chaque pièce dans son coin pour corriger ensuite, lors de

l'assemblage, les problèmes éventuels d'interférence, ou de coïncidence. La conception intégrée lie automatiquement les géométries des pièces entre elles, si bien qu'une modification sur une, est automatiquement répercutée sur les autres. Alors l'édition de pièce est la conséquence de l'édition de l'ensemble.

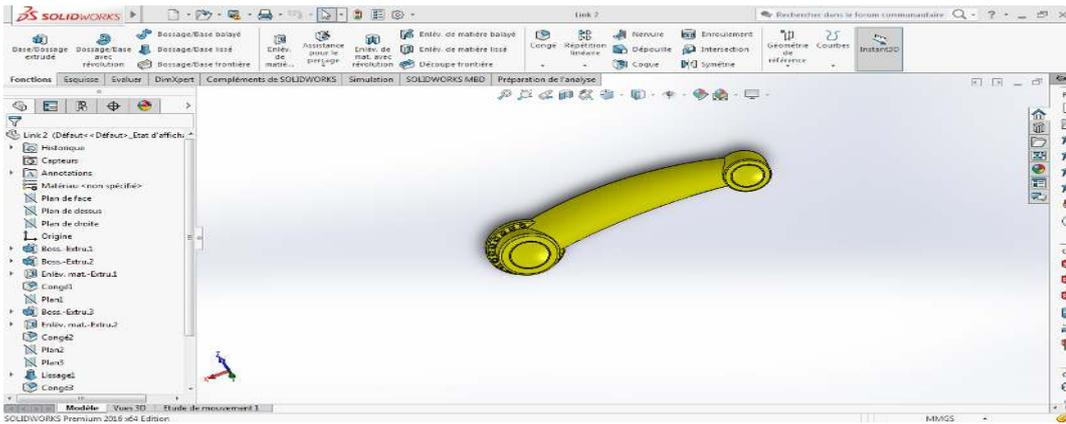
3-7-5 : Pièces de robot avant assemblage :



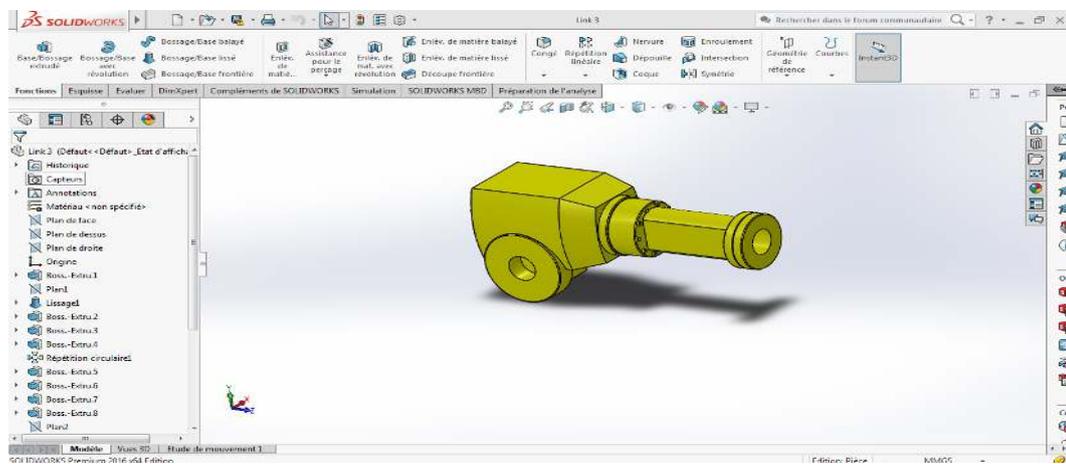
Base



CHAINON1



CHAINON2



CHAINON3

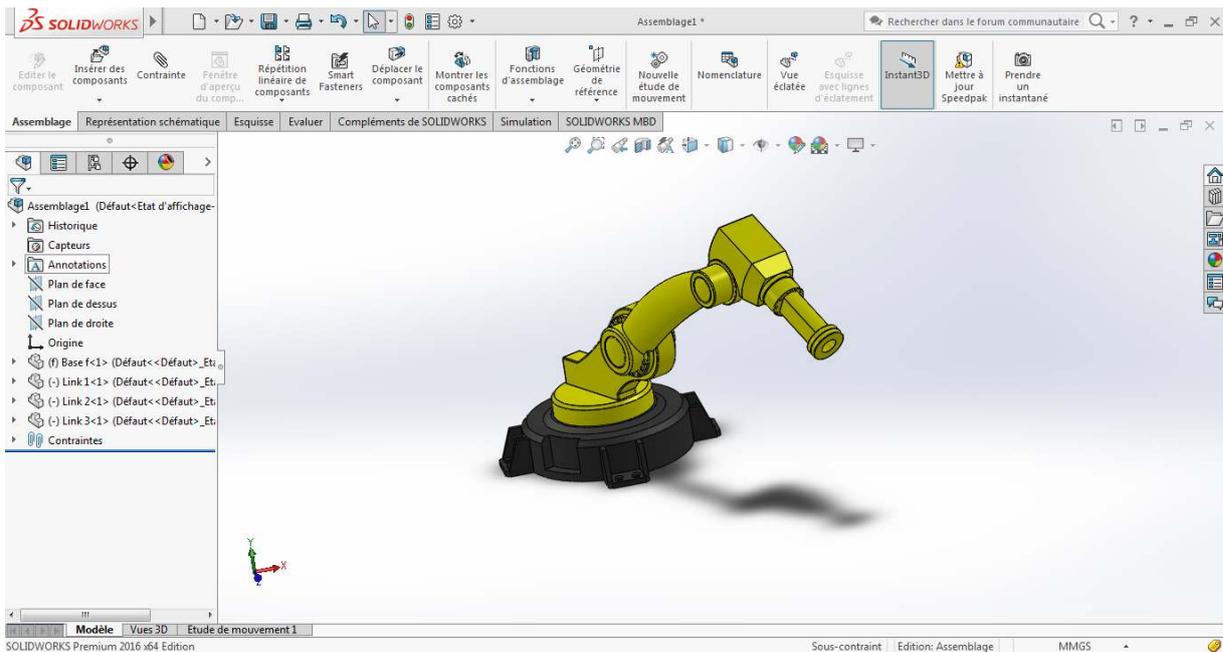


Figure 3- 10: Vue d'ensemble du robot.

3-8 : Modélisation de bras manipulateurs du type RRR :

On va faire la modélisation de bras manipulateurs, est du type RRR à trois degrés de liberté :

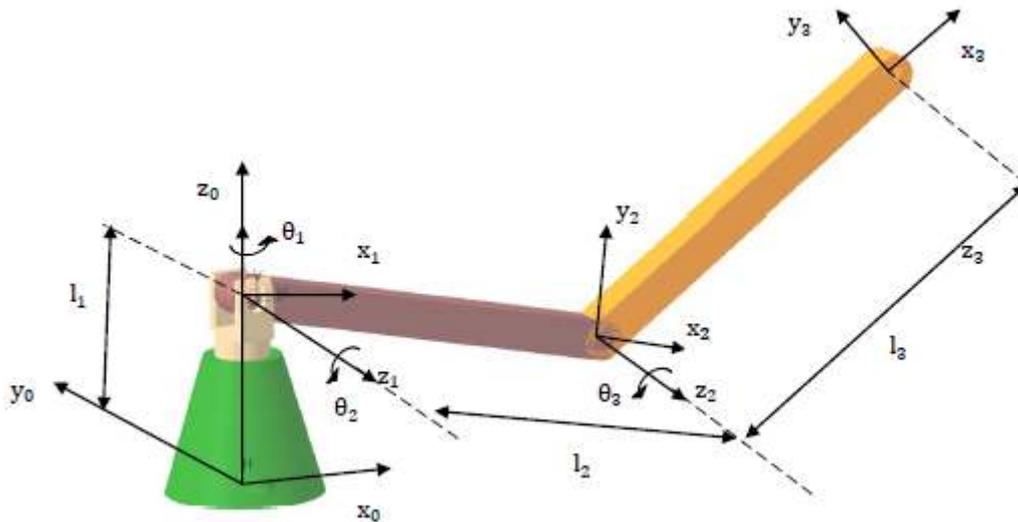


Figure 3- 11 : Architecture de la chaîne cinématique du manipulateur à structure RRR.

3-8-1 : Paramètres de (D-H) du robot choisi :

À partir de l'architecture de la chaîne cinématique nous pouvons définir les paramètres de Denavit-Hartenberg (DH).

Tableau 3- 2: Paramètres géométriques du robot.

Type de couple	Valeur des paramètres			
	θ_i	α_i	d_i	a_i
Rotatif	θ_1	$\pi/2$	0	l_1
tatif	θ_2	0	l_2	0
Rotatif	θ_3	$\pi/2$	l_2	0

3-8-2 : Calcul de Modèle géométrique directe M.G.D:

Pour la modélisation du bras manipulateur, nous appliquons le formalisme de Denavit Hartenberg.

3- 8- 2 -1: Détermination du modèle géométrique direct (MGD) :

Les matrices de passage des repères R_{i-1} aux repères R_i , exprimées par les matrices homogènes ${}^i T_{i-1}$.

$${}^0 T_1 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & -C_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.28)$$

$${}^1 T_2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & l_2 C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & l_2 S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.29)$$

$${}^2 T_3 = \begin{bmatrix} C_3 & 0 & S_3 & 0 \\ S_3 & 0 & -C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.30)$$

Les équations du modèle cinématique directe sont données donc :

$${}^0 T_4 = {}^0 T_1 {}^1 T_2 {}^2 T_3 \dots\dots\dots (3.31)$$

$${}^0 T_3 = \begin{bmatrix} S_x & N_x & A_x & P_x \\ S_y & N_y & A_y & P_y \\ S_z & N_z & A_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.32)$$

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} C_1 C_{23} & S_1 & C_1 S_{23} & l_2 C_1 C_2 \\ S_1 C_{23} & -C_1 & S_1 S_{23} & l_2 S_1 C_2 \\ S_{23} & 0 & -C_{23} & l_2 S_2 + l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.33)$$

Donc:

$$\begin{cases} S_x = C_1 C_{23} \\ S_y = S_1 C_{23} \\ S_z = S_{23} \end{cases}$$

$$\begin{cases} N_x = S_1 \\ N_y = -C_1 \\ N_z = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} A_x = C_1 S_{23} \\ A_y = S_1 C_{23} \\ A_z = -C_{23} \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_x = l_2 C_1 C_2 \\ P_y = l_2 S_1 C_2 \\ P_z = l_2 S_2 + l_1 \end{cases}$$

3- 8- 2- 2 : Calcule du modèle géométrique inverse (M.G.I) :

Le point ‘p’ est la position ou l’on fixe le poigné :

La position 0dp fournit 3 équations en fonction de 3 coordonnées articulaires $\theta_1, \theta_2, \theta_3$.

Dans le cas de robots à géométrie simple (pour la plus part des distances a_i et d_i sont nulles et les angles θ_i et a_i sont égaux à $0, \pm\pi/2$), le modèle géométrique inverse(MGI) peut être obtenu analytiquement via la méthode de Paul.

Équations de position :

$${}^0dp = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_3 \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.34)$$

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_3 S_{23} C_1 + l_2 C_1 C_2 \\ l_3 S_{23} S_1 + l_2 S_1 C_2 \\ l_1 - l_3 C_{23} + l_2 S_2 \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.35)$$

- Pré-multiplication par la matrice T_{10} , on obtient :

$$T_{10} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ 1 \end{bmatrix} = {}^1T_2 {}^2T_3 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.36)$$

Il en résulte les équations suivantes :

$$\begin{cases} C_1 d_x + S_1 d_y = l_3 S_{23} + l_2 C_2 \\ l_1 - d_z = -l_3 C_{23} + l_2 S_2 \\ d_x S_1 - d_y C_1 = 0 \end{cases} \dots\dots\dots (3.37)$$

La deuxième équation permet de déduire la valeur de θ_1 , en effet, on a :

$$d_x S_1 - d_y C_1 = 0 \quad \dots\dots\dots (3.38)$$

$$\theta_1 = \text{atan2}(d_x, d_y) \quad \dots\dots\dots (3.39)$$

$$\begin{cases} l_2 C_{23} = C_1 d_x + S_1 d_y - l_2 C_2 \\ l_2 C_{23} = l_2 S_2 - d_z \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3.40)$$

$$l_3^2 = (C_1 d_x + S_1 d_y - l_2 C_2)^2 + (l_2 S_2 - d_z - l_1)^2 \quad \dots\dots\dots (3.41)$$

On en déduit la valeur suivante du paramètre θ_2 :

$$\theta_3 = \arccos\left(\frac{l_1 - Z + l_2 \sin\theta_2}{l_3}\right) - \theta_2 \quad \dots\dots\dots (3.42)$$

$$\theta_2 = 2 \arctan \frac{-C_2 + \sqrt{C_2^2 - C_1 C_3}}{C_1} \quad \dots\dots\dots (3.43)$$

Avec :

$$C_1 = l_1^2 - 2l_1 Z + l_2^2 + \frac{2l_2 X}{\cos\theta_1} - l_3^2 + \frac{X^2}{\cos^2\theta_1} + Z^2 \quad \dots\dots\dots (3.44)$$

$$C_2 = 2l_1 l_2 - 2l_2 Z \quad \dots\dots\dots (3.45)$$

$$C_3 = l_1^2 - 2l_1 Z + l_2^2 - \frac{2l_2 X}{\cos\theta_1} - l_3^2 + \frac{X^2}{\cos^2\theta_1} + Z^2 \quad \dots\dots\dots (3.46)$$

Application :

Prenant les longueurs des bras de notre robot les suivantes :

$$l_1 = 0.5\text{m} \quad l_2 = 1\text{m} \quad l_3 = 1\text{m}$$

On pose un déplacement de point P_1 au point P_2 détecté par la sonde tel que :

$$P1 = \begin{pmatrix} 2.5 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix}$$

$$P2 = \begin{pmatrix} -2 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

Le déplacement se fait dans un espace de temps de 10s.

