

**UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA**

**Faculté des Sciences de l'Ingénieur**

Département de Génie Mécanique

## **MEMOIRE DE MAGISTER**

Spécialité : Construction Mécanique

ETUDE GEOMETRIQUE ET CINEMATIQUE DES SYSTEMES  
ROBOTISES ET APPLICATION AU DOMAINE MEDICAL.

Par

**IRKI MOUFIDA.**

Devant le jury composé de :

A. Aiad	Professeur,	U. de Blida	Président
M. Ouali	Professeur,	U. de Blida	Examineur
A. Belaidi	Maître de conférences A,	U. de Boumerdès	Examineur
A. Alali	Maître de conférences A,	U. de Blida	Rapporteur
A. Brahim	Maître de conférences B,	U. de Blida	Co- Rapporteur

Blida, Avril 2012

## REMERCIEMENTS

Je voudrais saluer et remercier ici les personnes qui ont contribué à la réussite de ma thèse.

Je remercie mon encadreur M.Allali, qui m'a fait confiance et qui m'a donné l'opportunité de réaliser ce travail de thèse.

Je remercie Soufiene qui m'a offert son aide et son soutien pendant cette année de travail.

Je n'ose pas finir sans exprimer mes remerciements les plus chaleureux à mes parents pour leur respect, leur amour et leur confiance, à ma sœur Hassiba, mon frère Hakim et mon amie Akila pour leur soutien permanent aux moments heureux comme difficiles ainsi qu'à toute ma famille.

*A mes très chers parents.*

## ملخص

تهدف الروبوتات الطبية إلى تحسين دقة الإجراءات الطبي الجراحي مع الحفاظ على صلاحية الجراح في اتخاذ القرارات والسيطرة على العمل كونه يعتمد على تعاون وثيق بين الجراح والروبوت.

في الآونة الأخيرة ، ظهر أن الروبوتات يمكن أن تلعب دورا هاما في تطوير الجراحة مع بداية استخدام الروبوتات الصناعية المخصصة للاستخدام الطبي. إلى غاية إيجاد حلول لتصميم روبوتات مخصصة للمجالات الطبية

يمكن تصنيف الروبوتات وفقا لثلاثة عناصر هيكلها , طريقتهم في الاستبعاد أو وفقا لمجال استخدامها. وعلى هذا النحو نجد : الروبوتات الطبية الجراحة كجراحة الأعصاب , جراحة العظام أو جراحة المناظير . ضف الى ذلك الجراحة عن بعد.

الروبوتات الطبية غير الجراحية و التي تمثل الروبوتات الآلية للموجات فوق الصوتية للتخدير تصنف أولا وفقا لطريقتهم في الاستبعاد إلى 3 أنواع الروبوتات المستقلة أو الشبه مستقلة ذاتيا او بالإضافة الى الروبوتات المتحكم بها عن بعد (الاسترشاد عن بعد). ثانيا وفقا لهيكل الحركية و هي نوعان : الروبوتات الصناعية المخصصة للطب مثل جراحة الأعصاب والعظام وغيرها من الهياكل المكرسة في المجال الطبي ، مثل الجراحات المتحكم فيها عن بعد ليس المراد من الروبوتات الطبية أن تحل محل الطبيب ، بل إن عملها مكمل لعمل شاق أو لإعطاء أفضل دقة ، وخصوصا عندما يتعلق الأمر بإجراء تحقيق لتحديد المواقع من الموجات فوق الصوتية ، ومصدر إشعاعها لتنفيذ مهمة طبية عن بعد.

و لتنفيذ مهمة طبية باستخدام الذراع وجب وجود طبيب مختص في ميدان التخدير لكي يتم إجراء تحقيق لاكتساح بالموجات فوق الصوتية على جسم الإنسان، والتي توافقها إدخال إبرة فوق نقطة الإدراج.

النتائج: استخدام ذراعين الأول للمسح بواسطة جهاز فوق جسم الإنسان و الذراع الثاني للتنصيب ثم إدراج الإبرة (دراسة الهندسة العكسية).

ويساهم البرنامج التصميمي ليس فقط في التصميم والتحقق من النماذج في مجال الروبوتات ، ولكن أيضا لمحاكاة الحركة ومقارنة النتائج مع تلك التي حسبت على أساس برنامج المطلب.

## ABSTRACT

Medical robotics designed to improve the accuracy and reproducibility of the medical procedure the surgeon while maintaining its prerogatives in decision and control of the action. It relies on close cooperation between the surgeon and the robot.

More recently, it appeared that robotics can play an important role in the development of surgery beginning with the use of industrial robots suitable for medical use .Until solution dedicated to medical robotic. (Until the solution has been dedicated to medical robotic)

Robots can be classified according to their structure or their mode of subjugation, or according to their field of use. For the latter, the tow site types: medical robotics surgery, such us, the neurosurgery, orthopedics, minimally invasive surgery, and tele-surgery. And(Besides the) medical non-surgery robotics such us tele-échography and anesthesia robotic.

The classification according to the mode in which 3 types are: robot autonomous or semi autonomous, guided by humans, or tele-operated (remotely guided). But according to the kinematic structure, there are 2 types: industrial robots suitable for medicine, such as minimally invasive surgery or tele-operation and tele-manipulation.

The medical robot is not intended to replace the doctor; its work is complementary to work hard or to give better accuracy like the case of tele-surgery and tele-ultrasound.

Taking a simple case of using a manipulator arm to perform a medical task required the presence of specialist. The field of anesthesia that is to sweep an ultrasonic probe (Forward kinematic) and the second position the needle at the insertion, then insets the needle (inverse kinematic).

The CAO is not only used to design and to validate the prototypes in the field of robotics, but also for motion simulation and to compare the results with those calculated by the MATLAB program.

## RÉSUMÉ

La robotique médicale vise à améliorer la précision et la reproductibilité du geste médical tout en conservant au chirurgien ses prérogatives en matière de décision et de contrôle de l'action. Elle s'appuie sur une coopération étroite entre le chirurgien et le robot.

Plus récemment, il est apparu que la robotique pouvait jouer un rôle important dans le développement de la chirurgie en commençant par l'utilisation des robots industriels adaptés pour l'utilisation médicale. Jusqu'à trouver des solutions de conception robotique dédiée aux domaines médicaux.

On peut classer les robots selon leur structure, ou leur mode d'asservissement, ou selon leur domaine d'utilisation. Pour ce dernier, on cite deux types :

- la robotique médicale chirurgicale, ainsi que la Neurochirurgie, l'orthopédie, la chirurgie mini-invasive, et la télé-chirurgie.
- La robotique médicale non chirurgicale pour la télé échographie et l'anesthésie robotique.

La classification selon le mode d'asservissement est de 3 types, robot autonome, ou semi-autonome, guidé par l'humain et téléopéré (guidé à distance). Selon la structure cinématique, on distingue deux types : Les robots industriels adaptés pour la médecine, ainsi que la Neurochirurgie et l'orthopédie, d'autres structures sont dédiées au domaine médical, comme chirurgie mini-invasive, la télé opération, et la télémanipulation.

Prenons un cas simple de l'utilisation d'un bras manipulateur afin d'accomplir une tâche médicale qui nécessitait la présence d'un spécialiste. Le domaine de l'anesthésie qui consiste à balayer une sonde ultrasonique sur le corps humain qui positionne une aiguille au-dessus du point d'insertion.

Le travail consiste à étudier deux bras robotiques. Le premier, effectue un balayage d'une sonde (étude de la géométrie directe), et le deuxième positionne l'aiguille au point d'insertion, puis y insère l'aiguille (étude de la géométrie inverse).

La C.A.O (la conception assistée par ordinateur) est utilisé non seulement pour la conception et la validation des prototypes dans le domaine de la robotique, mais aussi pour la simulation de mouvements, de trajectoires, et la comparaison des résultats avec le calcul théorique en utilisant le logiciel Matlab.

La vérification des résultats obtenus par deux logiciels CATIA V5 et MatlabR2009a nous a permis de valoriser qualitativement et mettre en relief la pertinence de modèle étudié. Cette application nous a permis de constater qu'il existe une similitude entre la théorie et la pratique relative à la conception de ce logiciel.

## NOTATIONS

Notations géométriques et cinématiques :

$R_x(\theta)$  Indique une rotation d'angle  $\theta$  autour de l'axe  $x$ .

Notations matricielles.

$M^T$  est la transposée de la matrice  $M$ .

$cx$  pour  $\cos x$ .

$sx$  pour  $\sin x$ .

Arctan2 est la fonction inverse de tangente définie par :

$$\text{Arctan2}(B, A) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{B}{A}\right) & \text{si } A > 0, \\ \arctan\left(\frac{B}{A}\right) + \pi & \text{si } A < 0. \end{cases}$$

$\beta, \psi, \zeta$  : ce sont les angles de la prise d'aiguille.

## TABLE DE MATIERE

REMERCIEMENTS .....	- 2 -
ABSTRACT .....	- 5 -
RÉSUMÉ .....	- 6 -
NOTATIONS.....	- 7 -
INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	14
CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉS.....	17
1.1 Introduction .....	17
1.2 Origine du mot robot .....	17
1.3 Origine de la robotique.....	17
1.4 Définition du mot « Robot ».....	17
1.5 Notion de liaison mécanique .....	17
1.6 Notion de degrés de liberté .....	17
1.7 Le manipulateur .....	19
1.7.1 Manipulateur sériel .....	19
1.7.2 Manipulateur parallèle .....	19
1.8 Organe terminal : .....	20
1.9 La notion d'articulation.....	20
1.10 La structure mécanique articulée (S.M.A).....	20
1.11 Espace articulaire .....	21
1.12 Espace opérationnel .....	21
1.13 Espace de travail .....	21
1.14 Les axes principaux .....	23
1.15 L'architecture cinématique des robots utilisés dans le domaine médical .....	25
1.15.1 Architecture anthropomorphe .....	25
1.15.2 Architecture de type SCARA .....	26
1.15.3 Architecture à cinématique parallèle.....	26
1.15.4 Architectures cinématiques avec centre de rotation déporté.....	27
1.16 Définition de la position de l'organe terminal .....	28
1.17 Définition de l'orientation de l'organe terminal.....	28
1.18 Outil d'aide à la conception assistée par ordinateur des paramètres de conception à la solution en CAO .....	29
Conclusion .....	30
CHAPITRE 2 : LA ROBOTIQUE MEDICALE .....	31
2.1 Introduction .....	31
2.2 Propriété du robot médical .....	31
2.3 Classifications des robots médicaux .....	31
2.4 Structure mécanique .....	32
2.5 Robots médicaux .....	32
2.5.1 Les robots de la neurochirurgie .....	32
2.5.2 Les robots d'orthopédie .....	35
2.5.3 Les robots de la chirurgie mini-invasive.....	36
2.5.4 La téléchirurgie.....	39
2.6 Robotique médicale non chirurgicale : .....	40

2.6.1 Anesthésie robotique.....	40
2.6.2 Robots médicaux pour l'échographie (télé-échographie robotisée) .....	43
2.7 Statistique et comparaison .....	45
Conclusion .....	46
CHAPITRE3 : LA CINÉMATIQUE .....	47
3.1 Introduction (cinématique) .....	47
3.2 Modélisation des robots.....	47
3.2.1Modèle géométrique.....	47
3.2.2 Modèle cinématique .....	52
3.3 Cinématique des robots dédiés au domaine médical .....	55
3.3.1 Cinématiques d'un bras à centre de rotation déporté pour la chirurgie Mini-Invasive .....	55
3.3.2 Mécanisme sphérique pour l'orientation de la sonde (télé- échographie) : .....	56
Conclusion : .....	60
CHAPITRE 4 : LA GEOMETRIE .....	61
4 .1 Introduction .....	61
4.2 Génération en variables articulaires .....	61
4.3 Génération dans l'espace cartésien .....	64
4.4 Méthodes de planification de mouvement .....	65
Conclusion .....	68
CHAPITRE 5 : APPLICATION. ....	69
5.1 Introduction .....	69
5.2 Problème de la cinématique.....	71
5.2.1 Chaîne cinématique .....	71
5.2.2 Les paramètres de (D-H) du robot choisi .....	71
5.2.3 Calcul de Modèle géométrique directe M.G.D .....	71
5.2.4 Calcule du modèle géométrique inverse (M.G.I) :.....	73
5.2.5 La matrice Jacobienne : .....	74
5.2.6 Le Jacobien inverse, singularité : .....	75
5.3 Application : .....	78
5.3.1 La première solution.....	78
5.3.2 La deuxième solution.....	110
BANQUE DES DONNEES PROPOSEES A L'ETUDE DES ROBOTS INDUSTRIELS.....	120
CONCLUSION GENERALE.....	125
BIBLIOGRAPHIE .....	128

## LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX

Figure 1.1: Robot sériel. ....	19
Figure 1.2: Robot Delta (manipulateur parallèle à 3 d.d.l). [16] .....	19
Figure 1.3: Schéma d'un robot et des liaisons rotoïdes et prismatiques. ....	20
Figure 1.4: Relations entre les différents systèmes de coordonnées. ....	21
Figure 1.5: l'espace de travail. ....	22
Figure 1.6: Volumes de travail associés à différentes structures Mécaniques. ....	22
Figure 1.7: Structures de robot à 3 axes principaux de rotation. ....	23
Figure 1.8 : structures de robot à au moins un axe principal de translation. ....	24
Figure 1.9: influence de la configuration sur l'espace de travail. ....	25
Figure 1.10: Le robot anthropomorphe le diagnostic par échographie. ....	25
Figure 1.11: Cinématique du robot DERMAROB exploitant un porteur de type SCARA. ...	26
Figure 1.12: Robot parallèle ' Surgiscope' suspendu au plafond. ....	26
Figure 1.13: Contraintes de mobilité avec centre de rotation déporté. ....	27
Figure 1.14: mécanisme robotisé pour la télé-échographie. ....	27
Figure 1.15: Définition de la position d'un point fixe au centre de l'organe terminal. ....	28
Figure 1.16: Les angles d'Euler. ....	28
Figure 1.17: Modèle numérique de la structure anthropomorphe.....	29
Figure 2. 1: Structure globale. ....	32
Figure 2. 2: Robot de neurochirurgie (structure série). ....	33
Figure 2. 3: Robot Roboscope. (Structure Parallèle).....	33
Figure 2. 4: Planification du mouvement. ....	34
Figure 2. 5: Cerveau et les points cibles et la trajectoire calculée. ....	34
Figure 2. 6: Robot Robodoc.....	35
Figure 2. 7: Système Robotisé pour un fraisage précis des cavités. ....	35
Figure 2. 8: Robot Crigos. ....	36
Figure 2.9: Prothèse totale de hanche. ....	36
Figure 2.10: à gauche le système Endoassist dans la salle d'opération, à droite, le système porte-endoscope.....	37
Figure 2.11 : porte endoscope.....	37
Figure 2.12: l'endoscope de PECKER : caractéristiques géométriques et cinématiques. ....	38
Figure 2.13: Instrument optimal : DRIMIS.....	38
Figure 2.14: Le système de la téléchirurgie.....	39
Figure 2.15: Insertion d'aiguille aidée par robot. ....	41
Figure 2.16: Schéma du premier bras robotique : Il assure les différents mouvements nécessaires au positionnement de la sonde d'ultrasons. ....	42
Figure 2.17: Schéma du second bras robotique : Il assure les différents mouvements nécessaires au positionnement de l'aiguille, et de leur insertion subséquente dans la veine.....	42
Figure 2. 18: Schématisation du principe d'un système de télé-échographie robotisée.....	43
Figure 2. 19: (a) Sonde ultrasonore (b) Sonde ultrasonore en contact avec la peau. ....	44
Figure 2. 20: Mécanisme sphérique pour l'orientation de la sonde "télé-échographie" .....	45