On peut déterminer la fonction polynomiale de X, Y, Z à l'aide d'une interpolation polynomiale :

le mouvement entier q_i et q_f

$$q(t) = q_i + r(t)\Delta \quad \text{Pour } 0 \leq t \leq t_f \quad \text{Avec } \Delta = (q_f - q_i)$$

Interpolation polynomiale de degré cinq

$$q(t) = x_i + (10 \left(\frac{t}{t_f}\right)^3 - 15 \left(\frac{t}{t_f}\right)^4 + 6 \left(\frac{t}{t_f}\right)^5) \dots\dots\dots(3.47)$$

$$X(t) = x_i + (10 \left(\frac{t}{t_f}\right)^3 - 15 \left(\frac{t}{t_f}\right)^4 + 6 \left(\frac{t}{t_f}\right)^5) (x_f - x_i) \dots\dots\dots(3.48)$$

$$Y(t) = y_i + (10 \left(\frac{t}{t_f}\right)^3 - 15 \left(\frac{t}{t_f}\right)^4 + 6 \left(\frac{t}{t_f}\right)^5) (y_f - y_i) \dots\dots\dots(3.49)$$

$$Z(t) = z_i + (10 \left(\frac{t}{t_f}\right)^3 - 15 \left(\frac{t}{t_f}\right)^4 + 6 \left(\frac{t}{t_f}\right)^5) (z_f - z_i) \dots\dots\dots(3.50)$$

$$X(t) = 2.5 - 0.045t^3 + 0.00675t^4 - 0.00027t^5 \dots\dots\dots(3.51)$$

$$dX(t) = -0.135t^2 + 0.027t^3 - 0.00135t^4 \dots\dots\dots(3.52)$$

$$ddX(t) = -0.27t + 0.081t^2 - 0.0054t^3 \dots\dots\dots(3.53)$$

$$Y = Y_{p_1} + \frac{Y_{p_2} - Y_{p_1}}{X_{p_2} - X_{p_1}} (X - X_{p_1}) \dots\dots\dots(3.54)$$

$$Y(t) = 0.02t^3 + 0.003t^4 - 0.00012t^5 \dots\dots\dots(3.55)$$

$$dY(t) = 0.06t^2 + 0.012t^3 - 0.0006t^4 \dots\dots\dots(3.56)$$

$$ddY(t) = 0.12t + 0.036t^2 - 0.0024t^3 \dots\dots\dots(3.57)$$

$$Z = Z_{p_1} + \frac{Z_{p_2} - Z_{p_1}}{X_{p_2} - X_{p_1}} (X - X_{p_1}) \dots\dots\dots(3.58)$$

$$Z(t) = 2 + 0.001t^3 + 0.0015t^4 - 0.00006t^5 \dots\dots\dots(3.59)$$

$$dZ(t) = 0.003t^2 + 0.006t^3 - 0.0003t^4 \dots\dots\dots(3.60)$$

$$ddZ(t) = 0.006t + 0.018t^2 - 0.0012t^3 \dots\dots\dots (3.61)$$

3-9: Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques définitions et notions sur les robots manipulateurs. Puis nous avons vu la modélisation des robots manipulateurs, modèle géométrique et cinématique. Pour modéliser un système, c'est-à-dire gouverner ses sorties, il faut prévoir le comportement du système, en réponse aux différentes excitations d'entrer qui pourront lui être appliquées; la démarche est de représenter le comportement du système sous la forme d'un modèle, une telle démarche s'appelle **la modélisation**; d'une manière générale, on recherche toujours le modèle le plus simple qui permet d'expliquer, de manière satisfaisante, le comportement du processus dans son domaine d'application; 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), on distingue:

- les modèles géométriques qui expriment la situation de l'organe terminal en fonction de la configuration du mécanisme.
- les modèles cinématiques permettent de contrôler la vitesse de déplacement du robot afin de connaître la durée d'exécution d'une tâche.

CHAPITRE 4: SIMULATION NUMERIQUE DE ROBOT.

4- 1: Introduction : [25]

Pour effectuer une tâche dans l'espace opérationnel (figure 4.1), il est nécessaire d'effectuer une trajectoire à l'intérieur de l'espace de travail.

Du point de vue du manipulateur, ceci revient à définir l'évolution temporelle de la matrice de transformation homogène qui repère le poignet par rapport à la base du robot.

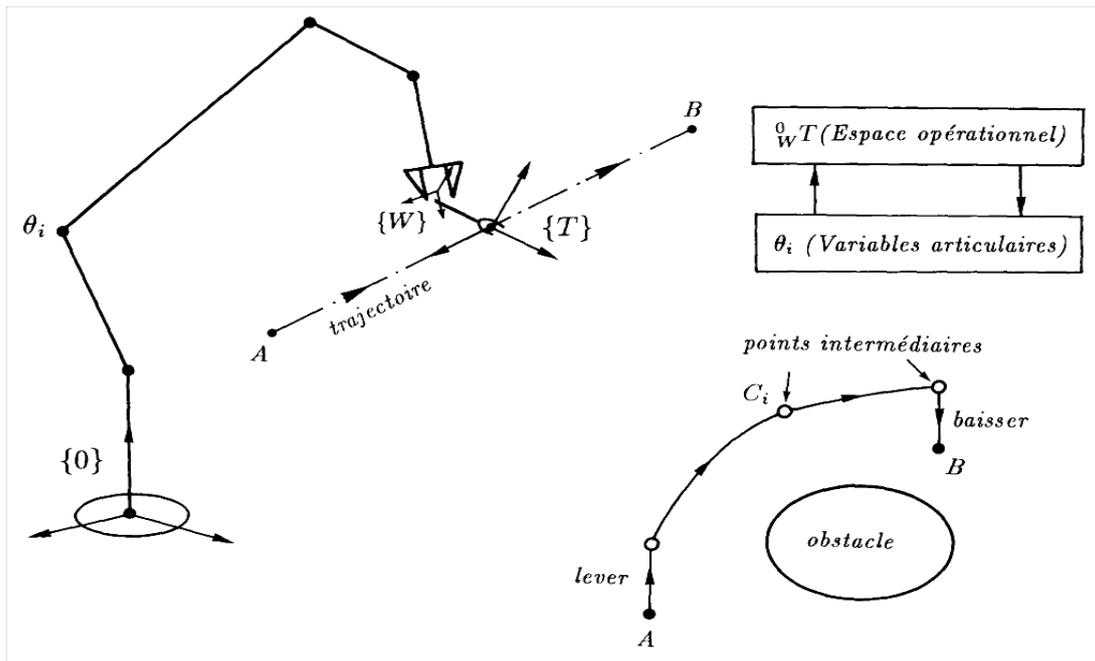


Figure 4- 1 : Génération de trajectoire.

Nous allons mettre en évidence plusieurs méthodes pour planifier une trajectoire.

4- 2: Génération en variables articulaires : [28 et 29]

Soit une trajectoire reliant les points extrêmes A et B en passant par les points C_i (figure 4.2). Une fois ces points convertis dans l'espace des variables d'articulations, il faut relier les valeurs de chaque variable articulaire par une fonction adéquate.

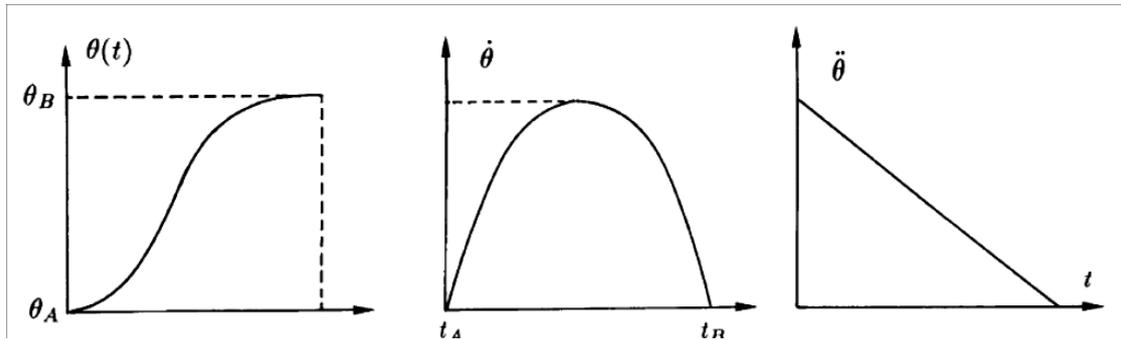
4- 3 : Trajectoire cubique : [25]

Figure 4- 2 : Trajectoire cubique. Variable articulaire, vitesse, accélération.

Commençons par le cas le plus simple d'une trajectoire définie seulement par ses Extrémités A et B.

Chacune des variables d'articulations est alors soumise à quatre contraintes : $\theta_A, \dot{\theta}_A, \theta_B, \dot{\theta}_B$. Les vitesses d'extrémités seront nulles si le manipulateur part et arrive au repos.

Le polynôme de degré minimum satisfaisant ces quatre contraintes est du troisième degré :

$$\begin{aligned}\theta(t) &= a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \\ \dot{\theta}(t) &= a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 \\ \ddot{\theta}(t) &= 2a_2 + 6a_3 t\end{aligned}$$

Les coefficients a_1, a_2, a_3 s'obtiennent immédiatement en identifiant $\theta, \dot{\theta}$ Aux valeurs imposées aux instants t_A et t_B .

4- 3- 1 : Spline cubique : [30]

Soit à présent une trajectoire qui, outre ses points d'extrémités où $\theta, \dot{\theta}$ sont imposés, est définie par des points intermédiaires par lesquels on souhaite passer en assurant la continuité de la vitesse et de l'accélération (figure 4.3). Cette forme d'interpolation porte le nom de Spline cubique

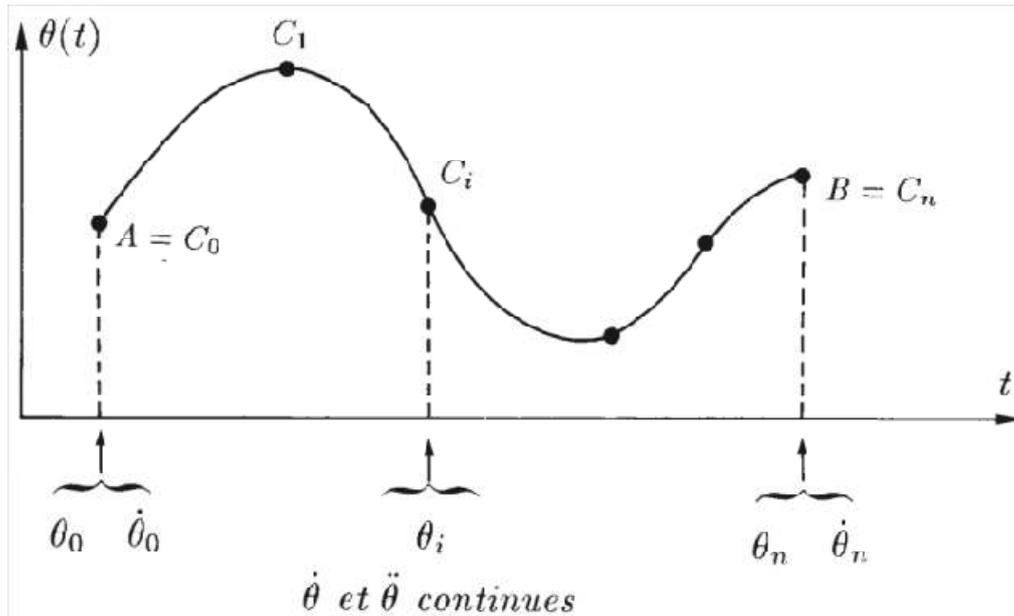


Figure 4- 3 : Interpolation par Spline cubique.

Si la vitesse était connue aux points intermédiaires, l'équation de la spline cubique dans l'intervalle $[t_{k-1}, t_k]$ s'écrirait :

$$\theta(t) = \dot{\theta}_{k-1} \frac{(t_k - t)^2(t - t_{k-1})}{h_k^2} - \dot{\theta}_k \frac{(t - t_{k-1})^2(t_k - t)}{h_k^2} \\ + \theta_{k-1} \frac{(t_k - t)^2[2(t - t_{k-1}) + h_k]}{h_k^3} + \theta_k \frac{(t - t_{k-1})^2[2(t_k - t) + h_k]}{h_k^3}$$

Avec :

$$h_k = t_k - t_{k-1}.$$

4 -3-2 : Interpolation linéaire avec transition parabolique : [26 et 27]

Cette interpolation linéaire, complétée de transitions paraboliques, nécessaires pour respecter la continuité de la vitesse aux points intermédiaires.

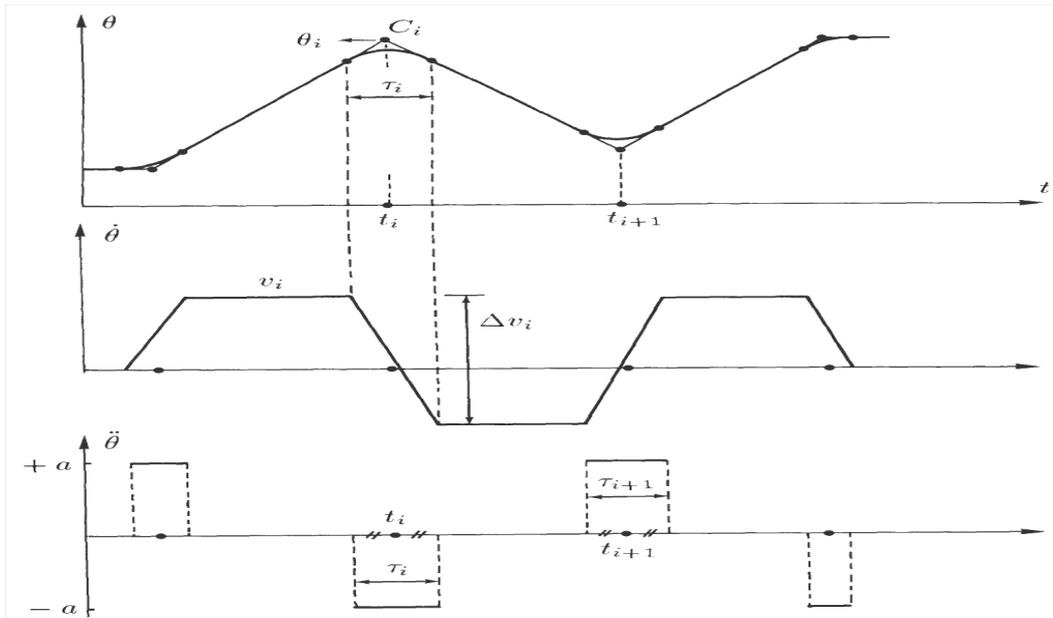


Figure 4- 4 :Interpolation linéaire avec transition parabolique

Se référant à la figure 4.4, les données du problème sont les points intermédiaires (θ_i, t_i) . La trajectoire est obtenue en calculant tout d'abord les vitesses uniformes des différents tronçons, qui sont fournies par :

$$v_i = \frac{\theta_i - \theta_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$$

La transition parabolique aux extrémités est assurée en ajoutant deux points intermédiaires, comme indiqué sur la figure 4.4. On remarquera que la trajectoire générée passe à proximité des points intermédiaires mais n'y passe pas exactement.

Ceci peut suffire dans de nombreux cas. Si toutefois on veut imposer un point de passage obligé, il suffit de générer deux points intermédiaires fictifs comme indiqué sur la figure 4.5

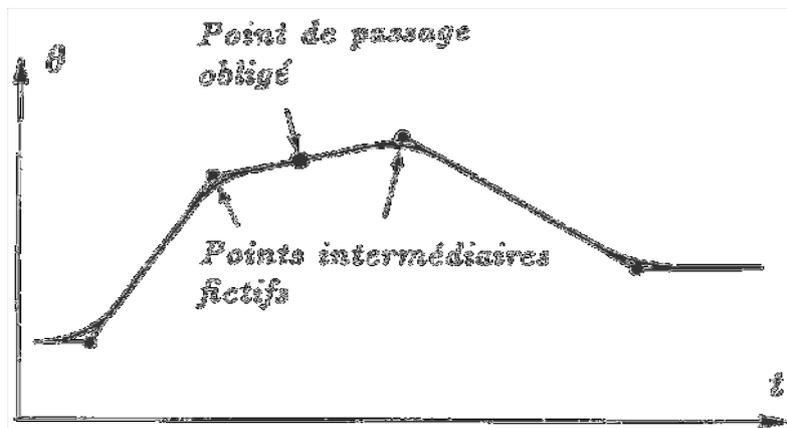


Figure 4- 5 : Point de passage obligé.

4-3-3 Génération dans l'espace cartésien : [30 et 31]

En spécifiant la trajectoire dans l'espace des coordonnées articulaires, on peut contrôler la trajectoire de l'organe d'extrémité entre les points où la trajectoire est imposée

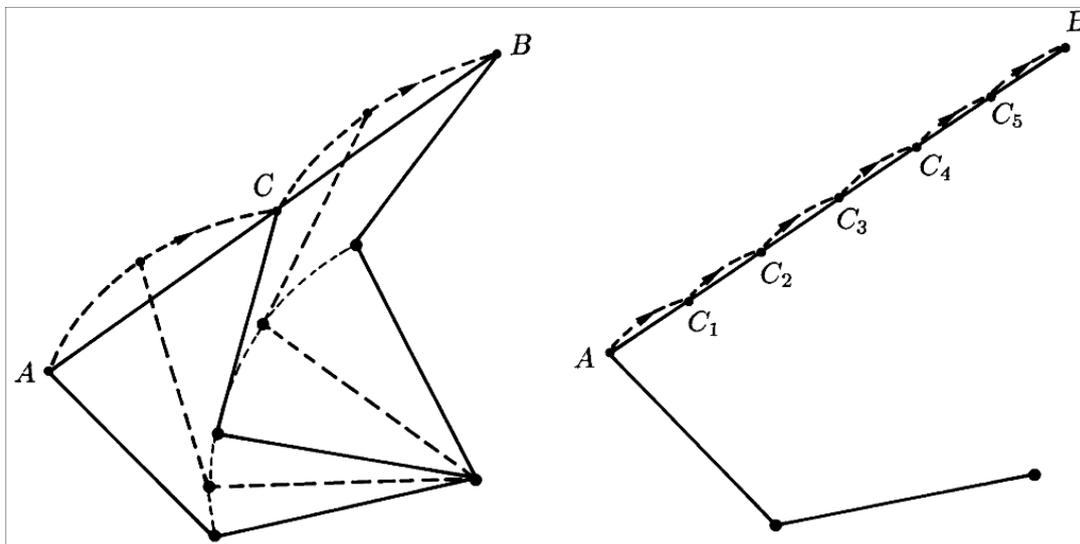


Figure 4- 6 :Trajectoire rectiligne générée dans l'espace des coordonnées

Articulaires ; (a) 1 point intermédiaire ; (b) 5 points intermédiaires.

(Ces points ont été obtenus par transformation cinématique inverse). La forme réelle de la trajectoire est fixée par la cinématique du manipulateur.

Ceci est illustré à la figure 4.6 pour le manipulateur plan à 2 d.d.l. La première situation représentée est celle où la trajectoire rectiligne est définie à l'aide d'un seul point intermédiaire. L'écart par rapport à la ligne droite est considérable. La situation peut être améliorée en utilisant davantage de points intermédiaires, comme à la figure 4.6.b.

4- 4 : Méthodes de planification de mouvement : [32, 33]

Il existe deux principales catégories de méthodes pour la planification de mouvement :

- La première est composée de méthodes dites déterministes, appelées ainsi car elles permettent de retrouver le même chemin à chaque exécution, sous réserve d'avoir des conditions initiales équivalentes. Les méthodes déterministes sont dites complètes en résolution car elles garantissent de trouver une solution, ou d'indiquer s'il n'y a pas de solution.

La seconde catégorie est composée des méthodes probabilistes. Ces méthodes ne sont pas complètes en résolution, mais elles garantissent de trouver une solution s'il en existe une. On

dit qu'elles sont complètes en probabilité. Ces méthodes ne trouveront pas forcément le même chemin à chaque exécution, même avec des conditions initiales similaires.

Objectif :

La planification de mouvement est un domaine de recherche très actif qui a déjà un certain nombre d'applications :

- dans la robotique, le calcul de trajectoires permettant à un robot de se déplacer d'un point à un autre,
- dans la robotique humanoïde, le calcul des mouvements de marche et de manipulation intégrant contraintes cinématiques et dynamiques.

Traditionnellement, le rôle d'un planificateur de trajectoire consiste à augmenter l'autonomie du robot pour lui permettre de se mouvoir automatiquement d'une position initiale vers une position finale en évitant les collisions avec les obstacles qui l'entourent dans l'environnement où il opère.

4- 5 : Application :

Le premier robot du type RR :

On utilisant les équations :

$$X = 0.41122 - 0.0131826t^2 + 0.00087884t^3 \text{ (m)}$$

$$Y = -0.00022848 t^3 + 0.003427 t^2 + 0.26359 \text{ (m)}$$

$$\theta_1 = \operatorname{atan2} \frac{Y}{X} + \operatorname{atan2} \frac{l_2 \sin \theta_2}{l_1 + l_2 \cos \theta_2}$$

$$\theta_1 = \operatorname{atan2} \frac{Y}{X} - \operatorname{atan2} \frac{l_2 \sin \theta_2}{l_1 + l_2 \cos \theta_2}$$

$$\theta_2 = \mp 2 \operatorname{atan2} \sqrt{\frac{(l_1 + l_2)^2 - (X^2 + Y^2)}{(X^2 + Y^2) - (l_1 - l_2)^2}}$$

et après avoir calculé les valeurs de variables articulaires sur MATLAB, on obtient le tableau suivant :

Tableau 4- 1 : Variable articulaires et opérationnelles, du deuxième robot (le cas d'insertion de l'aiguille)

Temps (sec)	Configuration 1				Configuration 2			
	Tita1 (deg)	Tita2 (deg)	p_x (m)	p_y (m)	Tita1 (deg)	Tita2 (deg)	p_x (m)	p_y (m)
0	20.31	24.68	0.41	0.26	44.99	-24.68	0.41	0.26
1	17.47	32.59	0.39	0.26	50.07	-32.59	0.39	0.26
2	13.26	47.47	0.36	0.27	60.74	-47.47	0.36	0.27
3	11.20	62.27	0.31	0.28	73.48	-62.27	0.31	0.28
4	12.50	74.64	0.25	0.30	87.14	-74.64	0.25	0.30
5	17.49	83.32	0.19	0.32	100.81	-83.32	0.19	0.32
6	25.60	87.71	0.12	0.33	113.32	-87.71	0.12	0.33
7	35.25	88.09	0.06	0.35	123.34	-88.09	0.06	0.35
8	44.37	85.77	0.01	0.36	130.14	-85.77	0.01	0.36
9	51.01	82.83	-0.01	0.37	133.84	-82.83	-0.01	0.37
10	53.53	81.47	-0.02	0.37	135.00	-81.47	-0.02	0.37

Remarque :

Dans le cas de la géométrie inverse on est face à deux cas, deux solutions qui donnent le même déplacement de l'organe terminal. Donc pour chaque déplacement on a deux configurations (elbow up et elbow down). On va vérifier les résultats de MATLAB pour chaque configuration, avec le logiciel CATIA V5, par la suite on procède à une comparaison entre les deux postures : une comparaison graphique (entre les deux graphes tracés par le MATLAB) et l'autre est une comparaison géométrique à l'aide de CATIA V5.

On appelle coude bas (elbow down) par configuration 1 et coude haut (elbow up) par configuration 2 dans la suite de notre travail.

Configuration 1 : (Elbow down)

-Le logiciel MATLAB donne aussi les graphes suivants :

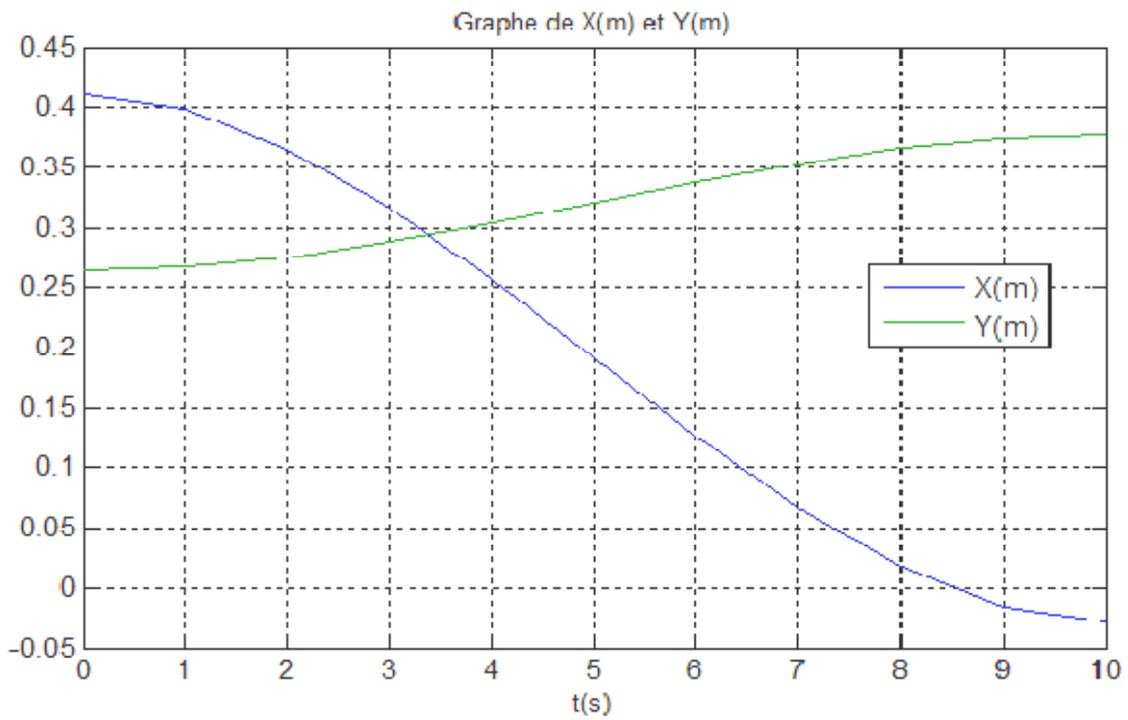


Figure 4- 7 : Déplacement suivant X et Y.