Figure 3. 1: Relation entre l'espace articulaire et l'espace des coordonnées cartésiennes de l'effecteur.....	48
Figure 3. 2: définition des paramètres suivant Denavit-Hartenberg.....	49
Figure 3. 3: La transformation du repère de l'outil par rapport au repère de l'atelier.....	51
Figure 3. 4: Exemple de configurations multiples conduisant à la même position de l'organe d'extrémité (PUMA 560).....	52
Figure 3. 5 : Degrés de liberté à l'intérieur du patient en C.M.I. ....	55
Figure 3. 6: À gauche : vue globale de l'installation des aiguilles. À droite : vue locale pendant le passage de l'aiguille. ....	56
Figure 3.7: Structure sphérique série à trois liaisons rotoïdes à axes concourants.....	56
Figure 3.8: Espace de travail d'une structure sphérique série, (a) représentation dans l'espace et (b) représentation dans le plan.....	59
Figure 4. 1 Génération de trajectoire.....	61
Figure 4. 2 Trajectoire cubique. Variable articulaire, vitesse, accélération. ....	62
Figure 4. 3 Interpolation par spline cubique.....	62
Figure 4. 4 Interpolation linéaire avec transition parabolique.....	63
Figure 4. 5 Point de passage obligé.....	64
Figure 4. 6 Trajectoire rectiligne générée dans l'espace des coordonnées.....	64
Figure 4. 8 Représentation du fonctionnement d'un planificateur de trajectoire FPMR ....	66
Figure 4. 9 les trois étapes d'une méthode probabiliste classique.....	66
Figure 4. 10 Alternance entre les modes de recherche en profondeur et en largeur. ....	67
Figure 4. 11 : Méthode de décomposition en cellules.....	67
Figure 5. 1: Les deux mécanismes proposés pour l'anesthésie robotique. ....	70
Figure 5. 2: Architecture de la chaîne cinématique du manipulateur à structure RR.....	71
Figure 5. 3: Configuration "Elbow up" et "Elbow down". ....	74
Figure 5. 4 Coordonnées de vitesse opérationnelle.....	75
Figure 5. 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. ....	77
Figure 5. 6: Structure cinématique du premier robot (RR).....	78
Figure 5. 7: La variation des angles en fonction du temps t(s). ....	80
Figure 5. 8: Le déplacement suivant X et Y en fonction du temps t(s). ....	80
Figure 5. 9: Analyse du mécanisme sur CATIA V5. ....	81
Figure 5. 10: La simulation cinématique du mécanisme sur CATIA V5.....	81
Figure 5. 11: (a) La position initiale du robot. (b) La position finale du robot. ....	82
Figure 5. 12: (a) Vérification de la position initiale. (b) : Vérification de la position finale...	82
Figure 5. 13: Comparaison entre les graphes de déplacement calculés par le MATLAB et les valeurs simulées par CATIA V5. ....	83
Figure 5. 14 : Comparaison de trajectoire.....	84
Figure 5. 15: Vitesses articulaires.....	85
Figure 5. 16: Vitesses selon X et selon Y. ....	85
Figure 5. 17: Comparaison de conception de robot avec changement de longueurs des bras. ....	86
Figure 5. 18: comparaison de déplacement. ....	87
Figure 5. 19: comparaison des vitesses.....	88

Figure 5. 20 : comparaison de déplacement. ....	89
Figure 5. 21 : Le déplacement suivant X et Y. ....	91
Figure 5. 22 : La variation des angles $\theta_1, \theta_2$ durant 1(s). ....	91
Figure 5. 23 : (a)La position initiale. (b) La position finale ....	92
Figure 5. 24 : (a) Vérification de La position initiale. (b) Vérification de la position finale...	92
Figure 5. 25 : Comparaison entre les graphes de déplacement calculés par MATLAB et les valeurs simulées par CATIA V5 en exemple 2.....	93
Figure 5. 26 : la trajectoire sur CATIA V5 . ....	94
Figure 5. 27 : La trajectoire sur MATLAB.....	94
Figure 5. 28: Vitesse selon X et selon Y. ....	95
Figure 5. 29: Vitesses articulaires. ....	95
Figure 5. 30: Les accélérations selon X et Y. ....	95
Figure 5. 31: Structure cinématique du deuxième robot. ....	96
Figure 5. 32: Le déplacement suivant X et Y.....	98
Figure 5. 33: La variation des angles $\theta_1, \theta_2$ . ....	98
Figure 5. 34: (a) La position initiale. (b) La position finale. ....	99
Figure 5. 35: (a) Vérification à $t= 0(s)$ . (b) Vérification à $t= 10 (s)$ .....	99
Figure 5. 36: Le déplacement suivant X et Y . ....	100
Figure 5. 37: La variation des angles $\theta_1, \theta_2$ . ....	100
Figure 5. 38: (a) La position initiale (b) La position finale. ....	101
Figure 5. 39: Vérification de la configuration 2 à $t=0(s)$ et à $t=10(s)$ . ....	101
Figure 5. 40: Comparaison des angles $\theta_1, \theta_2$ entre les deux configurations.....	102
Figure 5. 41 : Comparaison de la géométrie des deux configurations à $t = 0(s)$ . ....	103
Figure 5. 42 : Comparaison de la géométrie des deux configurations à .....	103
Figure 5. 43: Vitesse selon x et selon y.....	104
Figure 5. 44: Vitesse selon x et selon y.....	104
Figure 5. 45 : Vitesses articulaires (a) Elbow down (b) Elbow up.....	105
Figure 5. 46 : La trajectoire en évitant un obstacle circulaire. ....	106
Figure 5. 47 : Comparaison des variables opérationnelles et articulaires. ....	107
Figure 5. 48 : Comparaison entre la trajectoire entre le modèle conçu sur CATIA et le programme élaboré sur MATLAB. ....	108
Figure 5. 49 : (a) trajectoire rectiligne d'un mouvement sans obstacle (b) trajectoire circulaire d'un mouvement avec obstacle. ....	109
Figure 5. 50 : Architecture de la chaîne cinématique du manipulateur à structure RRR(deuxième robot solution). ....	110
Figure 5. 51 : Variation des angles $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ (variables articulaires).....	115
Figure 5. 52 : Les déplacements suivant X , Y et Z (variables opérationnelles).....	115
Figure 5. 53 : Les vitesses suivant X, Y et Z. ....	116
Figure 5. 54 : Les vitesses suivant X, Y et Z. ....	116
Figure 5. 55 : La position initiale.....	117
Figure 5. 56 : La position finale. ....	117
Figure 5. 57 : Le tracé de la trajectoire sur MATLAB. ....	118
Figure 5. 58 : Le tracé de la trajectoire sur CATIAV5.....	118

Tableau 1.1: Principaux types d'articulations et leur représentation conventionnelle.....	18
Tableau 2.1: Caractéristiques des humains et robots. Adapté de [61] : .....	46
Tableau 5. 1: Paramètres géométriques de robot (R.R).....	71
Tableau 5. 2: les positions calculées en variant les angles.....	79
Tableau 5. 3: La variation des angles $\theta_1, \theta_2$ du premier robot (variables articulaires) .....	90
Tableau 5. 4: Les variable articulaires et opérationnelles, du deuxième robot (le cas d'insertion de l'aiguille) .....	97
Tableau 5. 5: Paramètres géométriques du robot. ....	110

## INRODUCTION GÉNÉRALE

Le développement de la robotique a été poussé en premier lieu par une motivation d'imitation des capacités basiques de l'être humain, afin de lui faciliter les tâches difficiles et répétitives dans l'industrie. Telles que le soulèvement de pièces lourdes, serrage, découpage, assemblage, etc. ou pour l'exécution de tâches dangereuses ou risquées[1].

Les robots industriels sont des systèmes automatisés, de haut niveau qui utilisent des ordinateurs comme partie intégrante de leur chaîne d'asservissement[2]. Ils sont en général de type sériel, leur structure mobile étant une chaîne ouverte formée d'une succession de segments reliés entre eux par des liaisons à un seul degré de liberté. Dans le but de réduire les volumes et de diminuer les masses des corps en mouvement, certains robots comportent une ou plusieurs boucles fermées formant chacune un polygone articulé[3] .

Un des objets de base en robotique est de pouvoir déplacer des objets selon des trajectoires prescrites[4].

Les premiers robots industriels sont apparus dans les années 60 et se sont répandus dans les années 70. Ils visaient à remplacer des opérateurs pour des tâches réputées pénibles, en raison [5] :

- des masses à manipuler (pinces à souder...) ;
- des conditions d'environnement (ateliers de peinture...) ;
- de la cadence et de la répétitivité des tâches ;
- etc.

Jusqu'aux années 80, l'objectif majeur de la robotique était d'équiper des ateliers ou des chaînes de montage avec des robots manipulateurs, pour l'exécution robuste des tâches répétitives (assemblage, tri, soudure, peinture, etc.). De nos jours, on assiste à un renouveau de la discipline avec l'exploitation de robots manipulateurs pour la robotique médicale.

La robotique médicale est un domaine très actif de la recherche, et les innovations continuent à affluer[6]. Donc les spécialités chirurgicales sont naturellement les premières à bénéficier de progrès technologiques [7].

La course à la robotisation du domaine médical est devenue aujourd'hui un des enjeux principaux des marchés économiques mondiaux. En effet, contrairement aux êtres humains, ces systèmes automatiques peuvent répéter inlassablement des mouvements de façon précise, rapide et sans fatigue, soulageant ainsi l'être humain de tâches répétitives et lui permettant de dépenser son énergie sur d'autres tâches plus importantes. C'est pourquoi, naturellement les tâches nécessitant de la précision géométrique, comme dans le cas de la neurochirurgie stéréotaxique ou de l'orthopédie, ont été les premières pour lesquelles le concept industriel d'automatisation robotisée a été appliqué. [8]

De plus, les erreurs humaines dans le domaine médical n'ont fait qu'augmenter au cours des dernières décennies, nuisant aux patients et augmentant les coûts divers [9]. Ainsi, en 1993 seulement, des estimations de 7000 morts ont été liées aux erreurs humaines aux États-Unis avec des coûts totaux excédant les deux milliards de dollars [10].

Le but n'est donc pas de remplacer l'être humain et d'éliminer des opportunités de travail, mais plutôt de l'aider dans ses tâches. Ainsi, et avec l'importance croissante de ces systèmes, la course à l'automatisation est devenue tellement rapide qu'il est impossible de citer toutes les applications possibles.

Le but de ce mémoire est double. A un premier niveau : montrer la diversité de domaine d'utilisation des robots manipulateurs, notamment dans le domaine médical.

Sur un second niveau : la modélisation d'un robot manipulateur afin d'accomplir des tâches médicales diversifiées, comme l'anesthésie robotique, en utilisant le logiciel MATLAB pour les calculs, ainsi que le logiciel CATIA V5 pour la conception et la vérification des résultats. L'objectif principal de ce mémoire consiste à mener une investigation dans le domaine des robots médicaux, prenant un cas simplifié pour la modélisation cinématique, à fournir aussi une riche bibliographie pour les étudiants qui veulent travailler sur un sujet pareil.

Comment arrivons-nous à remplacer un médecin ou un spécialiste à faire une tâche médicale par un robot industriel ? quel sont les critères pour choisir un robot solution ?

### **Organisation de la thèse :**

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres :

#### **Le chapitre 1 :**

Résume toutes les notions nécessaires à la compréhension du domaine de la robotique « bras manipulateur, robots industriels... » : L'origine et l'historique de la robotique, ainsi que quelques notions sur les degrés de liberté. Nous avons ensuite défini le bras manipulateur et les liaisons cinématique. On a donné la définition de l'espace de travail ainsi que l'espace articulaire, et l'espace opérationnelle. On a abordé aussi des axes principaux sur les différentes structures cinématiques des bras manipulateurs.

Les différentes architectures cinématiques des robots industriels utilisées dans le domaine médical ont été présentées. À la fin de ce chapitre on a abordé une des méthodes de calcul de position et d'orientation de l'organe terminal. On a donné une brève définition d'outil d'aide à la conception assistée par ordinateur C.A.O utilisé pour la conception des robots industriels.

#### **Le chapitre 2 :**

Ce chapitre porte sur l'état de l'art en robotique médicale. Il montre la diversité des systèmes robotiques et l'intérêt d'une classification. On s'est intéressés à leur architecture, leur nombre de d.d.l, et la description de leurs chaînes cinématiques.

On a mis l'accent sur l'utilisation des robots industriels pour des interventions chirurgicales dans le domaine médical, ainsi que l'orthopédie et la neurochirurgie. On a cité quelques exemples de domaines d'utilisation des robots dans la médecine.

Par ailleurs, On a donné des exemples de l'utilisation des robots spécialement dédiés au domaine médical, comme la chirurgie endoscopique et la télé-chirurgie. Des exemples de robots médicaux non chirurgicaux ont été détaillés à la fin de ce chapitre, ainsi que la télé échographie et l'anesthésie robotique.

### **Le chapitre 3 :**

Les différents modèles cinématiques utilisés en robotique « bras manipulateur » ont été présentés dans ce chapitre, tels que : Le modèle géométrique direct et inverse et le modèle cinématique direct et inverse. Ainsi que la modélisation en utilisant le système de paramétrage de Denavit Hartenberg.

L'accent a été mis, dans la deuxième partie du chapitre, sur l'étude des mécanismes robotisés dédiés au domaine médical, prenant l'exemple de la modélisation des systèmes à centre de rotation déporté, utilisé dans la chirurgie endoscopique (mini-invasive). Ainsi que l'exemple des mécanismes sphériques utilisés dans la télé échographie.

### **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.

### **Le chapitre 5 :**

Dans ce chapitre nous proposons une démarche pour aider au choix de la conception d'un robot industriel pour des applications médicales. A partir d'une étude menée sur le domaine d'application de robot, pour avoir une vision globale de l'acte chirurgical ainsi que les contraintes de conception et d'utilisation de ces mécanismes.

L'objectif principal de ce projet est d'étudier la cinématique d'un système robotisé (dans le domaine de l'anesthésie qui effectue une analyse d'images ultrasons) afin d'assurer la détection automatique d'une veine et d'en ressortir ses coordonnées.

Ainsi, cet objectif est réparti en deux sous-objectifs :

1. étude d'un système mécanique pour aider une sonde ultrasons à balayer un site prédéfini pour y détecter une veine (Problème de la géométrie directe).
2. étude d'un système mécanique pour placer l'aiguille sur la veine détectée (Problème de la géométrie inverse).

## CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉS.

### 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 manipulateur et les termes de la robotique utilisés dans ce mémoire. Nous étudions d'une manière générale, les chaînes cinématiques ; leur classification et le calcul de leurs degrés de mobilité.

### 1.2 Origine du mot robot : [11]

Le terme de « robot » est dérivé du Tchèque robota (travail) et est apparu pour la première fois en 1920, dans la pièce de théâtre de Karel Capek dans laquelle un androïde conçu par un savant était capable d'accomplir tous les travaux d'un homme.

### 1.3 Origine de la robotique : [12]

Dans les années 1985 l'association d'industrie robotique américaine définit le robot comme « une machine reprogrammable, multifonction, manipulateur conçu pour déplacer le matériel, pièces, ou les mouvements programmés variables spécialisés à travers de dispositifs pour l'exécution d'une variété de tâches ».

### 1.4 Définition du mot « Robot » : [12]

Un robot est un appareil automatique adaptable à un environnement complexe, remplace ou prolonge une ou plusieurs fonctions de l'homme agissant sur son environnement.

### 1.5 Notion de liaison mécanique : [2 et 13]

Un mécanisme est un assemblage de corps solides liés entre eux par contact et susceptibles de produire différents mouvements relatifs.

L'assemblage de deux corps en contact permanent est appelé couple cinématique, liaison cinématique, liaison mécanique ou simplement liaison. Parmi les liaisons on distingue les liaisons cinématiques inférieures qui sont des liaisons à contact surfacique et les liaisons cinématiques supérieures qui sont des liaisons à contact linéaire ou ponctuel.

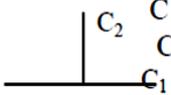
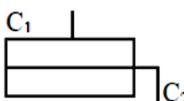
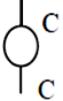
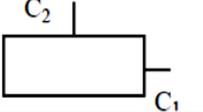
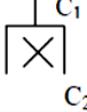
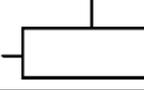
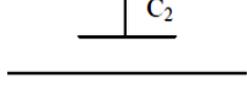
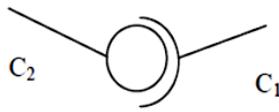
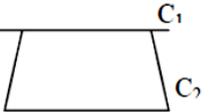
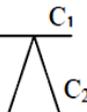
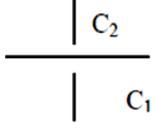
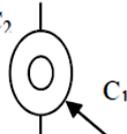
### 1.6 Notion de degrés de liberté : [1 et 2]

Un corps solide qui se déplace librement dans l'espace possède six degrés de liberté, l'interaction des éléments de couples cinématiques impose des contraintes à leur mouvement relatif. La nature et le niveau des contraintes dépendent du mode d'assemblage des éléments du couple.

Ces contraintes peuvent être interprétées comme condition de liaison imposée aux couples cinématiques.

Toutes les liaisons mécaniques sont répertoriées en classe qui correspond au nombre de conditions de liaisons. Elles sont représentées dans le tableau 1.1. (Norme AF-NOR E04-E015).