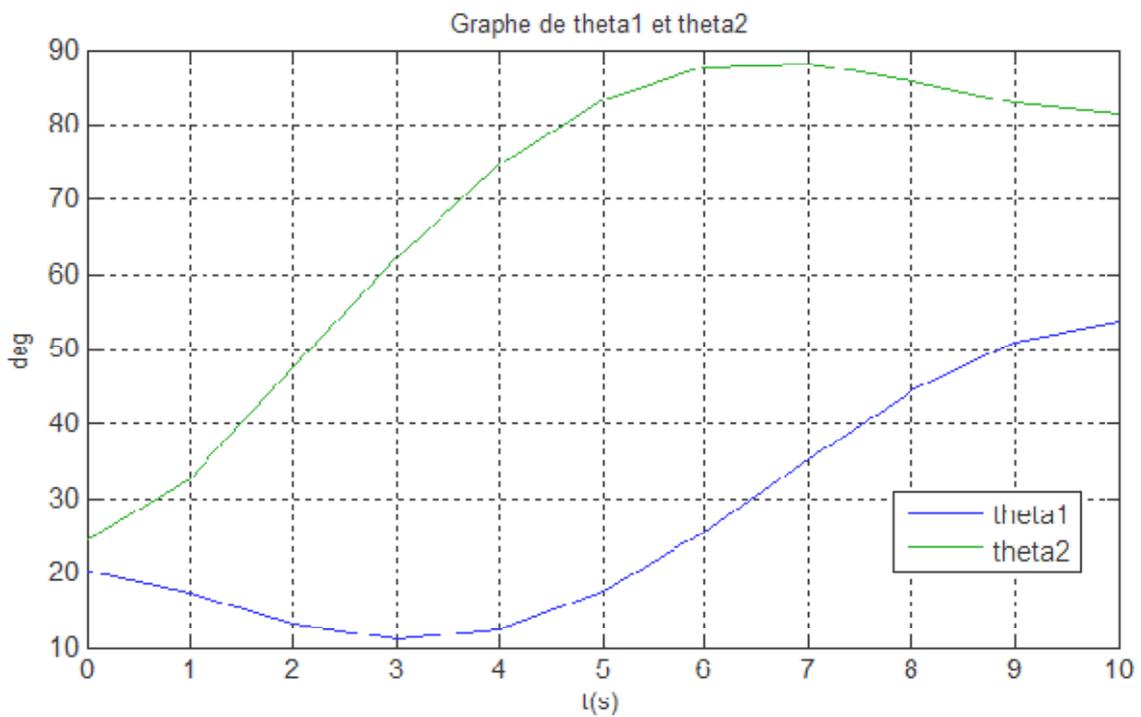
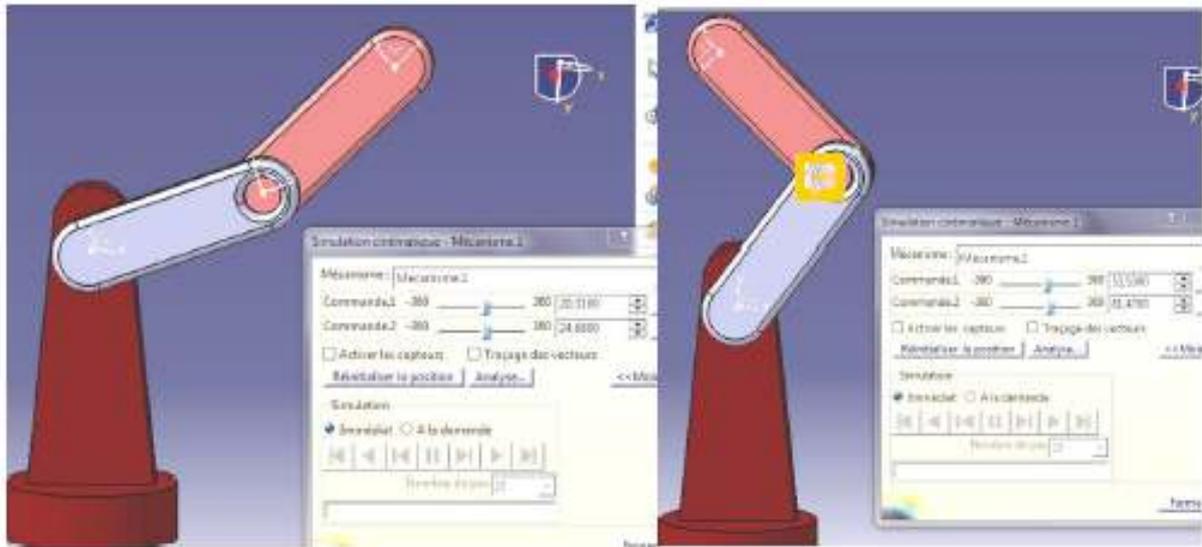


Figure 4- 8 : Variation des angles θ_1 et θ_2 .

Robot en première configuration sur CATIA V5 : (Elbow down)

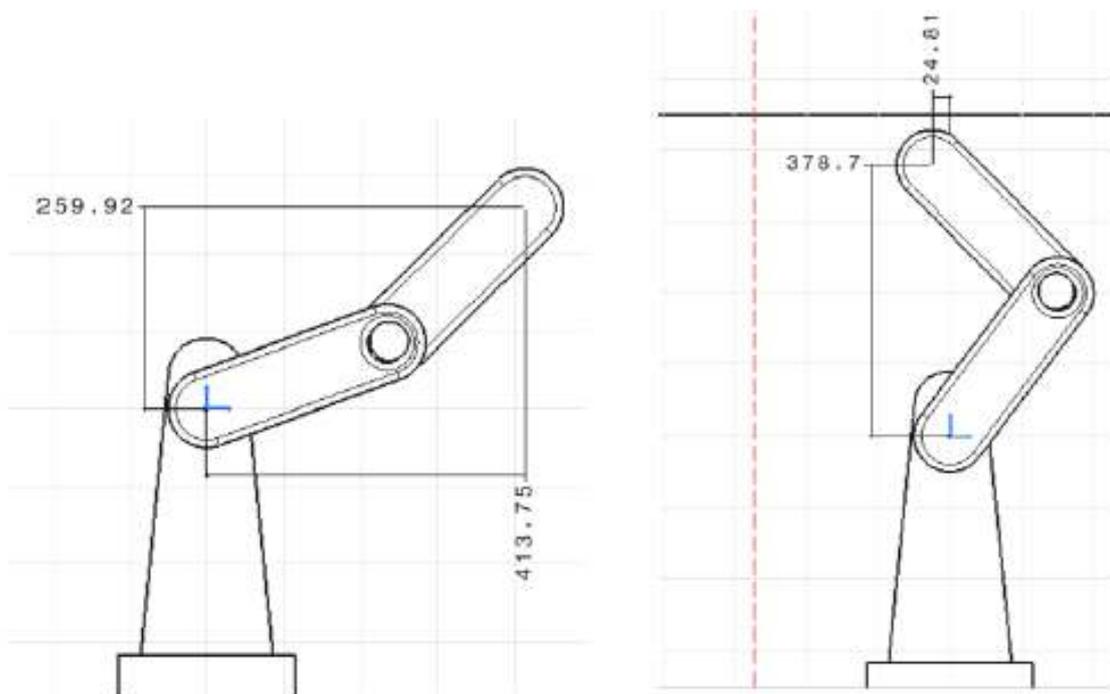


(a)

(b)

Figure 4- 9 : (a) Position initiale. (b) Position finale

Le déplacements en première configuration sur CATIA V5 (en mm) :



(a)

(b)

Figure 4- 10: (a) Vérification à $t= 0(s)$. (b) Vérification à $t= 10 (s)$.

La configuration 2 : (elbow up)

-Le logiciel MATLAB donne aussi les graphes suivants :

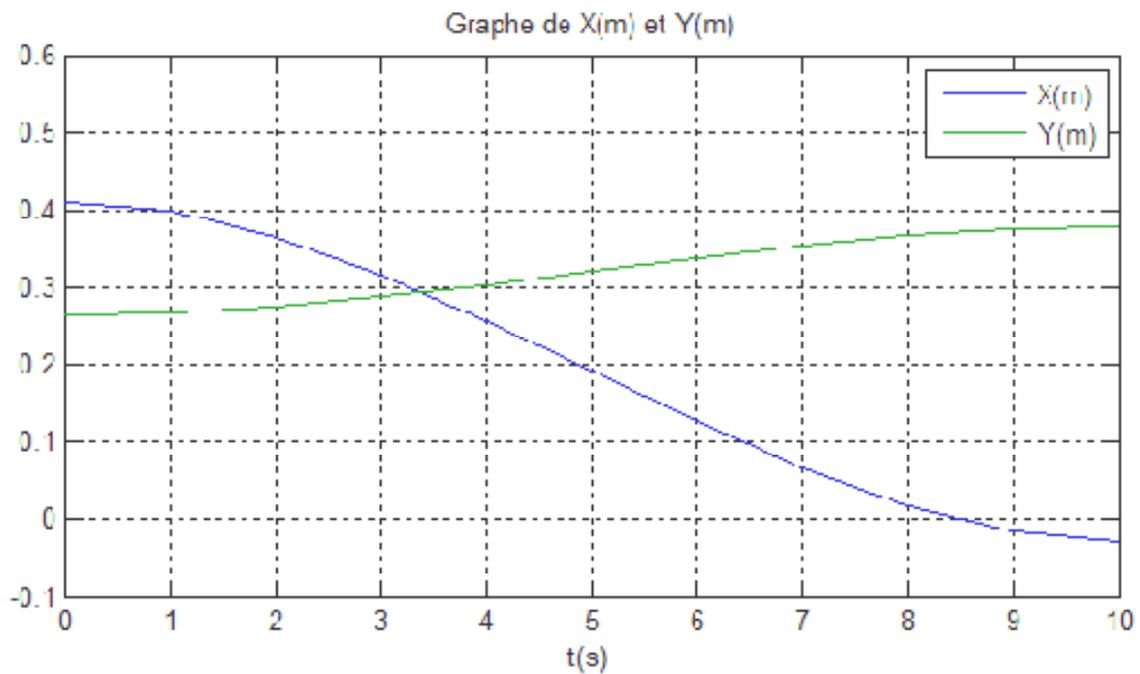


Figure 4- 11: Déplacement suivant X et Y.

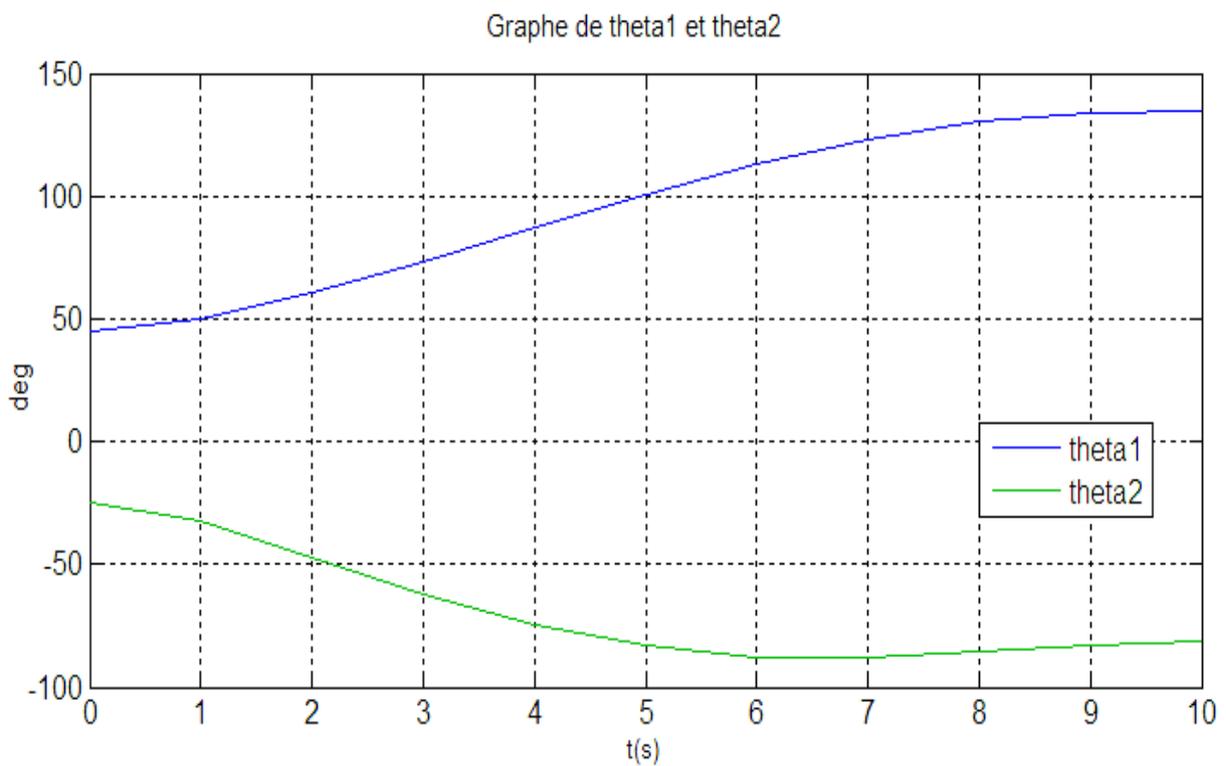


Figure 4. 12: Variation des angles θ_1 et θ_2 .

Robot en deuxième configuration sur CATIA V5 : (elbow up)

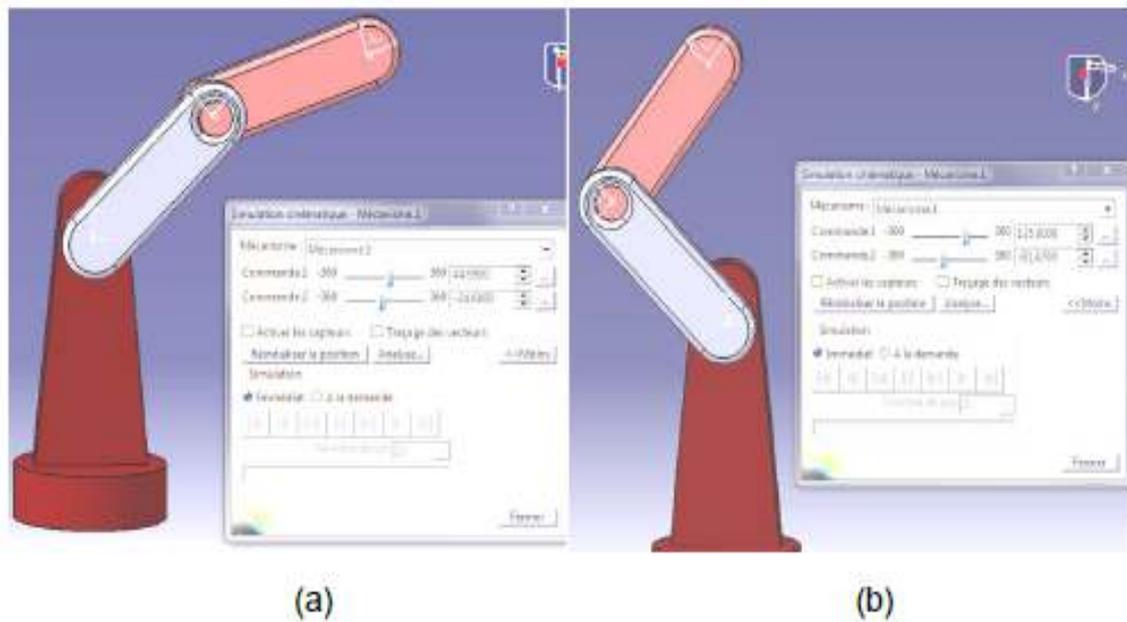


Figure 4- 13: (a) Position initiale (b) Position finale.