Tableau 1.1: Principaux types d'articulations et leur représentation conventionnelle.

Nom de Liaison	Mouvement relatifs	Nombre de Degré de liberté	Symbole
Encastrement	0: rotation 0: translation	0	 C1: corps 1 C2: corps 2
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

## 1.7 Le manipulateur : [14]

Un ensemble des mécanismes généralement composé d'éléments en séries articulés ou coulissantes l'un par rapport à l'autre, dont le but est la saisie et le déplacement d'objets suivant plusieurs degrés de liberté. Il est multifonctionnel et peut-être commandé directement par un opérateur humain.

### 1.7.1 Manipulateur sériel : [15]

Un manipulateur sériel se compose d'un ensemble de membrures montées en série et reliées par des liaisons prismatiques, rotoïdes ou des combinaisons de celles-ci, comme le montre la (figure 1.1). Ces manipulateurs possèdent un grand espace de travail.

Pour les manipulateurs sériels, le problème géométrique direct est simple à résoudre. Par contre, le problème géométrique inverse est souvent compliqué à résoudre.

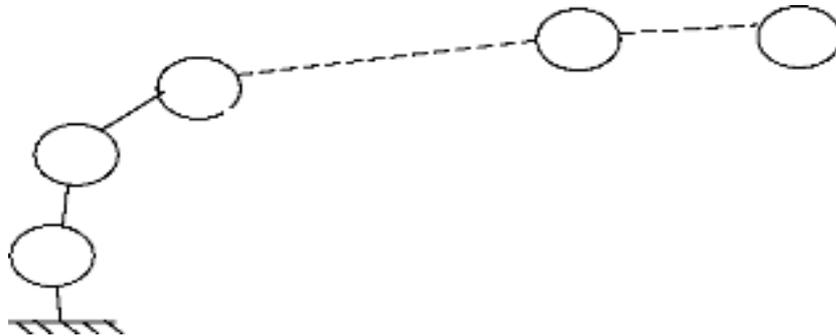


Figure 1.1: Robot sériel.

### 1.7.2 Manipulateur parallèle : [15]

Un manipulateur parallèle est un mécanisme à chaîne cinématique fermée, composé d'un organe terminal possédant  $n$  degrés de liberté, souvent appelé « plate-forme », d'une base fixe et de plusieurs sous-chaînes cinématiques indépendantes reliant cette dernière à la plate-forme. Chaque sous-chaîne se compose de segments articulés et motorisés par un actionneur à un degré de liberté qui peut être linéaire (prismatique) ou rotatif (rotoïde). La figure 1.2 montre un manipulateur à 3 degrés de liberté.

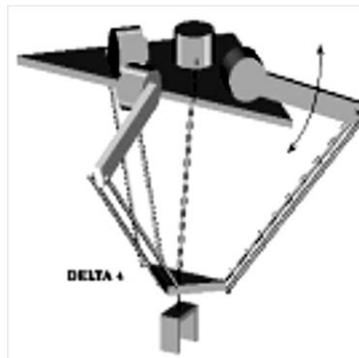


Figure 1.2: Robot Delta (manipulateur parallèle à 3 d.d.l). [16]

### 1.8 Organe terminal : [17]

C'est un dispositif d'interaction fixé à l'extrémité mobile de la structure mécanique, il regroupe les procédés destinés à manipuler des objets, ou à les transformer, il s'agit donc d'une interface permettant au robot d'interagir avec son environnement.

### 1.9 La notion d'articulation : [18 et 19]

Chaque articulation possède soit un axe de rotation pour les liaisons rotoïdes, soit un axe de translation pour les liaisons prismatiques.

Ces axes définissent donc le mouvement qui sera repéré par les coordonnées articulaires  $q$  avec  $q_i = \theta_i$  pour une rotation,  $q_i = r_i$  pour une translation. Les variables contrôlant le mouvement du robot sont ainsi définies. (Fig.1.4)

Une articulation lie deux corps successifs en limitant le nombre de degré de liberté de l'un par rapport à l'autre.

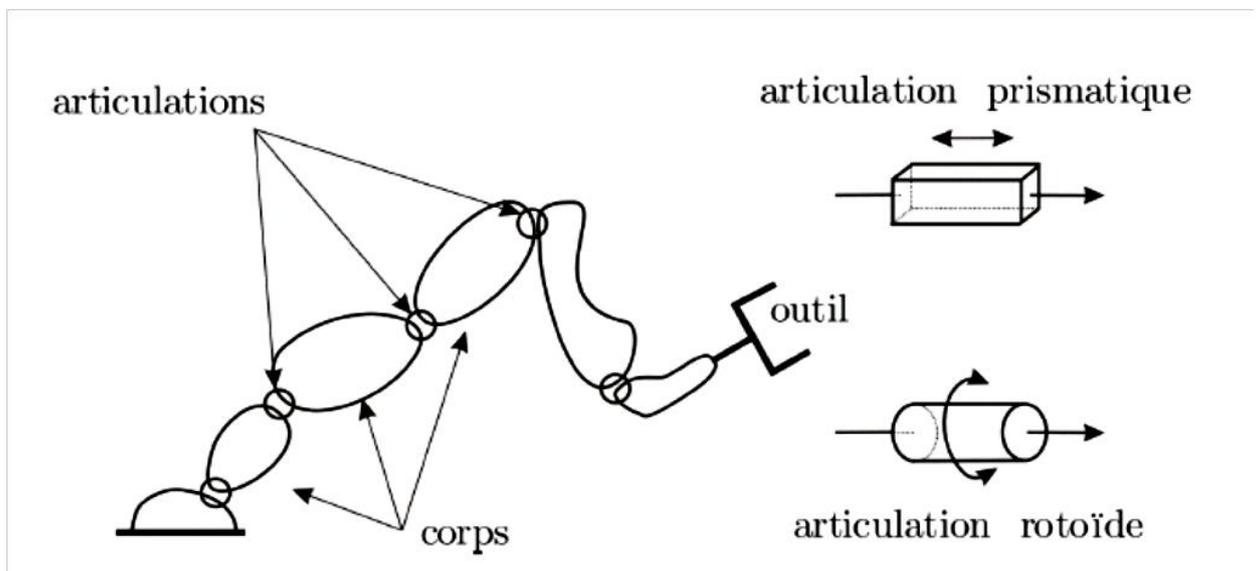


Figure 1.3: Schéma d'un robot et des liaisons rotoïdes et prismatiques.

### 1.10 La structure mécanique articulée (S.M.A) : [20et 21]

Un robot manipulateur est constitué généralement par deux sous-ensembles distincts : un organe terminal qui est le dispositif destiné à manipuler des objets, et une structure mécanique articulée (S.M.A.) constituée d'un ensemble de solides reliés entre eux, généralement les uns à la suite des autres où chaque solide est mobile par rapport au précédent. Cette mobilité s'exprime en terme de degrés de liberté (d.d.l.) qui est par définition le nombre de mouvements indépendants possibles d'un solide  $S_1$  par rapport au solide qui lui est directement relié  $S_2$ .

Une structure mécanique articulée peut être représentée par une architecture composée de plusieurs chaînes de corps rigides assemblés par des liaisons appelées articulations. Les chaînes peuvent être dites soit ouvertes ou en série dans les quelles tous les corps ont au plus deux liaisons, ou bien arborescentes où au moins l'un des corps a plus de deux liaisons.

### 1.11 Espace articulaire : [12,14 et 22]

Appelé aussi espace de configuration, est celui dans lequel est représenté la situation de tous ses corps. En général la configuration de l'ième articulation d'un robot manipulateur ne possède qu'un degré de liberté correspondant à un mouvement de translation rectiligne ou de rotation entre deux corps successifs des robots, situés sur une chaîne qui joint la base de l'organe terminal. A chacun de ces mouvements est associé un variable  $q_i$  ou  $i = 1, 2, \dots, n$  dont l'ensemble constitue le vecteur  $q = [q_1, q_2 \dots q_n]^T$  des coordonnées articulaires (généralisées) qui est un élément de l'ensemble de configuration du robot.

### 1.12 Espace opérationnel : [20 et 22]

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.

La dimension de l'espace opérationnel constitue le nombre de degrés de liberté maximum que peut avoir l'organe terminal et est égal au nombre de paramètres indépendants nécessaires pour décrire la situation de l'organe terminal dans l'espace.

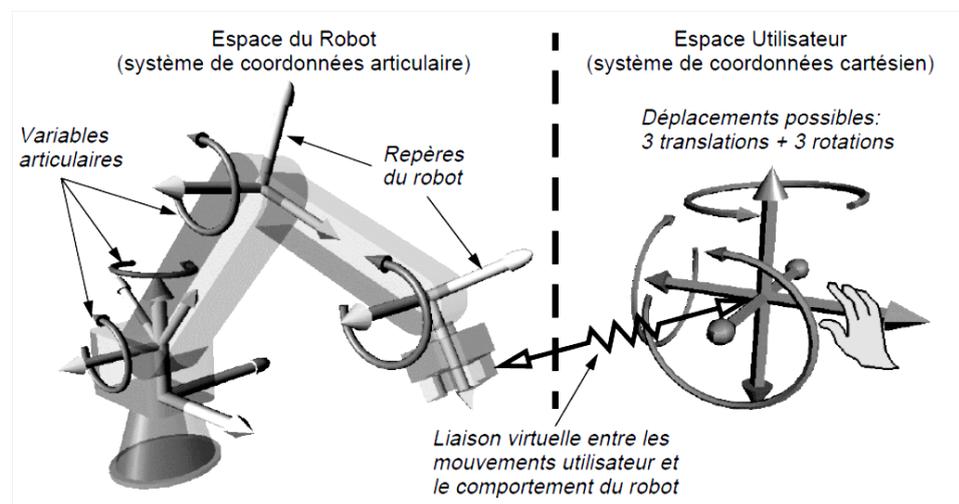


Figure 1.4: Relations entre les différents systèmes de coordonnées.

### 1.13 Espace de travail : [23,24 et 25]

Une des caractéristiques importantes du robot est son espace de travail, l'espace physique engendré par un point de l'organe terminal lorsque le robot est en mouvement (évolution relative aux variables articulaires).

Il est habituellement représenté par deux sections perpendiculaires choisies en fonction du type du robot manipulateur.

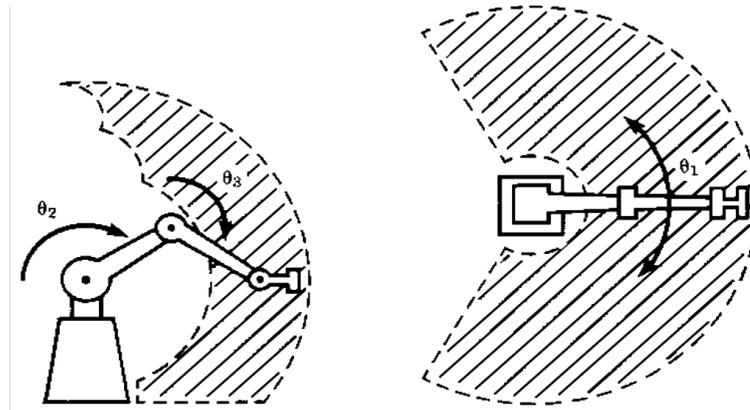


Figure 1.5: l'espace de travail.

La forme de l'espace de travail est conditionnée par la configuration de la structure principale, c'est à dire le type d'articulations, leur orientation relative et la grandeur des liens. (figure 1.6)

- fig1.6a : structure sphérique, à chaîne cinématique à course non limitée sur les axes 2 et 3 (figure 1.7 a) ;
- fig1.6b : structure sphérique à parallélogramme sur les axes 2 et 3 (figu1.8 b) ;
- figure 1.6 c : structure sphérique à parallélogramme et vis à roulement sur les axes 2 et 3 (fig 1.7 c) ;
- fig1.6d : structure polaire (fig 1.7b) ;
- fig1.6e : structure cylindrique (fig 1.7d) ;
- fig1.6f : structure type portique (fig1.7e).

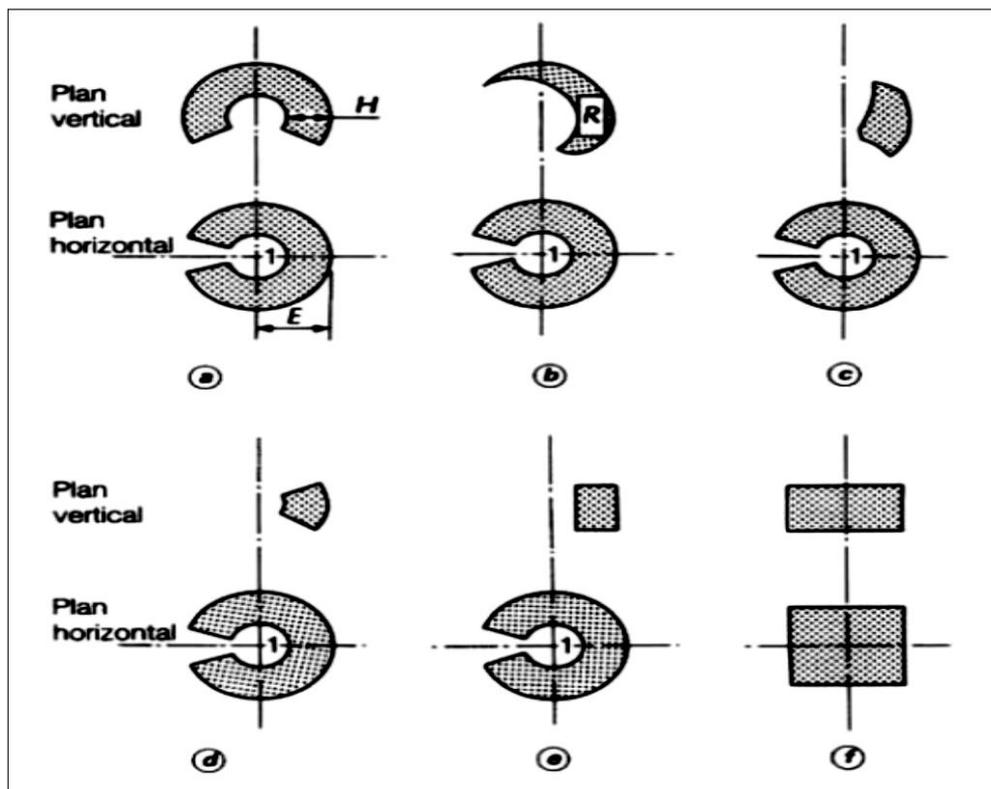


Figure 1.6: Volumes de travail associés à différentes structures Mécaniques.

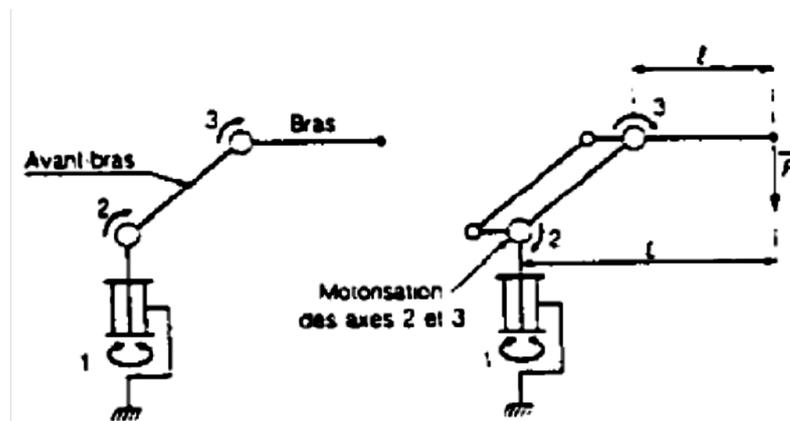
R Plus grand rectangle.  
 E élongation maximale.  
 H Plus grande horizontale radiale.

### 1.14 Les axes principaux : [26,27,23,25 et 28]

Ces axes, de rotation ou de translation peuvent être classés en huit arrangements de base, dont les principaux sont schématisés sur les figures (1.7) et (1.8), d'après la représentation normalisée AFNOR (NF E 04-015). Ce sont les structures suivantes :

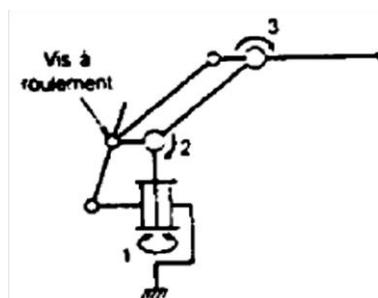
**3 rotations** : avec ces quatre configurations.

- Structure sphérique simple (figure 1.7.a),
- Structure sphérique à parallélogramme, dont l'intérêt réside dans la diminution du couple subit par l'axe 2 (figure 1.7.b),
- Structure sphérique à parallélogramme et course limitée (en général, par vis à roulement) (figure 1.7.c).



a) Structure sphérique.

c) Structure sphérique à parallélogramme et course limitée.



b) Structure sphérique à parallélogramme.

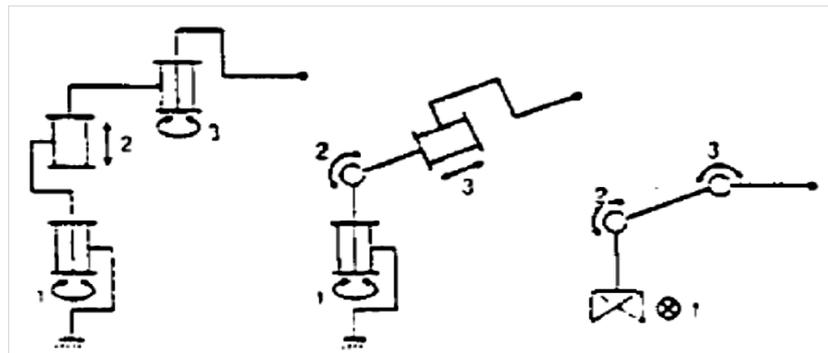
Figure 1.7: Structures de robot à 3 axes principaux de rotation.

**02 rotations – 01 translation** : les structures les plus répandues sont :

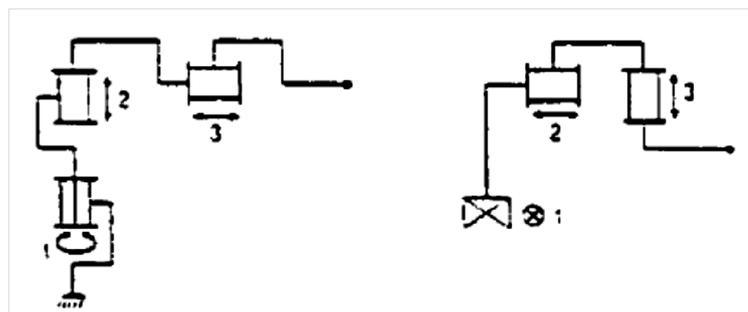
- la structure horizontale (1 rotation, 1 translation, 1 rotation d'axes verticaux), (figure 1.8.a) ;
- la structure polaire : la seconde rotation est en général de faible amplitude (figure 1.8.b) ;
- une structure dérivée de la structure sphérique par remplacement du premier axe de rotation par une translation (figure 1.8.c).

**01 rotation- 02 translations** : la structure cylindrique très utilisée pour des opérations de manutention (figure 1.8 d).

**03 translation** : la structure la plus répandue est type portique (figure 1.8 e).



a) Structure horizontale. b) structure polaire. c) structure dérivée de la structure sphérique.



d) structure cylindrique. e) structure type portique.

Figure 1.8 : structures de robot à au moins un axe principal de translation.

Remarque :

Sur la figure 1.9, on voit que l'espace de travail d'un robot RRR est en général plus grand que celui d'un robot cartésien PPP de dimensions comparables. Toutefois, l'espace de travail d'une architecture RRR contient des points singuliers où l'agilité ne peut être maintenue dans toutes les directions, et où certains mouvements ne peuvent être exécutés.

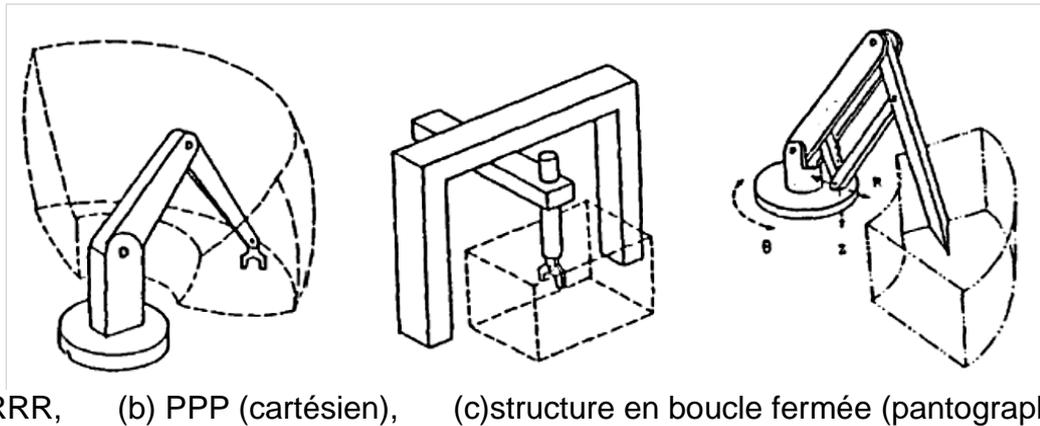


Figure 1.9: influence de la configuration sur l'espace de travail.

### 1.15 L'architecture cinématique des robots utilisés dans le domaine médical : [29]

La caractérisation et la spécification des besoins médicaux permettent alors au roboticien de les décliner en spécifications fonctionnelles et technologiques. La première étape consiste à choisir l'architecture cinématique. Cette démarche s'est jusqu'à présent souvent articulée autour de solutions avec des robots de types industriels, adaptés et modifiés pour une tâche médicale, mais elle évolue de plus en plus vers des solutions dédiées. Des différentes architectures de « porteur », les structures « série » conventionnelles ont été les plus utilisées jusqu'à présent. Cependant la question du choix entre une architecture de type SCARA et un bras anthropomorphe s'est posée naturellement.

#### 1.15.1 Architecture anthropomorphe : [30]

Issue des applications de l'industrie automobile (peinture, soudage, manipulation), elle est constituée d'un porteur à 3 d.d.l. et d'un poignet à 2 ou 3 d.d.l. C'est la configuration qui pour un encombrement donné du robot offre le plus grand espace de travail (espace sphérique). (Fig.1.10)



Figure 1.10: Le robot anthropomorphe le diagnostic par échographie.

### 1.15.2 Architecture de type SCARA : [30]

Également issue du monde industriel, la solution SCARA (4 d.d.l. pour des déplacements de l'effecteur conservant constante l'orientation « Z ») est largement exploitée pour constituer le porteur de robots médicaux. Un poignet dédié, classiquement à 03 articulations rotoïdes, vient compléter les mobilités du SCARA. L'espace de travail est approximativement un « *cylindre plat* » qui convient bien aux interventions sur un corps humain, allongé sur une table d'opération.

La simplicité cinématique ne constitue pas, en général, un problème délicat à surmonter. (Fig.1.11)

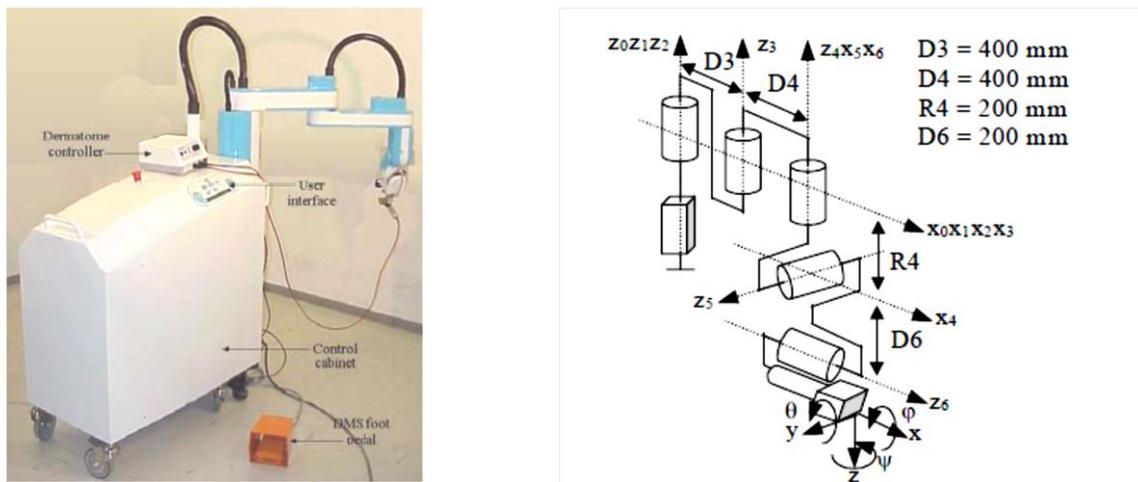


Figure 1.11: Cinématique du robot DERMAROB exploitant un porteur de type SCARA.

### 1.15.3 Architecture à cinématique parallèle : [30]

Malgré les avantages en termes de raideur, précision, vitesse, accélération (jusqu'à 40 g !), un bon rapport « poids/charge », beaucoup de parties semblables, de très bonnes capacités dynamiques et la possibilité à être utilisés pour le contrôle d'effort, ils présentent des inconvénients importants. Ils possèdent beaucoup d'articulations passives ce qui peut être préjudiciable à la précision ; le calcul des modèles (notamment le M.G.D. (Fig. 1.12)

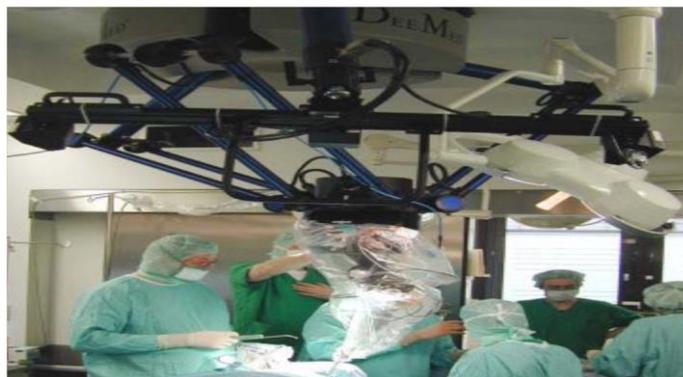


Figure 1.12: Robot parallèle 'Surgiscope' suspendu au plafond.

#### 1.15.4 Architectures cinématiques avec centre de rotation déporté : [30]

Parmi les tâches chirurgicales, beaucoup d'entre elles sont caractérisées par des mobilités angulaires relativement larges autour d'un point unique ou à l'intérieur d'un volume de travail réduit tel que schématisé. (Fig. 1.13)

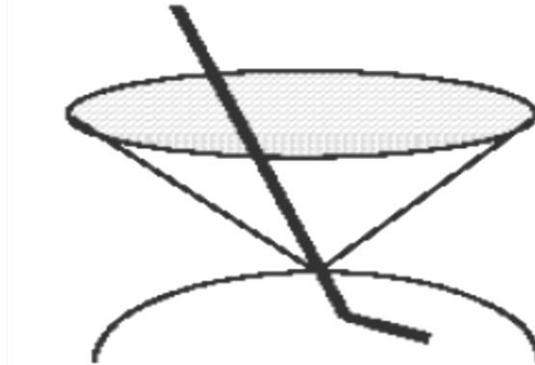


Figure 1.13: Contraintes de mobilité avec centre de rotation déporté.

En chirurgie mini-invasive, les instruments pivotent autour du point par lequel ils pénètrent à l'intérieur du corps du patient. Dans les procédures d'accès percutané, une aiguille est initialement placée avec sa pointe en contact avec le point d'entrée sur la peau puis orientée autour du point de pivot pour viser la cible. En échographie également, la sonde est positionnée en regard de l'organe à explorer puis orientée autour du point de contact avec la peau. Cette analyse a ainsi conduit au développement de mécanismes qui découplent les mouvements de rotation et de translation des outils en un point virtuel situé à une distance définie de la structure mécanique du robot. De cette façon, plusieurs robots incluent comme une caractéristique centrale de leur conception un centre de rotation déporté (*remote center of motion* ou R.C.M). Ces mécanismes présentent ainsi deux d.d.l. en rotation (voire trois) avec des axes concourants en un point localisé de façon distale par rapport au mécanisme. Un module sphérique à centre de rotation distant composé de 03 articulations rotoïdes (Fig. 1.14) utilisé pour la télé-échographie.

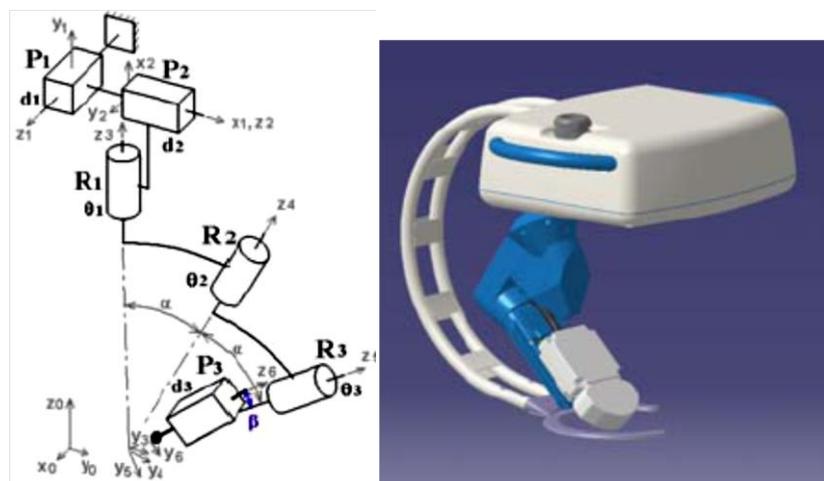


Figure 1.14: mécanisme robotisé pour la télé-échographie.

### 1.16 Définition de la position de l'organe terminal : [31]

Définissons le repère orthonormé  $R_1(O_1, x_1, y_1, z_1)$  lié au bâti, et le repère  $R_{n+1}(O_{n+1}, x_{n+1}, y_{n+1}, z_{n+1})$  lié à l'organe terminal du robot manipulateur. La position du point  $O_{n+1}$ , fixé au centre de cet organe terminal, par rapport au repère  $R_1$ , peut être définie par les coordonnées cartésiennes, cylindriques, ou sphériques représenté sur la figure 1.15.

- Coordonnées cartésiennes  $(l, m, n)$ .
- Coordonnées cylindriques  $(\rho, \theta, z)$ .
- Coordonnées sphériques  $(r, \theta, \varphi)$ .

Dans la suite de notre travail, nous allons choisir les coordonnées cartésiennes pour obtenir les résultats les plus généraux possible.

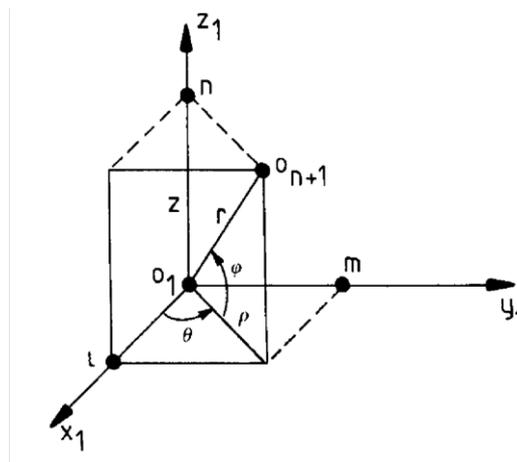


Figure 1.15: Définition de la position d'un point fixe au centre de l'organe terminal.

### 1.17 Définition de l'orientation de l'organe terminal : [32]

L'orientation du repère  $R_T$  par rapport au repère de base du bras manipulateur  $R_B$  est déterminée par la spécification de trois angles  $\phi_B, \theta_B, \Psi_B$  qui représentent les angles d'Euler du système. Ils sont appelés respectivement lacet, tangage et roulis.

Les angles d'Euler (Fig.1.16) correspondent à une première rotation autour de  $oz$ , suivie d'une rotation autour du nouvel axe  $OY'$  suivie d'une dernière rotation autour du nouvel axe  $OZ''$ .

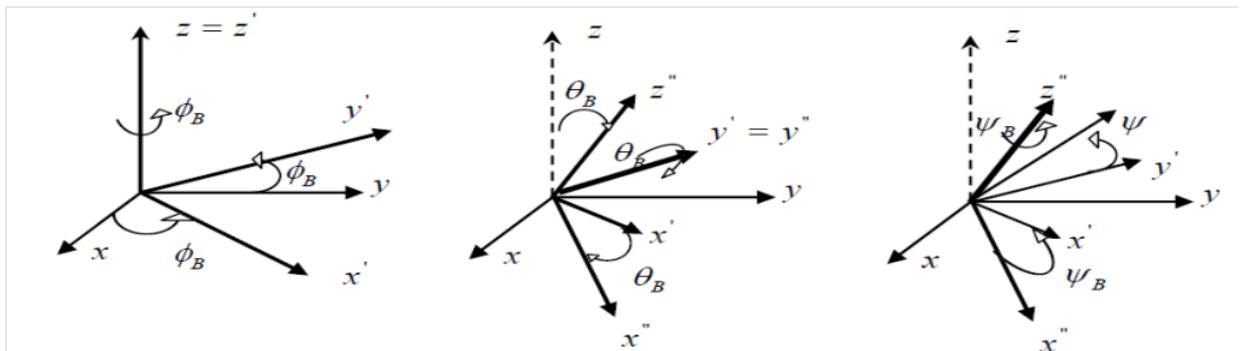


Figure 1.16: Les angles d'Euler.