Le déplacements en deuxième configuration sur CATIA V5 (en mm) :

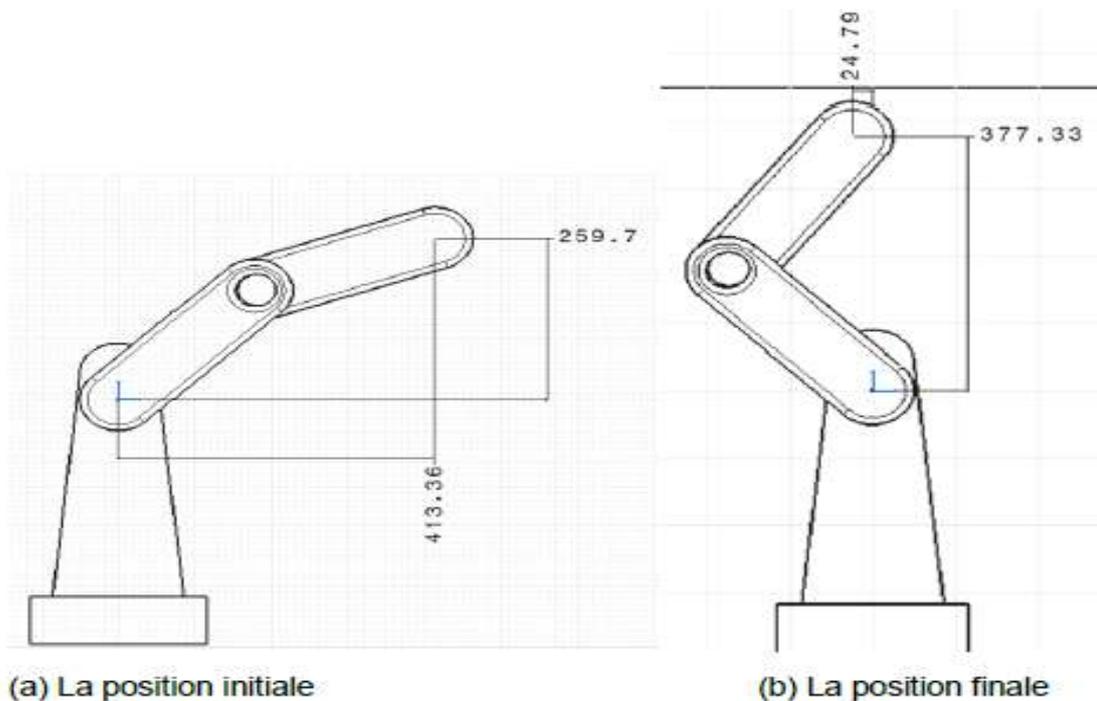
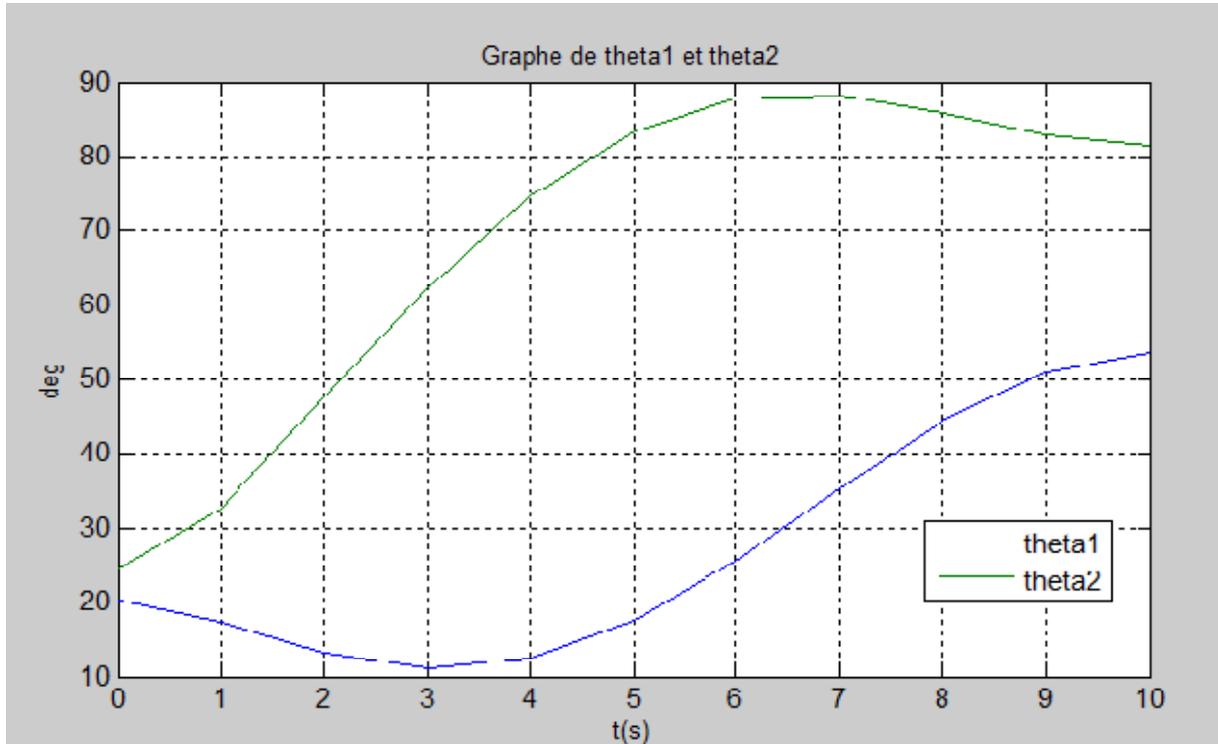


Figure 4- 14: Vérification de la configuration 2 à t=0(s) et à t=10(s).

Comparaison des variables articulaires entre les deux configurations :

Configuration 1.



Configuration 2

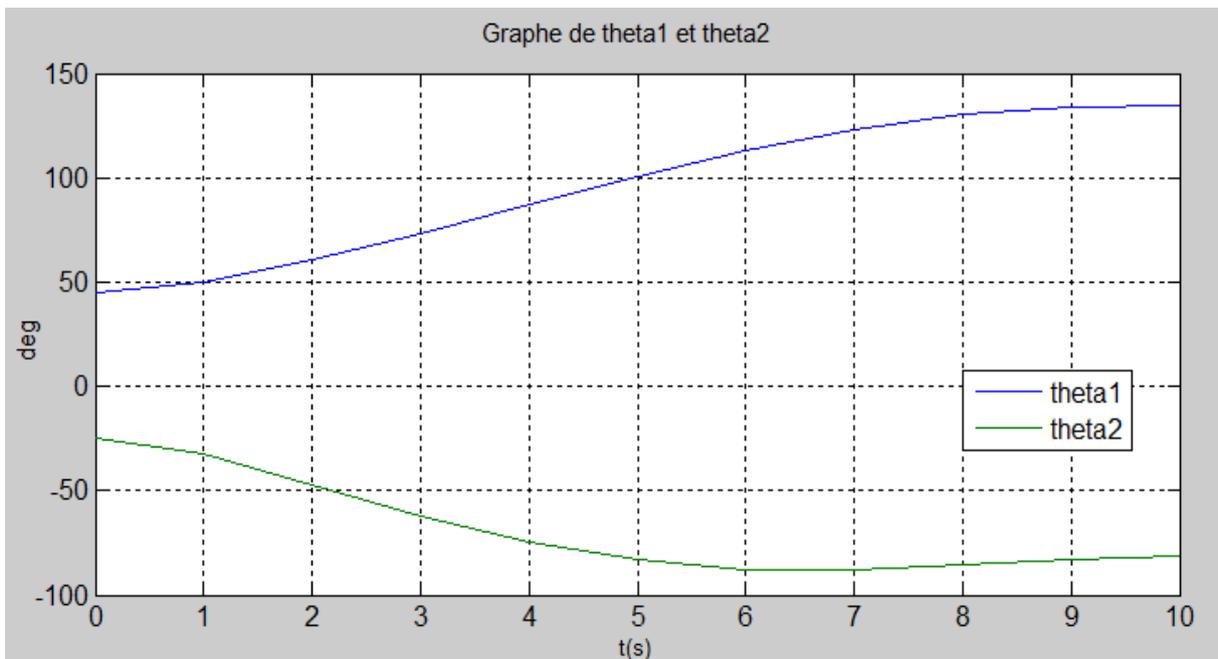


Figure 4- 14: Comparaison des angles θ_1 et θ_2 .

Entre les deux configurations :

On constate que les bras de robot ne pivotent pas de la même manière dans les deux configurations.

Calcul des vitesses (articulaires et opérationnelles) :

Par une dérivation des équations :

$$X = 0.41122 - 0.0131826t^2 + 0.00087884t^3 \text{ (m)}$$

$$Y = -0.00022848 t^3 + 0.003427 t^2 + 0.26359 \text{ (m)}$$

On trouve les équations suivantes :

$$\dot{x} = -0.0263652 t + 0.0263652 t^2$$

$$\dot{y} = 0.006854 t - 0.0068544 t^2$$

$$\begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{l_1 l_2 s_2} \begin{pmatrix} l_2 c_{12} & l_2 s_{12} \\ -l_1 c_1 - l_2 c_{12} & -l_1 s_1 - l_2 s_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix}$$

On a élaboré sur MATLAB un programme qui nous calcule les vitesses opérationnelles et articulaires, ainsi que les accélérations, on obtient les graphes suivants :

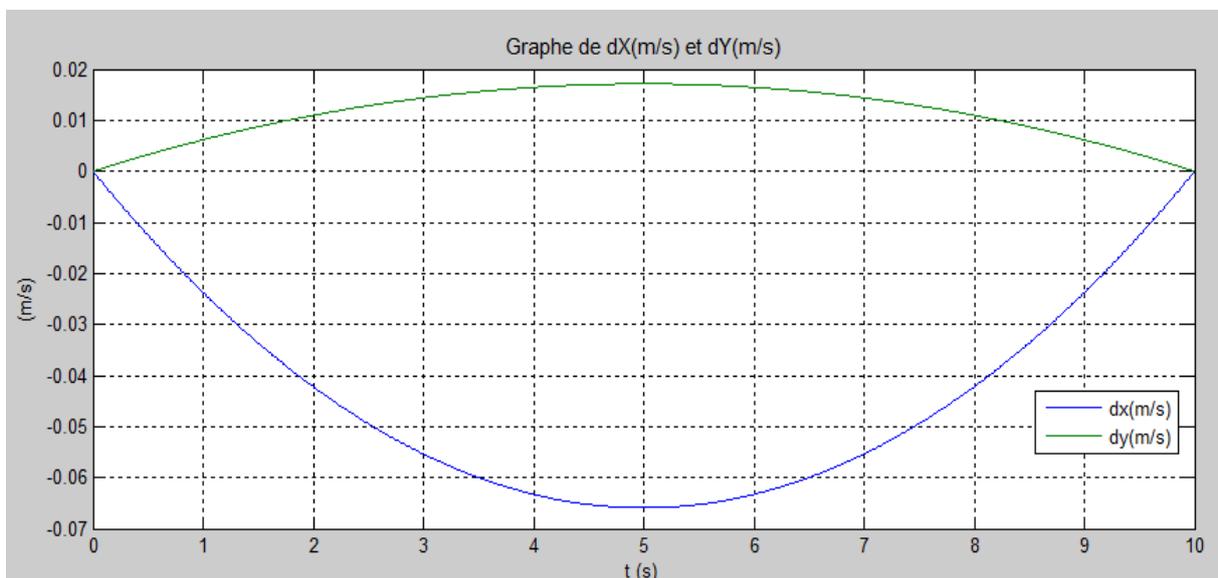


Figure 4- 15: Vitesse selon x et selon y.