La matrice obtenue par les trois rotations successives décrites ci-dessus est donnée par l'équation suivante :

$$R = \begin{bmatrix} \cos(\phi_B) \cos(\theta_B) \cos(\psi_B) - \sin(\phi_B) \sin(\psi_B) & -\cos(\phi_B) \cos(\theta_B) \sin(\psi_B) - \sin(\phi_B) \cos(\psi_B) & \cos(\phi_B) \sin(\theta_B) \\ \sin(\phi_B) \cos(\theta_B) \cos(\psi_B) + \cos(\phi_B) \sin(\psi_B) & -\sin(\phi_B) \cos(\theta_B) \sin(\psi_B) + \cos(\phi_B) \cos(\psi_B) & \sin(\phi) \sin(\theta) \\ -\sin(\theta_B) \cos(\psi_B) & \sin(\theta_B) \sin(\psi_B) & \cos(\theta_B) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}$$

En faisant une identification à termes de la matrice R et la T, nous avons retenu la solution suivante :

$$\phi_B = \text{atan2}(R_{23}, R_{13}). \quad (1.1)$$

$$\theta_B = \text{atan2}\left(-\sqrt{R_{13}^2 + R_{23}^2}, R_{33}\right). \quad (1.2)$$

$$\psi_B = \text{atan2}(-R_{32}, -R_{31}). \quad (1.3)$$

### 1.18 Outil d'aide à la conception assistée par ordinateur des paramètres de conception à la solution en CAO :

Cette phase est une étape de la conception intégrée et simultanée en ingénierie mécanique.

Elle consiste à créer des systèmes à base de connaissances couplées à des systèmes C.A.O (conception assistée par ordinateur). Ces systèmes sont performants pour effectuer de la préconception basée sur une capitalisation des connaissances de conception. Cet outil d'aide à la conception a été développé avec le logiciel Catia v5. Il permet à partir des paramètres de conception figurant dans les organigrammes proposés précédemment à partir du catalogue de robots, d'avoir la solution technologique du robot.

Un autre outil CAO a été créé sous Catia v5 pour aider le concepteur. Il permet d'avoir automatiquement sous le logiciel de Catia v5 le modèle numérique de robot simplifié correspondant, (Fig.1.17). Ce robot est paramétré géométriquement par les longueurs de bras et les rayons et les hauteurs des axes. Ses dimensions peuvent donc être modifiées. Le concepteur peut alors voir l'allure de son robot et l'animer cinématiquement.

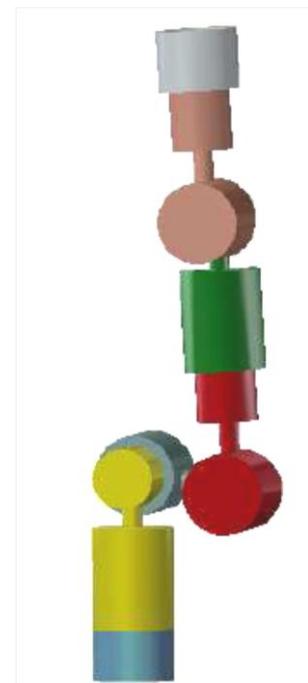


Figure 1.17: Modèle numérique de la structure anthropomorphe.

**Conclusion :**

Afin d'aborder un sujet de recherche dans le domaine de la robotique, il est important de résumer toutes les notions de base nécessaires à la compréhension de ce domaine ; comme l'origine et l'historique de la robotique. La définition des liaisons cinématique et de l'espace de travail ainsi que l'espace articulaire, et l'espace opérationnelle. Généralité des axes principaux sur les différentes structures cinématiques des bras manipulateurs.

Pour les robots utilisés dans le domaine médical, il faut noter qu'il y a des structures cinématiques dédiées, un peut différentes que ceux employées dans l'industrie.

Parler d' Outil d'aide à la conception assistée par ordinateur CAO utilisé pour la conception des robots est important quand il s'agit d'une conception d'un nouveau mécanisme suivant un cahier de charge bien défini notamment dans le domaine de la robotique médicale, ou d'une modélisation cinématique, calcule des trajectoires tracées par le robot, afin de comparer les résultats analytiques.

## CHAPITRE 2 : LA ROBOTIQUE MEDICALE

### 2.1 Introduction : [33 et 34]

La robotique médicale est une discipline récente qui a débuté à la fin des années 1970. Les structures robotiques ont évolué et se sont diversifiées pour satisfaire aux besoins et aux contraintes importantes du domaine médical. Les premiers robots médicochirurgicaux qui ont été développés, vers la fin des années 80, étaient principalement conçus, et adaptés aux besoins médicaux particuliers, à partir de structures mécaniques largement répandues dans le milieu industriel.

Le robot médical doit avoir de bonnes capacités de parcourabilité et de manipulabilité dans son espace de travail obligatoire, pour le suivi du geste médical. Il doit respecter des contraintes d'encombrement sous des conditions de sécurité environnementales du robot. Les contraintes de conception sont, dans la plupart des applications, l'accessibilité à l'espace de travail sans singularité et la limite imposée par les butées articulaires pour assurer la sécurité.

### 2.2 Propriété du robot médical : [35]

La sécurité : en aucun cas le robot ne doit pouvoir blesser le patient ou un membre du personnel soignant. Or les robots industriels sont par nature dangereux car très puissants et rapides.

L'encombrement : le robot ne doit pas gêner le travail du chirurgien en occupant une place trop importante dans la zone opératoire. Il doit donc avoir une structure légère et compacte.

La stérilité : pour la plupart des gestes médicaux, le système robotique doit respecter des contraintes de stérilité. Ceci implique d'avoir une structure particulière qui supporte les conditions de stérilisations (haute température ou produits chimiques) ou encore une structure qui peut-être protégée simplement par un système d'emballage plastique.

### 2.3 Classifications des robots médicaux : [36]

Selon la classification proposée dans [37] , on distingue trois types différents de retour d'effort :

- les robots asservis sur un effort de consigne selon un mode autonome (l'orthopédie, la Neurochirurgie),
- les systèmes de co-manipulation permettant la manipulation simultanée d'un outil par le robot et un opérateur (la chirurgie mini-invasive),
- les robots télémanipulés offrant un retour d'effort à l'opérateur via un bras maître (chirurgie télémanipulée).

## 2.4 Structure mécanique : [33]

On distingue 3 structures globales des robots médicaux : sérielles, parallèles ou encore hybrides(Fig.2.1).

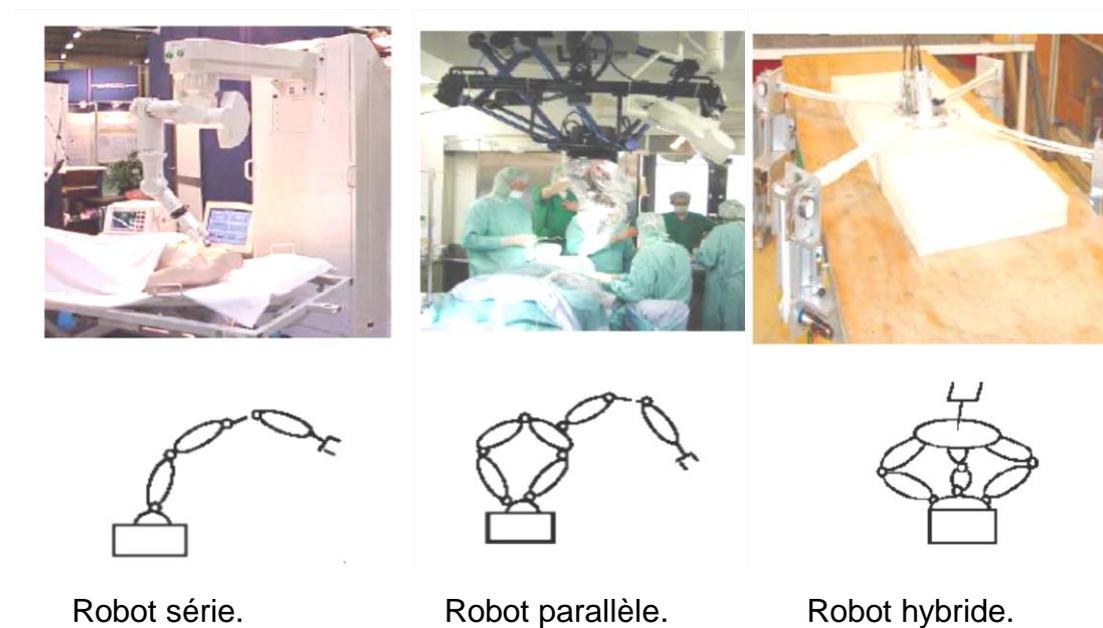


Figure 2. 1: Structure globale.

## 2.5 Robots médicaux :

Nous allons présenter les différents systèmes robotisés rencontrés dans le domaine médical.

### 2.5.1 Les robots de la neurochirurgie : [33,38 et 39]

Le robot est utilisé pour déplacer précisément une source de rayonnement ou pour l'insertion d'une aiguille (thermo-ablation) autour du patient.

Avantage : – Suivi de trajectoires plus précises.

Les précisions requises sont proches du millimètre, ce qui a amené les chercheurs à concevoir des appareils d'aide au geste très précis. Ils positionnent sondes ou instruments automatiquement en un point le long d'une trajectoire prédéfinie.

Les structures cinématiques présentes dans le domaine de la neurochirurgie sont de deux types : les structures séries classiques et les structures parallèles.

- Les structures Série : [39]

Il permet de positionner très précisément l'instrument chirurgical. Ce robot a une particularité puisqu'il est stéréotaxique : c'est-à-dire qu'il se positionne par rapport à un casque fixé sur le patient, en l'occurrence ici, son crâne.

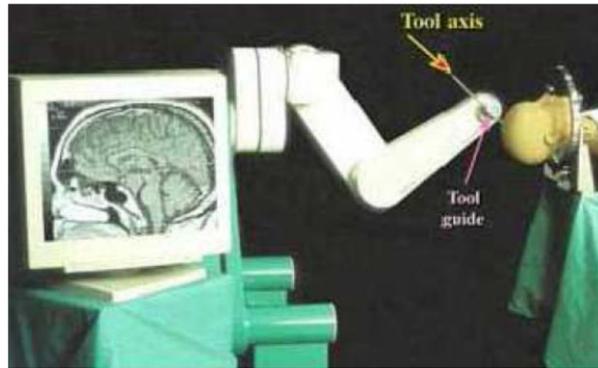


Figure 2. 2: Robot de neurochirurgie (structure série).

- Les structures parallèles : [39]

Cette architecture cinématique est peu commune en robotique médicale, due à son faible espace de travail. Les robots parallèles ont de nombreuses applications lorsqu'il est nécessaire d'obtenir simultanément une bonne précision absolue et une rigidité suffisante.

Application : robot delta qui a une mobilité de 03 degrés de liberté en translations. Trois chaînes cinématiques identiques fournissent trois degrés de liberté en translation à une plateforme suspendue. (Fig. 2.3).

L'originalité de ce robot est qu'il est suspendu au plafond afin de ne pas encombrer la salle d'opération.



Figure 2. 3: Robot Roboscope. (Structure Parallèle)

- Planification du mouvement : [40]

Selon le protocole, la planification débute par la spécification dans les images des zones du cortex à stimuler, par le praticien. Une fois cette étape réalisée, la planification robotique débute. (Figure 2.4)

On a développé un logiciel qui peut interpréter les images obtenues par un scanner classique. Cet outil permet de dresser la cartographie 3D du corps de chaque patient. Il sera possible de localiser les tumeurs par exemple et de donner des indications de volume et de forme des organes. C'est un changement majeur, car le chirurgien se base sur la cartographie réelle du terrain et non sur une anatomie moyenne pour établir sa stratégie d'opération.

Il s'agit de calculer les mouvements du robot nécessaires pour stimuler au mieux les zones concernées. Une fois obtenus les points sur le crâne, la trajectoire est obtenue par interpolation à l'aide de spline, comme représenté sur la figure 2.5. La trajectoire opérationnelle du robot est alors complètement définie.

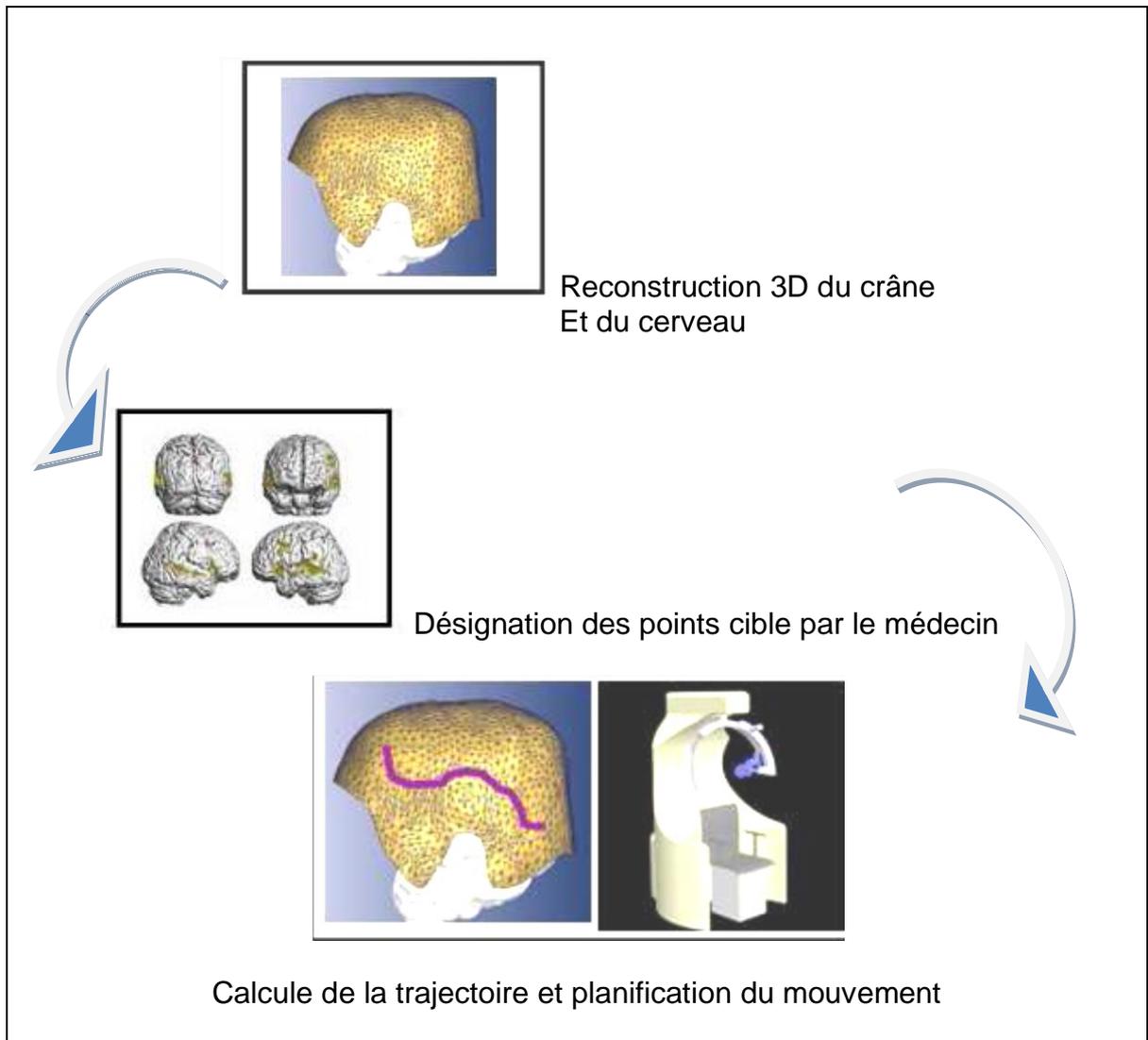


Figure 2. 4: Planification du mouvement.

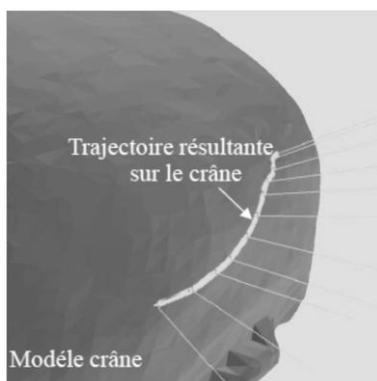


Figure 2. 5: Cerveau et les points cibles et la trajectoire calculée.

La neurochirurgie demande une extrême précision et la moindre erreur de manipulation peut avoir des conséquences très graves pour le patient, c'est pourquoi l'utilisation d'outils augmentant la précision est importante d'une efficacité hors du commun. [41]

### 2.5.2 Les robots d'orthopédie : [33 et 42]

L'application considérée concerne l'orthopédie, elle consiste à fraiser une forme pré-définie dans l'os avant la pose d'un implant (exp : prothèse).

Les premiers robots pour l'orthopédie sont des robots industriels modifiés pour répondre à l'application médicale. En 1991, le robot Robodoc, est conçu avec une architecture industrielle de type SCARA (Selective Compliant Articulated Robot Arm) RRRP, à 3 articulations rotoïdes d'axes parallèles et une articulation prismatique (RRRP), (Fig.2.6). Développé pour la mise en place de prothèse de hanche en orthopédie, il permet de réaliser, en autonomie après une phase de planification, le fraisage de la cavité qui doit recevoir l'implant, (Fig.2.7).

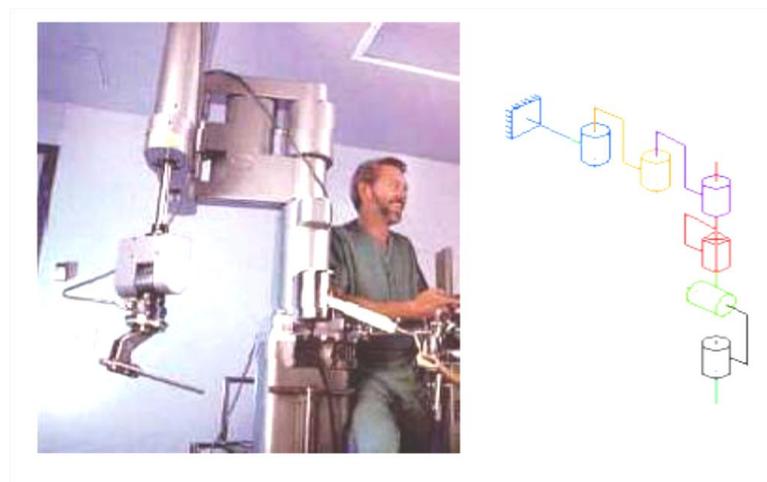


Figure 2. 6: Robot Robodoc.

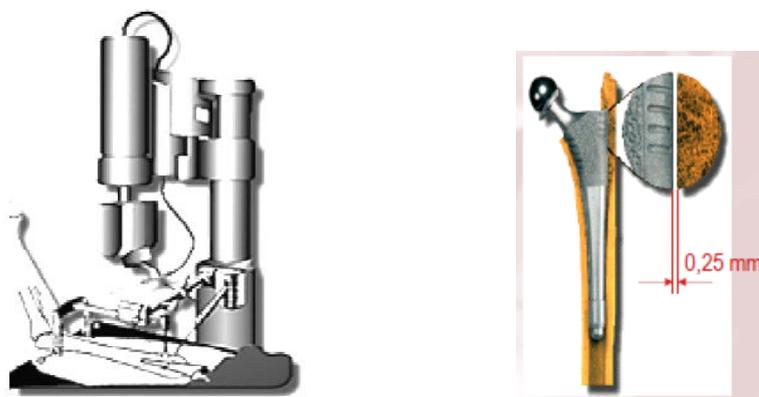


Figure 2. 7: Système Robotisé pour un fraisage précis des cavités.

Le robot Crigos a été développé avec une structure parallèle (Fig.2.8). Il possède une structure à 6 ddl de type plate-forme de Stewart surmontée de porte-outils spécifiques. Il permet d'adapter l'espace de travail à la région réduite d'intervention.

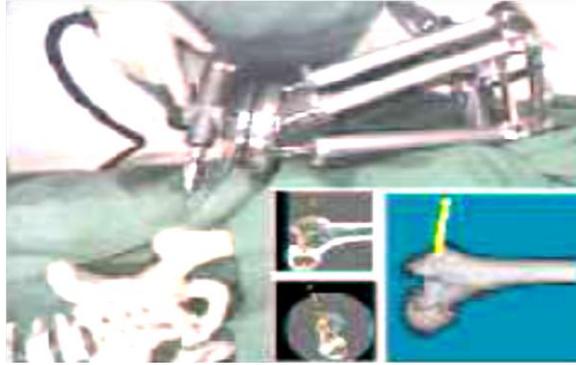


Figure 2. 8: Robot Crigos.

- Les prothèses orthopédiques : [42]

La prothèse orthopédique est un dispositif mécanique adapté de manière à reproduire la forme et autant que possible la fonction d'un membre perdu ou absent. Le remplacement du membre par un substitut artificiel est réalisé par un chirurgien spécialisé. (Fig.2.9)

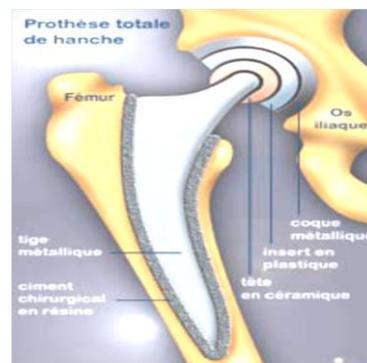


Figure 2.9: Prothèse totale de hanche.

### 2.5.3 Les robots de la chirurgie mini-invasive : [33,38 et 43]

Opération chirurgicale pratiquée à travers des points d'incisions. Cette technique consiste à réaliser trois petites incisions dans le corps du patient. Dans l'un d'eux passe un endoscope pour voir à l'intérieur du corps, dans les deux autres, les instruments chirurgicaux, (Figure 2.10). Cette chirurgie a apporté des avantages considérables pour le patient : petite cicatrice, durée de rétablissement et d'hospitalisation plus courte.

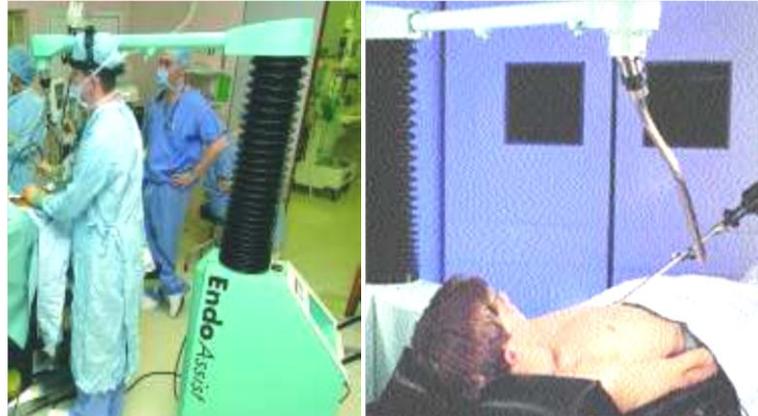


Figure 2.10: à gauche le système Endoassist dans la salle d'opération, à droite, le système porte-endoscope.

- Systèmes de positionnement d'endoscopes : [44]

En chirurgie endoscopique manuelle, puisque le chirurgien a généralement les deux mains occupées par les instruments, la caméra endoscopique est manipulée par un assistant. Celui-ci a pour tâche de maintenir les instruments au centre de l'image endoscopique et de donner de nouveaux points de vue au chirurgien à sa demande. Cette tâche est fatigante pour de longues opérations, il est difficile pour l'assistant de ne pas bouger et la compréhension entre le chirurgien et l'assistant peut être délicate puis qu'ils ont des positions différentes par rapport au patient. De plus, cette tâche demande une faible qualification médicale et occupe du personnel hospitalier.

Comme la caméra n'interagit pas directement avec les tissus, il semble intéressant de remplacer l'assistant par un robot porte-endoscope. On supprime ainsi la fatigue, les tremblements de l'assistant et on renforce la stabilité des images endoscopiques.

- Les porte-endoscopes : [30,34 et 43]

Les robots porte-endoscope qui permettent de guider l'optique et donc la vision du chirurgien, permettant de ne pas avoir recours à un aide pour cette tâche fastidieuse, (Fig. 2.11)

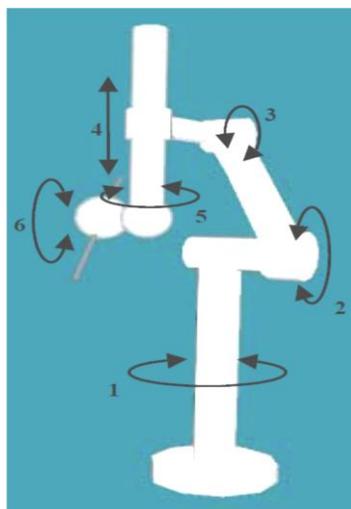


Figure 2.11 : porte endoscope.

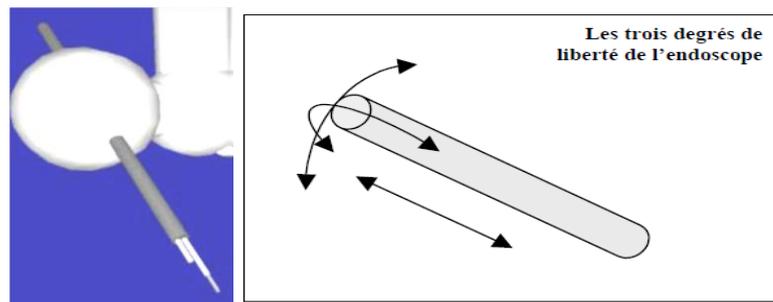
La géométrie du robot est définie par une succession de segments articulés entre eux.

L'expression des articulations selon le système de coordonnées de Denavit-Hartenberg permet de connaître la position spatiale de chaque articulation.

- Le tube endoscope :

Il s'agit d'un tube de 5 mm de diamètre pour 200 mm de long, contenant une caméra et un instrument de 1.5mm de diamètre. Les deux composantes de l'endoscope circulent dans le tube en translation. (Fig. 2.12)

L'endoscope lui-même possède trois degrés de liberté autour d'un point virtuel situé au milieu du tube. Ce point forme "remote center" du système, c'est-à-dire le point fixe autour duquel le robot, une fois positionné, va accomplir son travail. Le "remote center" doit être situé approximativement au milieu de l'endoscope afin de minimiser l'amplitude de déplacement du tube lors des mouvements de travail, et donc d'éviter les collisions.



<b>Tube endoscope</b>	Longueur 200 mm Diamètre 5 mm	Rotation 1 : $-2\pi/30$ : $2\pi/30$ Rotation 2 : $-2\pi/30$ : $2\pi/30$ Translation : -50 mm : + 90 mm
<b>Instrument</b>	Longueur 100 mm Diamètre 1.5 mm	Translation : -10 mm : 0
<b>Caméra</b>	Longueur 100 mm Diamètre 1.5 mm	Translation : -10 mm : 0

Figure 2.12: l'endoscope de PECKER : caractéristiques géométriques et cinématiques.

Description cinématique : [45]

Un exemple de système robotique de chirurgie mini-invasive proposé est doté de 9 ddl : 4 fournis par le manipulateur externe et 5 ddl intra-cavitaux. Le schéma cinématique de ce système est illustré en (Fig.2.13), de même, une vue CAO de la partie intra cavitaire de l'instrument.

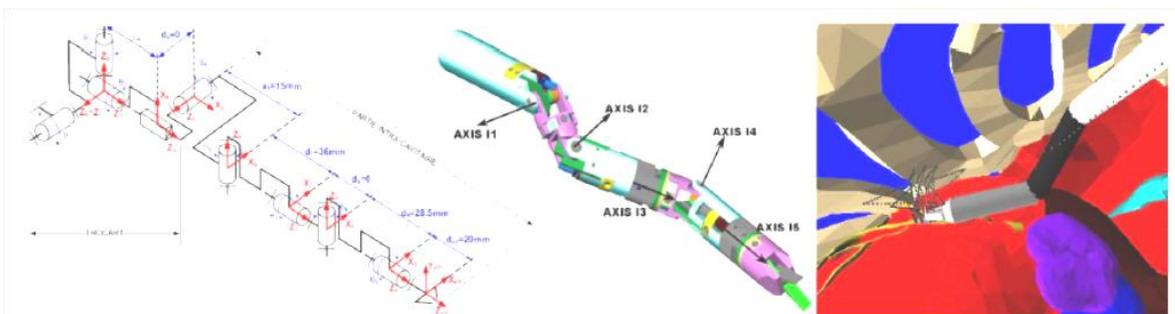


Figure 2.13: Instrument optimal : DRIMIS

### 2.5.4 La téléchirurgie : [6,11,46,47 et 48]

Autre grand domaine de la robotique médicale, la téléchirurgie fait actuellement l'objet de nombreuses recherches et de plusieurs développements commerciaux. Voyages spatiaux, chirurgie de guerre, médecine humanitaire ; les terrains sont nombreux où la présence directe d'un chirurgien pourrait avantageusement être remplacée par un système robotisé commandé à distance. Plus simplement, la télé-chirurgie peut commencer à l'intérieur même de la salle d'opération. De nombreuses spécialités ont bénéficié, ces dernières années, des progrès de la chirurgie endoscopique ont remplacé la chirurgie ouverte.

Mais si cette technique permet un plus grand confort du patient en limitant le caractère invasif des interventions, elle prive le chirurgien de vision directe et limite ses mouvements à seulement quatre degrés de liberté. Cependant le praticien exerce son art à une très grande distance par exemple depuis son cabinet à terre, pour opérer un patient à bord d'un bateau en mer.

Le chirurgien est assis à la station de travail « maître », à quelques mètres de distance des bras opérateurs du robot « esclave », (Fig.2.14). Il ne s'agit pas ici de faire réaliser certains gestes de façon préprogrammée, mais bien d'une transmission des mouvements réalisés par le chirurgien.

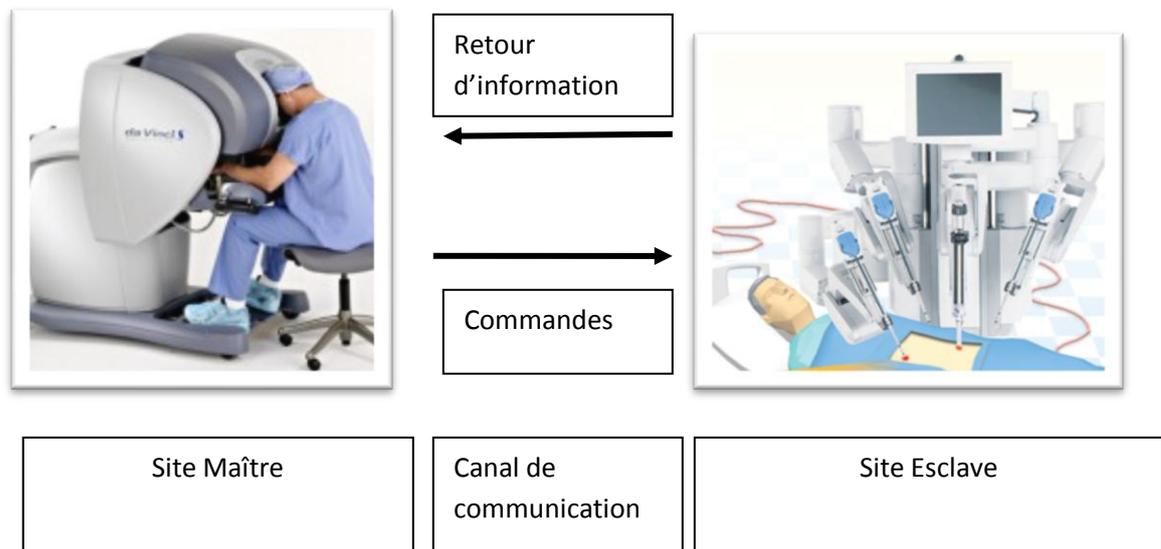


Figure 2.14: Le système de la téléchirurgie.

Ces systèmes ont comme caractéristique le fait que ça soit un être humain qui reste maître de l'intervention, ils sont de structure maître/esclave, puisque la console « maître » est pilotée par un opérateur humain et la structure « esclave » est représentée par le robot.

Le chirurgien est confortablement assis près de la table d'opération, et manipule les organes terminaux des bras articulés de la structure « maître » (figure 2.15.a).