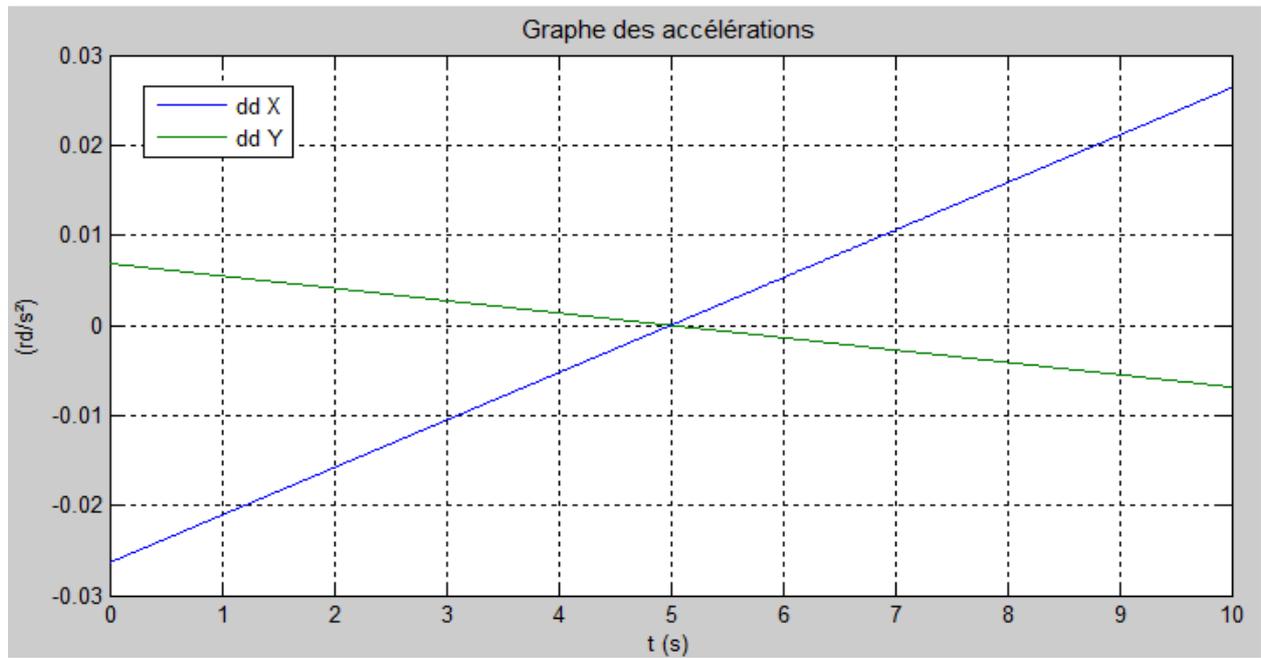
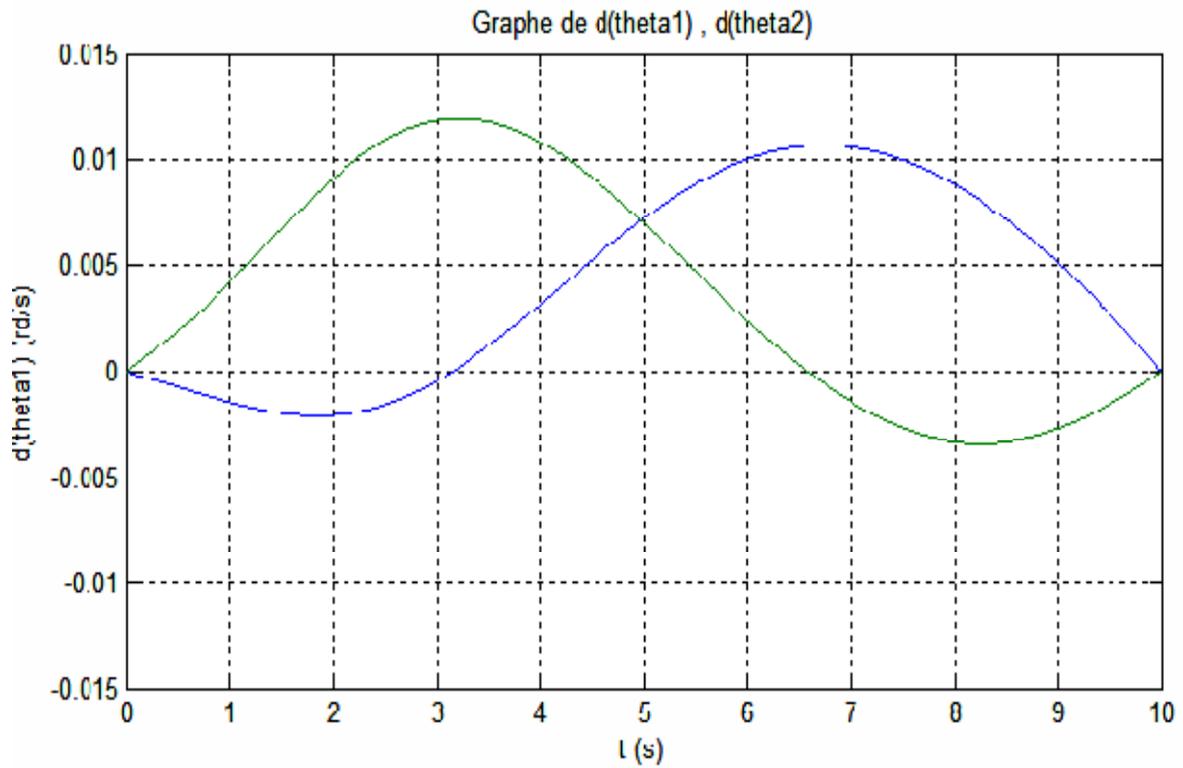
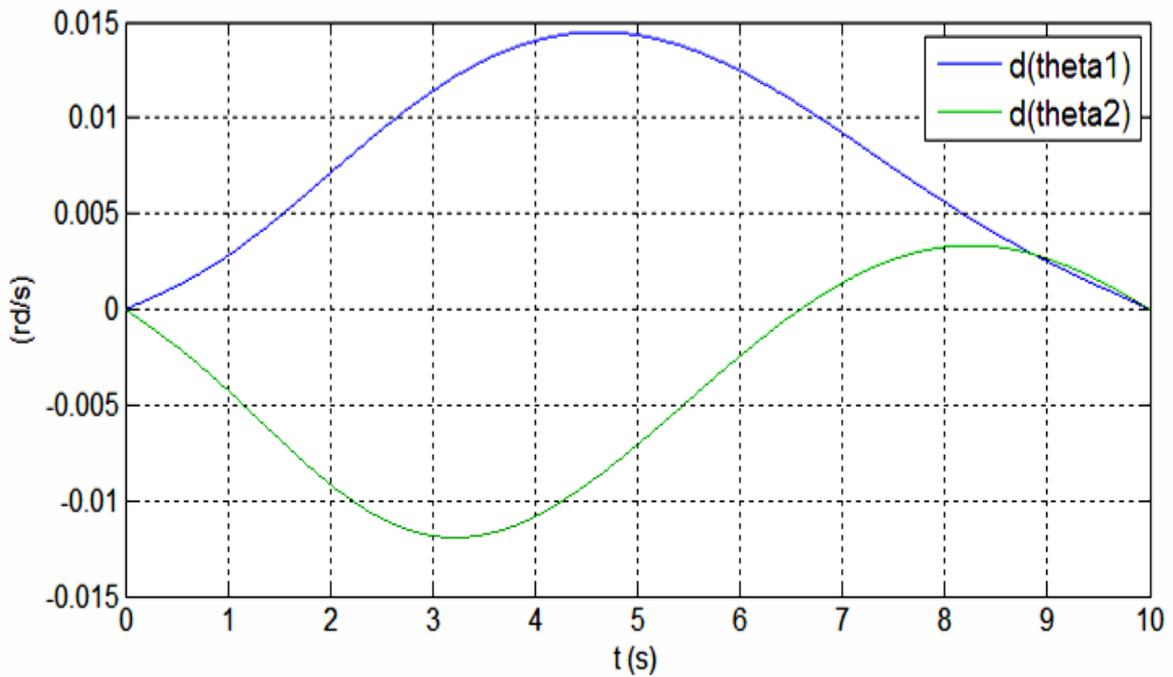


Figure 4- 16: Accélération selon x et selon y.



(a)



(b)

Figure 4- 17 : Vitesses articulaires (a) Elbow down (b) Elbow up.

On constate que la variation des vitesses articulaire entre les deux configurations n'est plus la même.

On peut donc choisir la configuration dont la vitesse plus ou moins adaptée au besoin.

Application de Deuxième robot du type RRR :

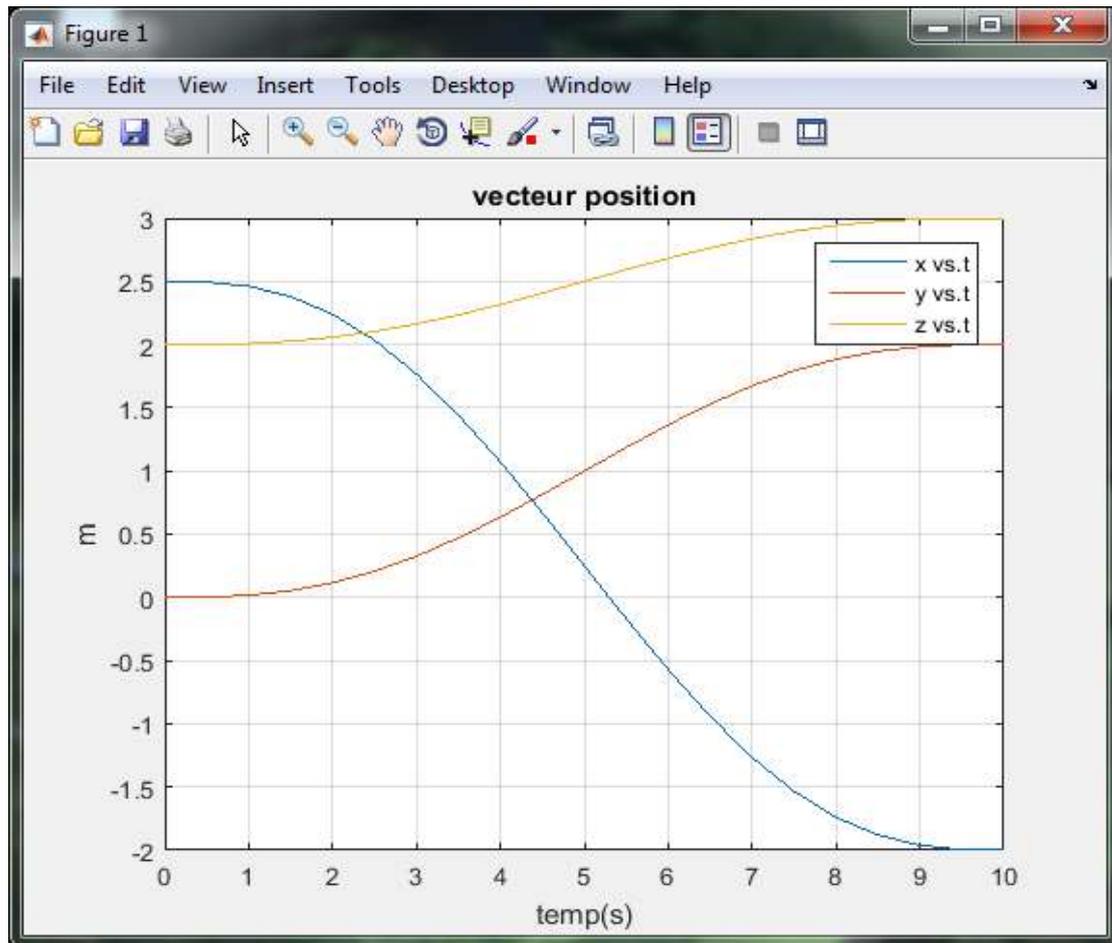


Figure 4- 18 : Variation du vecteur positions pour $0s \leq t \leq 2 s$ fait par Matlab:

$$x=0.7 -0.0375*t.^3 +0.0281*t.^4 -0.0056*t.^5 ;$$

$$y=-0.5000*t.^3 +0.3750*t.^4 -0.0750*t.^5 ;$$

$$z=0.11 -0.025*t.^3 +0.0188*t.^4 -0.0038*t.^5;$$

X vs t : [0 :1] : Stabilisation en 2,5.

[1 :10] : la courbe diminue de 2,4 jusqu'à -2.

Y vs t : [0 :1.2] : stabilisation en 0.

[1.2 :9] : augmentation jusqu'à 2.

[9 :10] : Stabilisation en 2.

Z vs t : [0 :1.8] : Stabilisation en 2.

[1.8 :8] une augmentation jusqu'à 3.

[8 :10] : Stabilisation en 3.

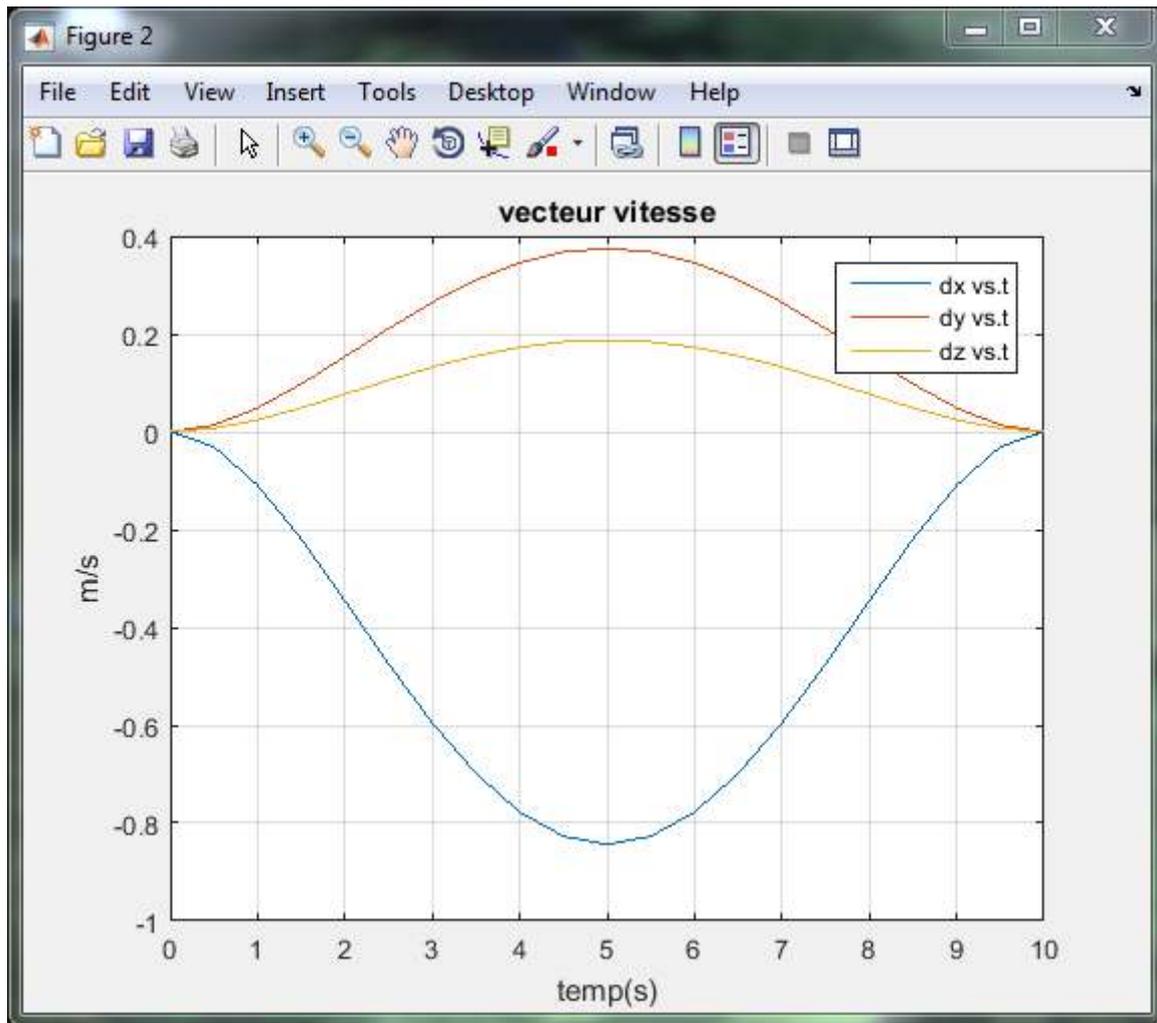


Figure 4- 19 : Variation du vecteur vitesse fait par Matlab.

$$dX = -0.1125*t.^2 + 0.1124*t.^3 - 0.028*t.^4;$$

$$dY = -1.50*t.^2 + 1.5*t.^3 - 0.375*t.^4;$$

$$Dz = 0.075*t.^2 - 0.0752*t.^3 + 0.019*t.^4;$$

X vs t : [0 :5] diminution de 0 jusqu'à 0.8.