Les mouvements qu'il effectue sont reproduits sur les bras robotisés de la structure esclave, qui est installée autour de la table d'opération. Il commande deux instruments endo-corporels (crochet coagulateur, ciseaux, pinces, porte-aiguille. . .) dont les extrémités sont articulées qui apporte sept degrés de liberté, reproduisant les degrés de liberté du membre supérieur humain). (Fig. 2.15.b)



Figure 2.5: (a) Un système télé opéré. (b) Les bras robotisés de la structure esclave.

Pour le patient, la robotique apporte tous les avantages (petites cicatrices, douleur réduite, retour plus rapide à la vie active), un résultat probablement meilleur du fait de la précision accrue du geste.

## 2.6 Robotique médicale non chirurgicale :

### 2.6.1 Anesthésie robotique : [49]

En anesthésie, l'administration de drogues anesthésiantes se fait par l'insertion de l'aiguille d'une seringue dans des veines de bras ou de la main. Cette tâche d'insertion veineuse est généralement effectuée par des personnes appartenant au corps hospitalier, mais pas nécessairement au corps médical, tels que les infirmiers, paramédicaux, etc. Ceux-ci ne garantissent pas la même qualité d'insertion qu'un médecin ou anesthésiste. De plus, les facteurs de risque (infections ou autres) présents pour un personnel non-qualifié sont assez élevés et la sécurité du personnel hospitalier et du patient est mise en jeu. L'utilisation d'appareils à ultrasons permet de visualiser les veines lors des ponctions et offre une meilleure qualité d'insertion de veine, et ainsi une meilleure qualité de soins au patient.

Ainsi, et à la base de ces idées, un projet a été conçu pour automatiser cette partie initiale de l'anesthésie et offrir à l'anesthésiste le temps nécessaire pour se consacrer aux tâches importantes et faire un suivi de l'état du patient. Ainsi, la veine sera détectée par une analyse d'images enregistrées par des ultrasons pour transmettre les coordonnées correspondantes à un système facilitant l'insertion automatique de l'aiguille de la seringue dans la veine visée. Par conséquent, les erreurs dues à la mauvaise détection visuelle de la veine et à une mauvaise

insertion consécutive de l'aiguille seront largement minimisées et le processus manuel remplacé par un système automatique.

- Méthodologie :

Un bras robotique effectue un balayage d'une sonde ultrasonique sur le bras. Cette vidéo est transférée à un ordinateur et des images fixes en sont analysées. La veine est détectée et ses coordonnées sont envoyées à un second bras robotique qui positionne une aiguille au-dessus du point d'insertion.

—Résultats : Deux bras robotiques sont construits : le premier effectue un balayage d'une sonde ultrasonique sur le site veineux ; et le second positionne l'aiguille au point d'insertion, puis y insère l'aiguille. (Fig.2.15)

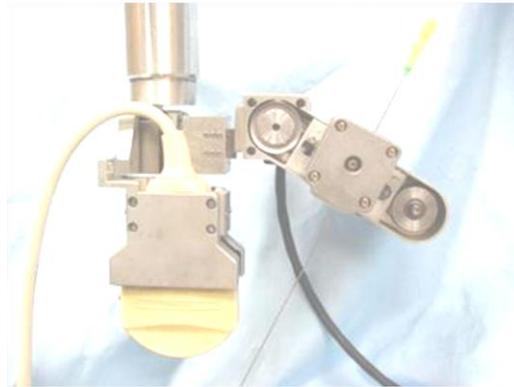


Figure 2.15: Insertion d'aiguille aidée par robot.

Premier bras robotique :[49]

Pour assurer un mouvement automatique, il est nécessaire de construire un système de bras robotiques manipulés par les lois de cinématique. Ce système, autonome en grande partie (l'anesthésiste devra quand même introduire des données et s'assurer de la sécurité et du fonctionnement correct), est mis en place pour différentes parties du corps humain et diverses applications dans le domaine de l'anesthésie.

Ainsi, un premier bras robotique devra assurer le mouvement automatique de la sonde d'ultrasons, qui survolera le bras du patient afin de contrôler les différentes prises de coupes successives sur le site à opérer. (Fig.2.16)

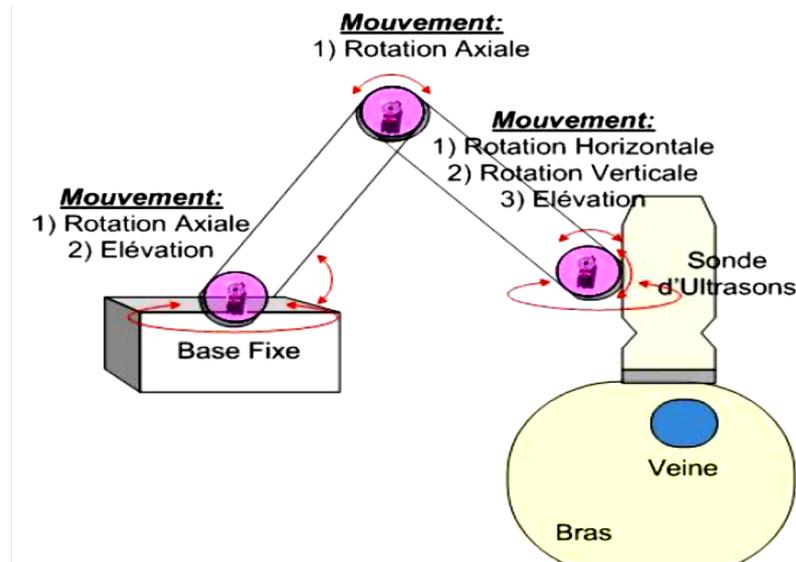


Figure 2.16: Schéma du premier bras robotique : Il assure les différents mouvements nécessaires au positionnement de la sonde d'ultrasons.

### Second bras robotique : [49]

Avec un squelette similaire au premier, le second bras robotique est activé pour insérer l'aiguille dans la veine détectée. Par contre, ce bras robotique est gouverné par les lois de cinématique inverse. En se basant sur les coordonnées détectées auparavant, les positions respectives des moteurs composant le second bras robotique sont déterminées. À chaque position correspond un angle de rotation du moteur en question. (fig.2.17)

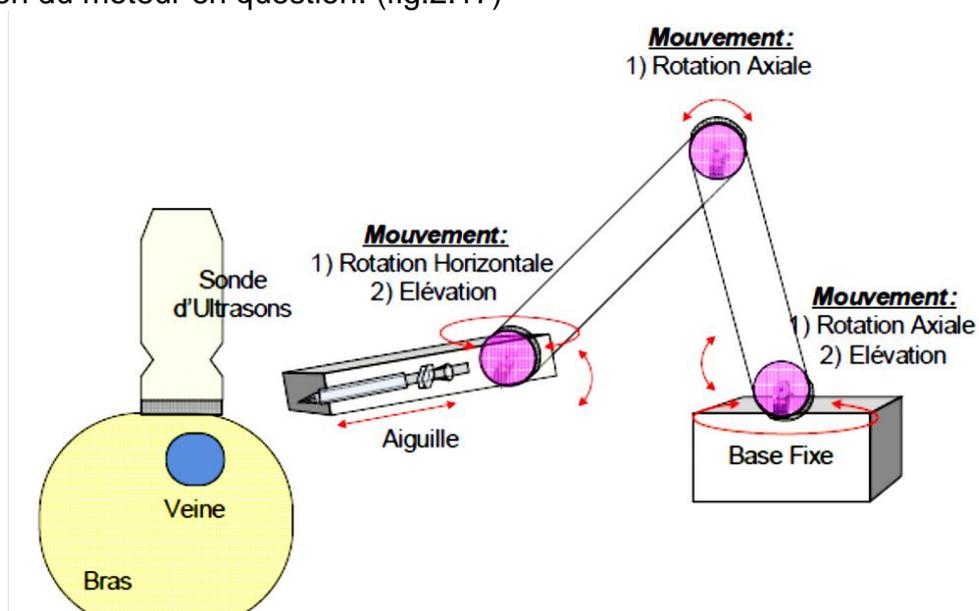


Figure 2.17: Schéma du second bras robotique : Il assure les différents mouvements nécessaires au positionnement de l'aiguille, et de leur insertion subséquente dans la veine.

2.6.2 Robots médicaux pour l'échographie (télé-échographie robotisée) :  
[33,50 et 51]

Un système de *télé-échographie* permet de faire un examen d'échographie à distance ; le patient se trouve sur un site éloigné de celui de l'expert médical qui rend le diagnostic. Un assistant, parfois un médecin, se trouve à côté du patient. Il participe aux opérations d'acquisition et de transmission des images échographiques par des liens de communication.

L'expert médical consulte, sur son écran, les images échographiques envoyées du site patient et rend son diagnostic.

*Un robot de télé-échographie* , permet à un spécialiste de pratiquer un examen à distance sur des sites manquant d'experts en échographie. C'est un système maître-esclave. L'expert est situé au poste maître. Il pilote à l'aide d'une sonde fictive le robot porteur de la sonde échographique situé au poste esclave. L'expert reçoit en retour, sur un écran de contrôle, l'image échographique du patient distant, ce qui lui permet d'élaborer son diagnostic.(figure 2.18)

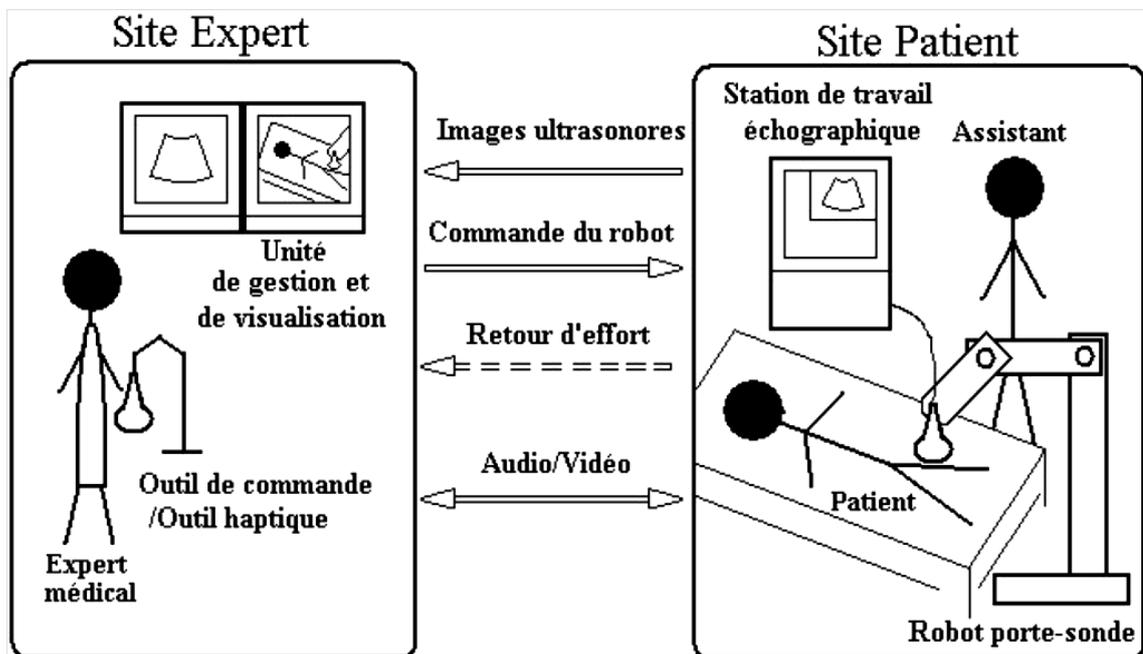


Figure 2. 18: Schématisation du principe d'un système de télé-échographie robotisée.

Remarque :

Plusieurs laboratoires de recherche et des industriels travaillent sur ce type de systèmes de télé-échographie robotisée ; ces systèmes seront présentés dans la suite.

- Analyse des composantes du déplacement de la sonde :

Le déplacement de la sonde ultrasonore réalisé pendant le balayage d'un organe est un déplacement à 6 degrés de liberté d'un solide dans l'espace. Sa contrainte est de rester appuyée contre la peau de patient. Soit  $F_s: (O_s; x_s, y_s, z_s)$  un repère attaché à la sonde (Fig.2.19 a), tel que est  $z_s$  suivant l'axe de symétrie de la sonde,  $y_s$  est perpendiculaire au plan ultrasonore,  $x_s$  est dirigé vers le repère latéral de la sonde et  $O_s$  se situe sur la surface extérieure de la sonde.

Soit :  $F_p: (O_p; x_p, y_p, z_p)$  un repère attaché à la peau (Fig.2.19b), où  $O_p$  est le point de la surface de contact peau/sonde se trouvant sur l'axe de symétrie de la sonde, nous l'appellerons *point de contact* ;  $z_p$  est suivant la normale à la peau et  $y_p$  est dirigé vers les pieds du patient.

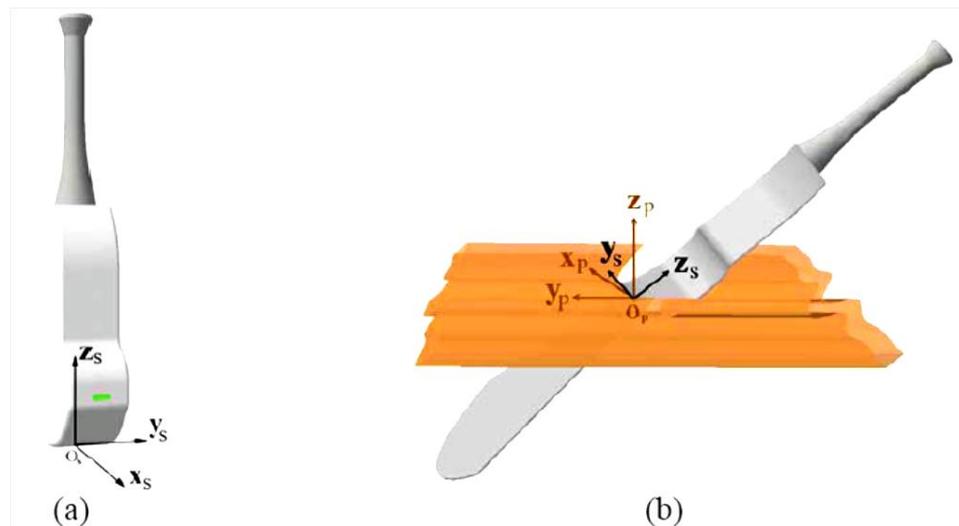


Figure 2. 19: (a) Sonde ultrasonore (b) Sonde ultrasonore en contact avec la peau.

Dans le déplacement de la sonde, nous distinguons les composantes suivantes :

- Une translation tangente à la peau, suivant un axe du plan tangent  $(x_p, y_p)$
- Une composition de trois rotations donnant un déplacement sphérique autour du point de contact  $O_p$ . Ce déplacement permet au médecin de trouver la meilleure incidence, et d'obtenir une image d'échographie contenant les informations qu'il cherche.
- Une translation suivant l'axe de symétrie de la sonde, l'axe  $z_s$ . Cette translation permet au médecin de maintenir la sonde en contact permanent avec la peau du patient.
- Une rotation de grande amplitude autour de l'axe de la sonde  $z_s$ . Elle permet soit de changer de coupe de l'organe balayé ou de commencer un nouveau balayage sur un organe voisin.

- Voies de recherche de mécanismes solutions : [10 et 48]

Après avoir identifié les besoins cinématiques et les caractéristiques jouant sur la capacité du robot à effectuer une tâche avec efficacité et sans risque.

La réalisation d'un déplacement sphérique par l'outil médical est un besoin commun à un grand nombre des robots médicaux. Le mécanisme sphérique est le plus adapté afin d'accomplir la tâche d'orientation de la sonde ultrasonore. (Fig.20)



Figure 2. 20: Mécanisme sphérique pour l'orientation de la sonde "télé-échographie"

Remarque : La modélisation cinématique de ce type de robot « mécanisme sphérique » sera présentée dans le chapitre 3.

## 2.7 Statistique et comparaison : [29]

Une analyse statistique a été menée en 2006. Elle montre la répartition des robots par domaine médical : ceux de chirurgie mini-invasive représentent 30 % de la population étudiée, ceux de neurochirurgie, d'orthopédie, d'échographie, de ponctions et de radiothérapie 15%

La structure Scara apporte un bon compromis entre l'espace de travail et la robustesse. Son espace de travail cylindrique est plus adapté, pour une utilisation au-dessus du patient allongé, que celui de la structure anthropomorphe qui est sphérique, elle est également plus sûre.