[5 :10] une augmentation jusqu'à 0.

Y vs t : [0 :5] une augmentation de 0 jusqu'à 0.4.

[5 :10] diminution de 0.4 jusqu'à 0.

Z vs t : [0 :5] : augmentation de 0 jusqu'à 0.18.

[5 :10] diminution de 0.18 jusqu'à 0.

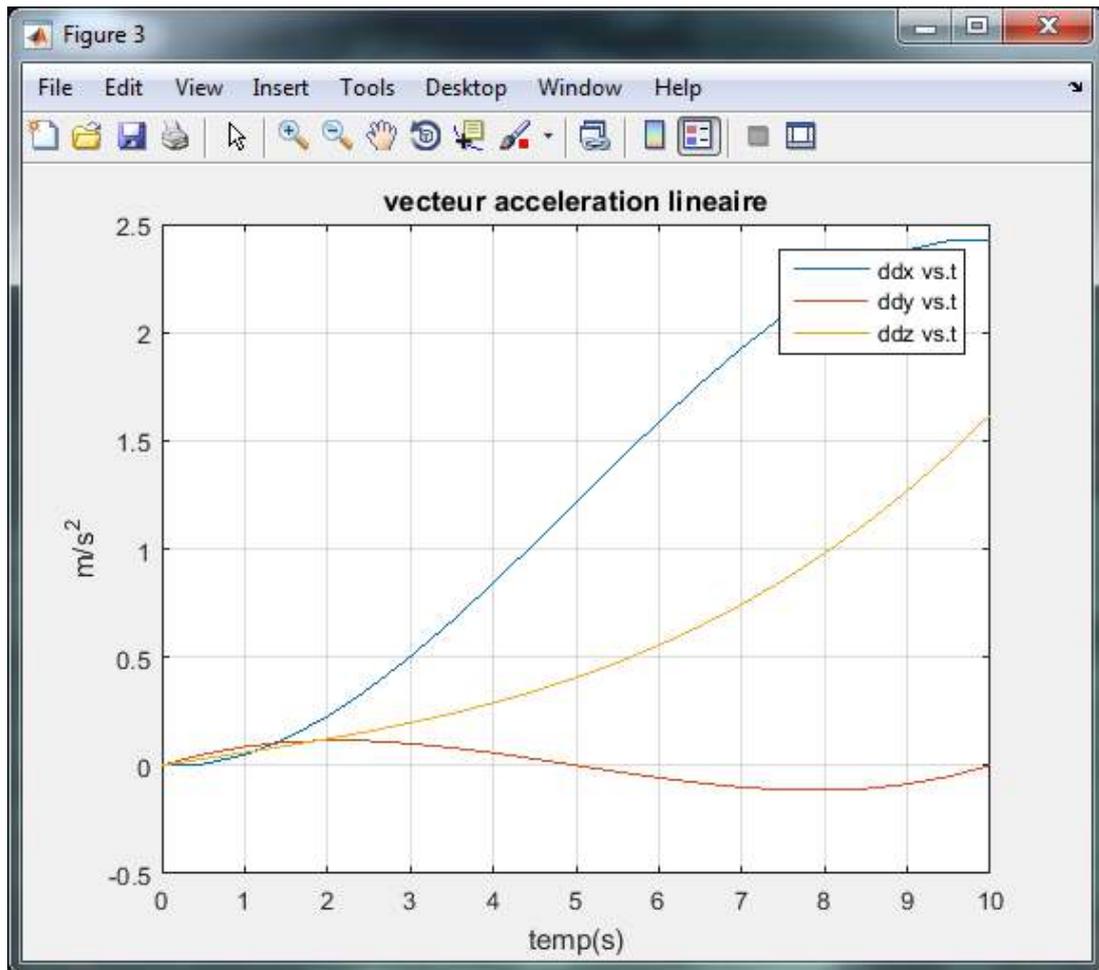


Figure 4- 19 : Variation des vecteurs accélérations linéaires pour $0 \leq t \leq 2$ fait par Matlab

$$ddx = -0.225*t + 0.3372*t.^2 - 0.112*t.^3;$$

$$ddy = -3*t + 4.5*t.^2 - 1.5*t.^3;$$

$$ddz = 0.15*t.^2 - 0.2256*t.^3 + 0.076*t.^4;$$

ddx vs t : [0 :10] augmentation de 0 jusqu'à 2.4.

ddy vs t : [0 :2] augmentation de 0 jusqu'à 0.2

[2 :8] diminution de 0.2 jusqu'à -0.1.

[8 :10] augmentation de -0.1 jusqu'à 0.

ddz vs t : [2 :8] augmentation de 0 jusqu'à 1.6.

4- 6: CONCLUSION :

Dans ce chapitre on a présenté d'une manière générale les sujets de trajectoires en robotique, après avoir abordé les différents aspects du problème de planification, et avoir classé les types de méthodes utilisées. On aborde le problème de suivi des trajectoires dans l'espace opérationnel et la génération de mouvements dans l'espace articulaire.

On a étudié les exemples d'un changement des longueurs de bras, et les deux configurations (Elbow up et Elbow down). Le bute des logiciels de conception est de donner une image quasi-réelle afin de trouver des solutions rapides pour un choix d'un mécanisme, par ailleurs on peut l'utiliser pour simuler les mouvements souhaités par le robot,.

INTRODUCTION GENERALE [1]

Les robots sont partout : dans les usines et dans les champs, au fond des mers et dans l'espace, dans les jardins et les salons. Ils ont une importance économique grandissante, et d'aucuns prédisent qu'ils seront au XXI^e siècle ce que la voiture fut au XX^e siècle. En outre, ils n'ont pas seulement pénétré le monde industriel, ils sont aussi entrain de pénétrer notre vie quotidienne et notre culture, et certains d'entre eux participent au renouvellement de la vision que nous avons de nous même. Cette révolution annoncée, dont l'impact sur la science, l'industrie et la société sera potentiellement très grand, va cependant de paire avec un certain nombre de grands défis à résoudre, tant technologiques que sociétaux. Il est ainsi fondamental que le grand public en soit informé, et participe à la réflexion sur les enjeux sociétaux qui sont impliqués. Ce besoin est d'autant plus aigu que la robotique est un domaine très diffus dont les progrès sont continus et progressifs, le plus souvent sans singularités où évolutions soudaines qui permettraient d'attirer l'attention de la société sur ce qui va néanmoins à long terme profondément la modifier. C'est pourquoi il est particulièrement pertinent qu'une institution comme la Cité des Sciences et de l'Industrie mette en place une exposition et/ou une série d'évènements sur cette question. Ces événements/exposition(s) pourraient par exemple se structurer autour de la notion de grands défis, tant technologiques que sociétaux, afin de faire prendre conscience au grand public quel est aujourd'hui l'état des technologies (par opposition à l'imaginaire que l'on peut s'en faire au travers du cinéma et de la littérature), dans quelle direction elles évoluent, et quels sont leurs impacts potentiels.

Les robots ont fait leur entrée à l'hôpital, et sont une aide de plus en plus importante pour notre santé. La diversité des robots médicaux l'atteste. Tout d'abord, les robots d'assistance chirurgicale sont quotidiennement utilisés dans nombre d'hôpitaux depuis une quinzaine d'années. Plus récemment, d'autres robots, beaucoup plus petits, ont commencé à pousser la porte des blocs opératoires: des chercheurs mettent au point des capsules endoscopiques robotisées et miniaturisées capable d'explorer conduits intestinaux, artères ou veines pour aider le chirurgien dans son diagnostic.

Notre mémoire commence par une introduction générale, il est subdivisé globalement quatre

Chapitre :

Le chapitre 1: Généralités sur les robots.

Etat de l'art sur les robots et leurs domaines d'application (industriel, médical....)

Le chapitre 2 : Modélisation du robot.

Les différents modèles cinématiques utilisés en robotique (bras manipulateur) ont été
Présentés dans ce chapitre, tels que : le modèle géométrique direct et inverse, le modèles
Cinématique direct. Ainsi que la modélisation en utilisant le système de paramétrage de
Denavit Hartenberg.

Le chapitre 3 : Problématique de cinématique inverse

L'accent a été mis, dans la deuxième partie du chapitre, sur l'étude de la cinématique inverse
Et les différentes méthodes utilisées en citant la méthode géométrique, algébrique et
Numérique. En suite une application sur un bras manipulateur à 3ddl : Modélisation et
Simulation en utilisant deux méthodes afin de calculer la cinématique inverse.

Le chapitre 4 :

On aborde le problème de la génération de mouvement, commençant par un état
De l'art sur la génération de trajectoire dans l'espace articulaire et opérationnelle.
On propose par la suite les méthodes utilisées pour résoudre ce problème, ainsi
Que les méthodes probabilistes et déterministes.

Application sur un bras manipulateur à 3ddl : Modélisation et simulation en utilisant Matlab
et SolidWorks, et il se termine par une conclusion générale.

Références

- [1] Pierre-Yves Oudeyer, Les grands défis de la robotique du 21^e siècle, science, technologie, et société, Février 2009.
- [2] Nathalie Palous, Brigitte Baroin, le développement industriel futur de la robotique personnelle et de service en France, Édition : Nicole Merle-Lamoot, Gilles Pannetier, 12 avril 2012
- [3] Dr. Belloufi Abderrahim, cours de robotique, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE, 2015.
- [4] Mlle. KHELOUFI Hadjer, "Assemblage des tôles par rivets par un robot à effecteur", thèse de master 2, Département de mécanique, UINVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA 1, 2016 / 2017.
- [5] Laëtitia Matignon, Introduction a la robotique, Licence 1ere année, Université'e de Caen, France 2011/2012.
- [6] E. Pernette, "robot de haute précision à 6 degrés-de-liberté pour l'assemblage des microsystemes". Thèse Doctorat, EPFL (N°1909), 1998.
- [7] Christophe DROUIN, " Contribution à une conception appropriée de robots médicaux : vers une démarche mécatronique", thèse de doctorat, ÉCOLE DOCTORALE MATHÉMATIQUES, INFORMATIQUE, PHYSIQUE THEORIQUE ET INGENIERIE DES SYSTEMES, UNIVERSITÉ D'ORLÉANS, 18 Décembre 2013.
- [8] Jean-Pierre Marec, Académie des technologies, Réflexions sur la robotique militaire, juillet 2013.
- [9] Vincent Padois, Robotique industrielle : évolution et enjeux, Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (UMR CNRS 7222), Université Pierre et Marie Curie, 25 novembre 2014.
- [10] M.Erkan KÜTÜK, M. Taylan DAŞ, L.Canan DÜLGER1, "Forward and Inverse Kinematics Analysis of Denso Robot", *Proceedings of the International Symposium of Mechanism and Machine Science*, 2017.
- [11] X. BAGUENARD « Propagation de contraintes sur les intervalles Application à l'étalonnage des robots ».Thèse de doctorat, UNIVERSITE D'ANGERS, 2005.

- [12] Ph. Coiffet « La robotique principe et application » Editeur: Hermes Sciences Publication - Date de parution: 21 Janvier 1992.
- [13] B. Gorla et M. Renaud, « Modèle des robots manipulateurs, application à leur commande ». Cepadues Editions, Toulouse, 1984 .
- [14] O. AL ASSAD « Etude d'une méthodologie de modélisation et de commande d'un robot multiaxe pour une application en radiologie médicale » Thèse de doctorat, Ecole Doctorale ; Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes /2009.
- [15] Mahmoud Gouasmi, Mohammed Ouali , Brahim Fernini and M'hamed Meghatria « Kinematic Modeling and Simulation of a 2-R Robot by Using Solid Works and Verification by MATLAB/Simulink » International Journal of Advanced Robotic Systems, 26 May 2012.
- [16] S. MEGAHED « Définition des modèles géométrique, différentiel et dynamique directs et inverses des robots manipulateurs ayant une structure de chaîne cinématique simple- Application au robot manipulateur » TH 8 de la R.N.U.R...Toulouse, Décembre 1983.
- [17] M .Renaud « Contribution à la modélisation et à la commande dynamique des robots manipulateurs » Thèse de Doctorat d'Etat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 15 septembre 1980.
- [18] Y. BAAZI, « Etude d'un Manipulateur à 3 Degrés de Liberté Application à la Fonction de Préhenseur » thèse de magister, Institut d'électronique, Université de Batna, 2000.
- [19] Wisama Khalil « Modélisation identification et commande des robots » 2ème édition revue et augmentée,1999.
- [20] L. FLÜCKIGER « Interface pour le pilotage et l'analyse des robots basée sur un générateur de cinématiques » Thèse de doctorat des sciences. Lausanne, EPFL N° 1897 (1998).
- [21] J. Hubert « La chirurgie robotique en urologie » Progrès en urologie (2009).
- [22] FERNINI Brahim, La modelisation cinématique et dynamique du robot SCARA en utilisant SOLIDWORKS et verification par MATLAB/SIMULINK, Faculté de science de l'ingenieur,université de Blida , Algerie., Septembre 2011.

[23] Lounis Adouane, « TP Modélisation et Commande des Robots », Bibliothèque Numérique Ingénierie & Technologie / Robotique (Polytech' Clermont-Ferrand), 2010.

[24] Coralie Germain, « Conception d'un Robot Parallèle a Deux Degrés de Liberté pour des Opérations de Prise et de Dépose ». Automatique / Robotique. Ecole Centrale de Nantes, Français, 2013.

[25] Ashish Singla et Amanpreet Singh « Kinematic Modeling of Robotic Manipulators » Article in Proceedings of the National Academy of Sciences, India - Section A · August 2016.

[26] C.laugier ‘raisonnement géométrique et méthode de décision en robotique application a la programmation automatique des robots.

[27] T.lozano-Pérez An approach to automatic robot programming

[28] M.M. HATTALI ; « Logiciel de calcul de robots industriels application au robot de soudage ALG.SOUD.1 » Mémoire de Magister, Département de Mécanique, Université de Saad Dahlab de Blida, 2001.

[29] FERNINI Brahim "SYNTHESE, ANALYSE ET MODELISATION DES ROBOTS MANIPULATEURS", thèse de magister, Département de Génie Mécanique, UNIVERSITE DE SAAD DAHLAB DE BLIDA, Mai 2012.

[30] Reza N Jazar, » théorie de la robotique appliquée » (Cinématique, dynamique et contrôle) deuxième édition springer (planification patrh) ISBN 978-1-4419-1749-2 e-ISBN 978-1-4419-1750-8 DOI 10.1007 / 978-1-4419-1750-8Springer New York, Dordrecht Heidelberg London Springer science + Business Media, LLC, 2010.

[31] SSerdar Kucuk et Zafer Bingul, « Cinématique Robot: Forward et Cinématique inverse, Robotique industrielle: Théorie, modélisation et contrôle », Sam Cubero (Ed.), ISBN: 3-86611-285-8, 2006.

[32] P. Corke, « Robotique, Vision et contrôle », vol. 73. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.

ANNEXES

*****la matrice de transformation homogène*****

```
syms l1 l2 l3 c1 s1 c2 s2 c3 s3 c12 s12 c23 s23
syms t1 t2 t3
syms Sx Nx Ax Px Sy Ny Ay Py Sz Nz Az Pz
c1=cos(t1);
s1=sin(t1);
c2=cos(t2);
s2=sin(t2);
c3=cos(t3);
s3=sin(t3);
c12=cos(t1+t2);
s12=sin(t1+t2);
c23=(t2+t3);
s23=sin(t2+t3);
A1=[c1 0 s1 0;s1 0 -c1 0;0 1 0 1;0 0 0 1];
A2=[c2 -s2 0 l2*c2;s2 c2 0 l2*s2;0 0 1 0;0 0 0 1];
A22=inv(A2);
A3=[c3 0 s2 0;s3 0 -c3 0;0 0 1 0;0 0 0 1];
A33=inv(A3);
A23=A2*A3;
A=A1*A2*A3;
z=simplify(A);
M0=A1*A;
simplify(M0)
S=[Sx Nx Ax Px;Sy Ny Ay Py;Sz Nz Az Pz;0 0 0 1];
M1=A1*S;
O=simplify(M1);
```

```

%*****courbes des (vitesse,accélération et déplacement
angulaire
%***** polynome de de degrée trois*****

```

```
t=0:0.5:10;
```

```

x=2.5 -0.045*t.^3 +0.00675*t.^4 -0.00027*t.^5 ;
y=0.02*t.^3 -0.003*t.^4 +0.00012*t.^5 ;
z=2 +0.01*t.^3 -0.0015*t.^4 +0.00006*t.^5;
dx=-0.135*t.^2 +0.027*t.^3 -0.00135*t.^4;
dy=0.06*t.^2 -0.012*t.^3 +0.0006*t.^4;
dz=0.03*t.^2 -0.006*t.^3 +0.0003*t.^4;
ddx=-0.027*t.^1 +0.081*t.^2 -0.0054*t.^3;
ddy=0.12*t.^1 -0.036*t.^2 +0.0024*t.^3;
ddz=0.06*t.^1 -0.0018*t.^2 +0.0012*t.^3;

```

```

figure(1)
plot(t,x,t,y,t,z);
xlabel('temp(s)')
ylabel('m')
legend('x vs.t','y vs.t','z vs.t');
grid on
title ('vecteur position')

```

```

figure(2)
plot(t,dx,t,dy,t,dz);
xlabel('temp(s)')
ylabel('m/s')
legend('dx vs.t','dy vs.t','dz vs.t');
grid on
title ('vecteur vitesse')

```

```

figure(3)
plot(t,ddx,t,ddy,t,ddz);
xlabel('temp(s)')
ylabel('m/s^2')
legend('ddx vs.t','ddy vs.t','ddz vs.t');
grid on
title ('vecteur acceleration lineaire')

```

*Les résultats de simulation et de comparaison

Demande de manipulateur plane 2R. Cette application va porter la comparaison géométrique pendant le mouvement du robot 2-R avec $l_1 = l_2 = 0.25m$

Ce point de pointe est censé se déplacer sur une ligne donnée

$$Y = -0.25998X + 0.3705 \quad (23)$$

Entre

et

en.P1 P210sec

$$X_{P_1} = 0.41122$$

$$Y_{P_1} = 0.26359$$

(24)

$$X_{P_2} = -0.0282$$

$$Y_{P_2} = 0.37783$$

Définissant un chemin cube de repos à repos pour X, on détermine le chemin cartésien du point de pointe.

$$X = 0.41122 - 0.0131826t^2 + 0.00087884t^3$$

$$Y = -0.00022848 t^3 + 0.003427 t^2 + 0.26359$$

En utilisant l'approche solution Algebraic pour résoudre les cinématique inverse nous donne quatre solutions:

$$\text{Solution 1 (1)} \begin{cases} \theta_1 = \tan^{-1} \frac{y}{x} - \tan^{-1} \frac{l_2 \sin \theta_2}{l_1 + l_2 \cos \theta_2} \\ \theta_2 = -\cos^{-1} \frac{X^2 + Y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \end{cases}$$

$$\text{Solution 2 (2)} \begin{cases} \theta_1 = \tan^{-1} \frac{y}{x} + \tan^{-1} \frac{l_2 \sin \theta_2}{l_1 + l_2 \cos \theta_2} \\ \theta_2 = +\cos^{-1} \frac{X^2 + Y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \end{cases}$$

$$\text{Solution 3 (3)} \begin{cases} \theta_1 = \tan^{-1} \frac{y}{x} - \tan^{-1} \frac{l_2 \sin \theta_2}{l_1 + l_2 \cos \theta_2} \\ \theta_2 = +\cos^{-1} \frac{X^2 + Y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \end{cases}$$

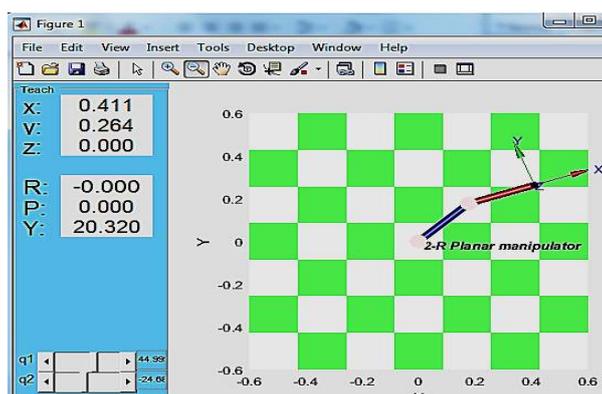
$$\text{Solution 4 (4)} \begin{cases} \theta_1 = \tan^{-1} \frac{y}{x} + \tan^{-1} \frac{l_2 \sin \theta_2}{l_1 + l_2 \cos \theta_2} \\ \theta_2 = -\cos^{-1} \frac{X^2 + Y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1 l_2} \end{cases}$$

En conséquence, ces quatre ensembles de valeurs d'angle de liaison donnée par les équations 1 à 4 résoudre le problème de cinématique inverse pour le manipulateur plane. Nous allons vérifier les positions particulières pour le manipulateur plan dans chacune des solutions ci-dessus à l'aide de deux logiciels, CATIA V5 et MATLAB / boîte à outils.

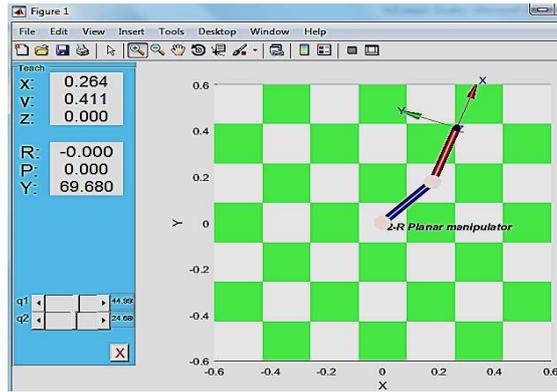
Tableau : solutions cinématiques inverses.

Fois)	Solution1		Solution2		solution3		Solution4		Position souhaitée	
	$\theta_1(deg)$	$\theta_2(deg)$	$\theta_1(deg)$	$\theta_2(deg)$	$\theta_1(deg)$	$\theta_2(deg)$	$\theta_1(deg)$	$\theta_2(deg)$	$p_x(m)$	$p_y(m)$
0	44,99	-24,68	44,99	24,68	20,31	24,68	20,31	-24,68	0,41	0,26
1	50,07	-32,59	50,07	32,59	17,47	32,59	17,47	-32,59	0,39	0,26
2	60,74	-47,47	60,74	47,47	13,26	47,47	13,26	-47,47	0,36	0,27
3	73,48	-62,27	73,48	62,27	11,20	62,27	11,20	-62,27	0,31	0,28
4	87,14	-74,64	87,14	74,64	12,50	74,64	12,50	-74,64	0,25	0,30
5	100,8 1	-83,32	100,81	83,32	17,49	83,32	17,49	-83,32	0,19	0,32
6	113,3 2	-87,71	113,32	87,71	25,60	87,71	25,60	-87,71	0,12	0,33
7	123,3 4	-88,09	123,34	88,09	35,25	88,09	35,25	-88,09	0,06	0,35
8	130,1 4	-85,77	130,14	85,77	44,37	85,77	44,37	-85,77	0,01	0,36
9	133,8 4	-82,83	133,84	82,83	51,01	82,83	51,01	-82,83	-0,01	0,37
dix	135,0 0	-81,47	135,00	81,47	53,53	81,47	53,53	-81,47	-0,02	0,37

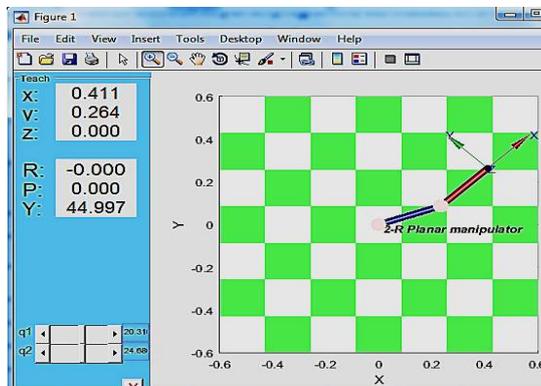
Vérification des résultats du tableau 3 Matlab / Simulink



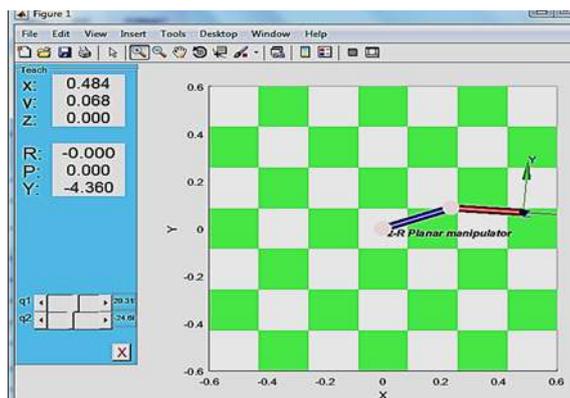
Solution 1 (la position initiale) $\theta_1 = 44.99deg$
 $\theta_2 = -24.68deg$ $p_x = 0.411m$, $p_y = 0.264m$



Solution 2 (la position initiale) = 1 44.99deg
 $\theta_2 = 24.68\text{deg}$ $p_x = 0.264\text{m}$, $p_y = 0.411\text{m}$



Solution 3 (la position initiale)
 $\theta_1 = 2 = 20.31\text{deg}$ 24.68deg θ
 $p_x = 0.411\text{m}$, $p_y = 0.264\text{m}$



Solution 4 (la position initiale)
 $\theta_1 = 2 = 20.31\text{deg}$ -24.68deg θ
 $p_x = 0.484\text{m}$, $p_y = 0.068\text{m}$