En prenant pour base les différentes possibilités d'applications médicales, les robots peuvent être définis comme étant semi-autonomes, guidés par l'humain, ou téléopérés (guidés à distance). Quel que soit le cas, les robots médicaux ont leurs avantages et leurs inconvénients face à l'être humain.

Tableau 2.1: Caractéristiques des humains et robots. Adapté de [52] :

Caractéristique	Rang	Humain	Rang	Robot
Coordination	-	Limité par les capacités du cerveau	+	Précise, basé sur des concepts géométriques
Intégration de l'information	+	Haute capacité limité par quantité /complexité.	+	Haute capacité limité par algorithme
Adaptabilité	+	Haute	-	Limité par design
Stabilité	-	Dégradation rapide (fatigue, concentration)	+	Dégradation lente (mécanique, algorithme)
Dextérité	+	Information captée par les 5 sens	+	Haute dextérité, limité par les senseurs attachés
Précision	-	Limitée	+	Selon le besoin
dimensions	-	Limité au corps humain	+	Selon le besoin
Échelle de travail	-	Limité par le corps humain	+	Selon le besoin
Bio hasards	-	Danger de radiation, infection.	+	Moins affecté par l'environnement
Spécialité	+	Générique	-	Tâches Spécialisées

### Conclusion :

La robotique médicale offre et promet un potentiel immense pour améliorer la précision et le travail du personnel médical au cours de diverses procédures.

L'idée de l'utilisation de robots pour prolonger la main du chirurgien est vieille de près de 30 ans. En médecine, comme dans beaucoup d'autres applications, les avantages potentiels d'un robot sont : sa précision, sa capacité à reproduire la même tâche indéfiniment, la possibilité de récupérer des données ou des informations d'un capteur, la capacité à opérer dans des environnements hostiles, etc.

C'est pourquoi, naturellement les tâches nécessitant de la précision géométrique, comme dans le cas de la neurochirurgie stéréotaxique ou de l'orthopédie, ont été les premières pour lesquelles le concept industriel d'automatisation robotisée a été appliqué.

## CHAPITRE3 : LA CINÉMATIQUE

### 3.1 Introduction (cinématique) : [22]

L'étude de la cinématique des robots existe depuis le début des années 1970 avec un développement spécialement important dans les années 80. Il faut toutefois noter que la grande majorité des ouvrages sur la robotique ne prennent en compte que l'étude de la cinématique des robots sériels, car ce sont les plus utilisés et les mieux maîtrisés dans le monde industriel.

De manière classique, la configuration d'un système mécanique est connue quand la position de tous ses points dans  $R_0$  est connue.

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.

L'accent a été mis, dans la deuxième partie du chapitre, sur l'étude des mécanismes robotisés dédiés au domaine médical, prenant l'exemple de la modélisation des systèmes à centre de rotation déporté, utilisé dans la chirurgie endoscopique (mini-invasive). Ainsi que l'exemple des mécanismes sphériques utilisés dans la télé-échographie.

### 3.2 Modélisation des robots : [53]

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

Les modèles de transformation entre l'espace opérationnel (dans lequel est définie la situation de l'organe terminal) et l'espace articulaire (dans lequel est définie la configuration du robot). Parmi ces modèles, on distingue :

- Les modèles **géométriques direct** et **inverse** qui expriment la situation de l'organe terminal en fonction de la configuration du mécanisme et inversement,
- Les modèles **cinématiques direct** et **inverse** qui expriment la vitesse de l'organe terminal en fonction de la vitesse articulaire et inversement.

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

#### 3.2.1 Modèle géométrique : [15,19 et 54]

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)"

**modèle géométrique direct** ; “comment trouver les valeurs de chaque articulation pour que l’outil du robot atteigne tel point de l’espace (position et orientation)” **modèle géométrique inverse**. (Fig. 3.1).

Le modèle géométrique du robot (qu’il soit direct ou inverse) est utile car il apporte une vision “globale” du comportement d’un robot.

Le modèle géométrique direct des robots sériels qui est aisé à obtenir fait intervenir des équations fortement non linéaires, comportant des fonctions trigonométriques. Par conséquent l’obtention du modèle géométrique inverse est forcément complexe, voire impossible.

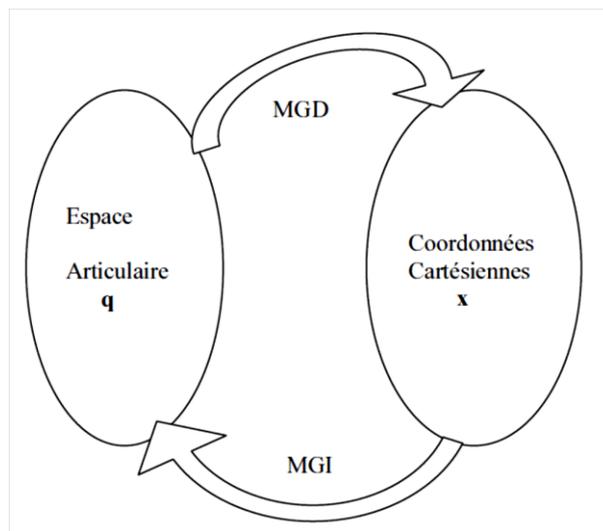


Figure 3. 1: Relation entre l’espace articulaire et l’espace des coordonnées cartésiennes de l’effecteur.

- Modèle géométrique direct (M.G.D) : [55,56,57,58,59 et 60]

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 :

$$x = f(q) \quad (3.1)$$

Où

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

$x = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T \in R^m$ : 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[42].

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.

### 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. [2,18,20,54 et 56]

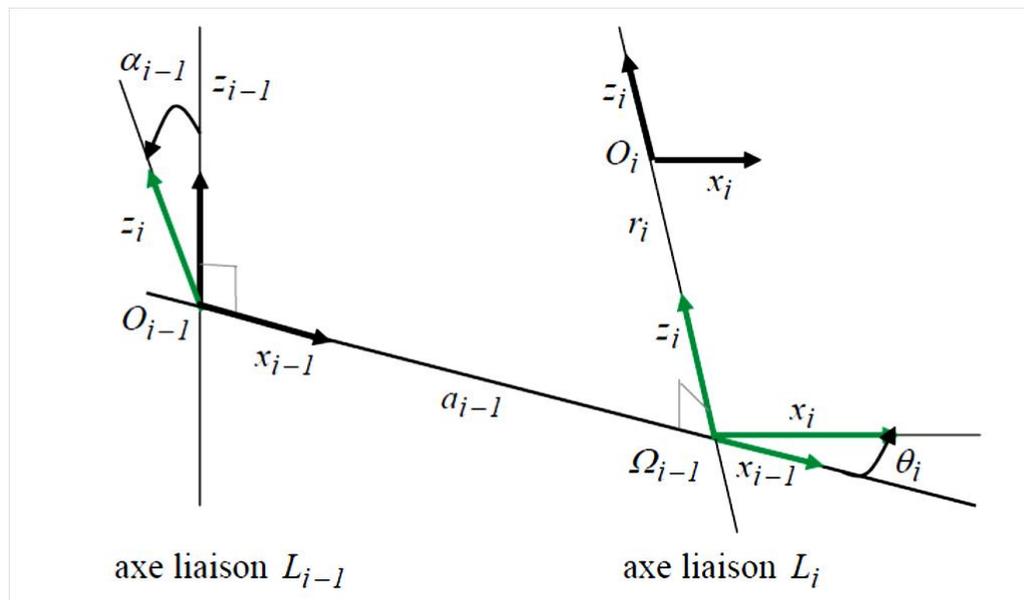


Figure 3. 2: définition des paramètres suivant Denavit-Hartenberg.

$\left. \begin{matrix} r_i \\ \theta_i \end{matrix} \right\}$  Variables articulaires

$\left. \begin{matrix} a_i \\ \alpha_i \end{matrix} \right\}$  Paramètres dimensionnels

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

- $\alpha_{i-1}$  : 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  $L_{i-1}$ ;
- $\theta_i$  : 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  $\sigma_i$  permet de distinguer les liaisons rotoïdes et prismatiques [59] :

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

Posons de plus :

$$\bar{\sigma}_i = 1 - \sigma_i$$

Ceci permet de définir l'ième coordonnée généralisé  $q_i$ .

$$q_i = \bar{\sigma}_i \theta_i + \sigma_i r_i$$

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 :

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

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

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

Soit:

$$T_{i-1,i} = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \cos \alpha_{i-1} \sin \theta_i & \cos \alpha_{i-1} \cos \theta_i & -\sin \alpha_{i-1} & -r_i \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \alpha_{i-1} \sin \theta_i & \sin \alpha_{i-1} \cos \theta_i & \cos \alpha_{i-1} & r_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Qui prend la forme :

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

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 3.3).

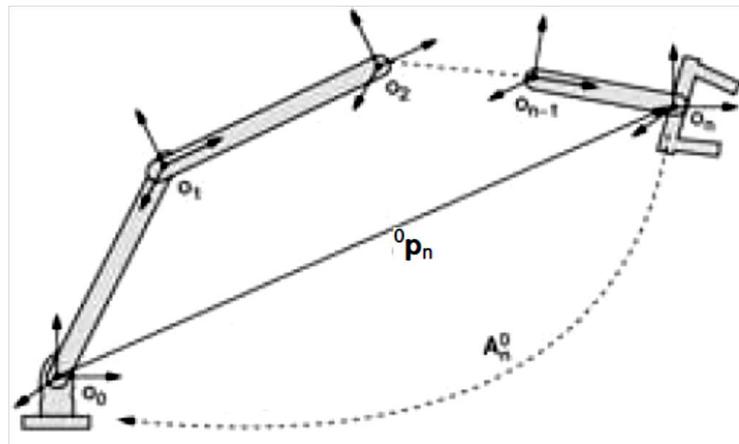


Figure 3. 3: La transformation du repère de l'outil par rapport au repère de l'atelier.

$${}^0T_n = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \dots {}^{n-2}T_{n-1} \cdot {}^{n-1}T_n = \prod_{i=1}^n {}^{i-1}T_i \quad (3.2)$$

- Le modèle géométrique inverse (M.G.I) : [18,23]

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 :

$$q = f^{-1}(x) \quad (3.3)$$

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.3.4).

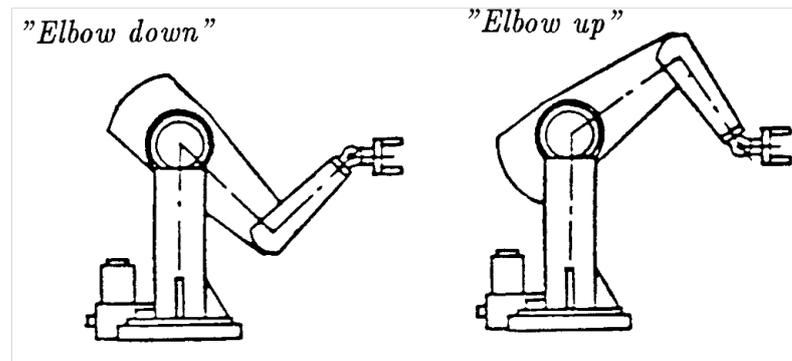


Figure 3. 4: Exemple de configurations multiples conduisant à la même position de l'organe d'extrémité (PUMA 560).

Il existe un certain nombre de méthodes pour calculer le modèle géométrique inverse, notamment la méthode de Paul qui traite séparément chaque cas particulier et qui convient pour la plupart des robots industriels.

#### La méthode de Paul :

La méthode consiste à pré-multiplier successivement les deux membres de l'équation par les matrices  ${}^i T_{i-1}$  pour  $i$  variant de 1 à  $n$ . Cette opération permet d'isoler et d'identifier l'une après l'autre, les variables articulaires.

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

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

La méthode de Paul permet la détermination de  $q_1$ , puis  $q_2$  et ainsi de suite jusqu'à  $q_n$ . Il s'agit de déplacer l'une après l'autre chacune des variables articulaires ( $q_1 \dots q_n$ ) dans le membre de gauche de l'équation. Pour cela, on multiplie par  ${}^i T_{i-1}$  (en prenant successivement ( $i = 1 \dots n - 1$ ) de part et d'autre dans l'équation.

#### 3.2.2 Modèle cinématique : [61]

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.

- Modèle cinématique directe :

Le modèle est décrit par l'équation :

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (3.4)$$

Où  $J(q) \in R^{m \times n}$  est la matrice Jacobienne.

La matrice Jacobienne : [22]

L'outil principalement utilisé pour traiter le problème de la cinématique des robots est la matrice Jacobienne. 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) :

$$\begin{aligned} X_1 &= f_1(q_1, q_2, \dots, q_m) \\ X_2 &= f_2(q_1, q_2, \dots, q_m) \\ &\dots\dots\dots \\ X_n &= f_n(q_1, q_2, \dots, q_m) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Où  $x$  représente le vecteur de la position de l'organe terminal dans l'espace de la tâche, et  $q$  le vecteur des coordonnées articulaires.

On peut simplifier l'écriture en mettant (3.5) sous forme vectorielle :

$$X = f(q) \quad (3.6)$$

Si maintenant nous différencions l'équation (3.1), nous obtenons:

$$\begin{aligned} \delta X_1 &= \frac{\delta f_1}{\delta q_1} \delta q_1 + \frac{\delta f_1}{\delta q_2} \delta q_2 + \dots + \frac{\delta f_1}{\delta q_m} \delta q_m \\ \delta X_2 &= \frac{\delta f_2}{\delta q_1} \delta q_1 + \frac{\delta f_2}{\delta q_2} \delta q_2 + \dots + \frac{\delta f_2}{\delta q_m} \delta q_m \\ &\dots\dots\dots \\ \delta X_n &= \frac{\delta f_n}{\delta q_1} \delta q_1 + \frac{\delta f_n}{\delta q_2} \delta q_2 + \dots + \frac{\delta f_n}{\delta q_m} \delta q_m \end{aligned}$$

Ou sous forme condensée :

$$\delta X = \frac{\delta f}{\delta q} \delta q \quad (3.7)$$

Nous posons alors comme définition de la matrice Jacobienne J :

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

En divisant les deux côtés de l'équation (3.4) par l'élément différentiel de temps, on peut voir la matrice Jacobienne comme l'opérateur reliant les vitesses cartésiennes  $\dot{X}$  aux vitesses articulaires  $\dot{q}$ .

Si les fonctions  $f_1 \dots f_n$  sont non linéaires, alors leurs dérivées partielles sont en fonction de  $q_i$ . La matrice jacobienne est donc un opérateur linéaire dépendant de la position instantanée du robot.

- 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 :

$$\dot{q} = J^{-1}(q)\dot{x} \quad (3.8)$$

La solution de l'équation (3.8) 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. [40]

On déduit donc, par dérivation des relations (3.4) et (3.8) les modèles cinématiques directs et inverses du second ordre qui lient les accélérations articulaires  $\ddot{q}$  et cartésiennes  $\ddot{X}$ :

$$\ddot{X} = J(q)\ddot{q} + \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q} \quad (3.9)$$

$$\ddot{q} = J^{-1}(q)[\ddot{X} - \dot{J}(q, \dot{q})\dot{q}] \quad (3.10)$$

### 3.3 Cinématique des robots dédiés au domaine médical : [62]

La robotique médicale s'oriente aujourd'hui vers des systèmes légers de moindre coût qui se montent directement sur le patient afin de résoudre le problème des mouvements relatifs du patient et de la base du robot. Ces systèmes présentent moins de risques que les structures usuelles issues de la robotique industrielle. Ils sont moins lourds, plus lents et donc moins dangereux pour le patient et leur zone de travail est réduite à la zone d'opération. Ils prennent donc moins de place, ce qui est appréciable dans une salle d'opération.

#### 3.3.1 Cinématiques d'un bras à centre de rotation déporté pour la chirurgie Mini-Invasive : [56 et 62]

En Chirurgie Mini-Invasive (C.M.I), le chirurgien manipule l'instrument autour du point d'incision qui correspond au point d'entrée du trocart dans l'abdomen du patient. Si un instrument rigide sans mobilités internes est utilisé, si l'on néglige les déformations de la paroi abdominale, les gestes du chirurgien se trouvent alors contraints à 4 degrés de liberté (ddl) à l'intérieur du patient.

En Robotique Chirurgicale mini-invasive (R.C.M.I), c'est le robot qui doit manipuler l'instrument autour du point d'incision. Il faut s'assurer qu'aucun effort susceptible d'endommager l'abdomen du patient ne sera appliqué en ce point. Pour ce faire, le point d'incision est considéré (approché) comme un point fixe (rotule-glissière), autour duquel doit être manipulé l'instrument. (Fig.3.5)

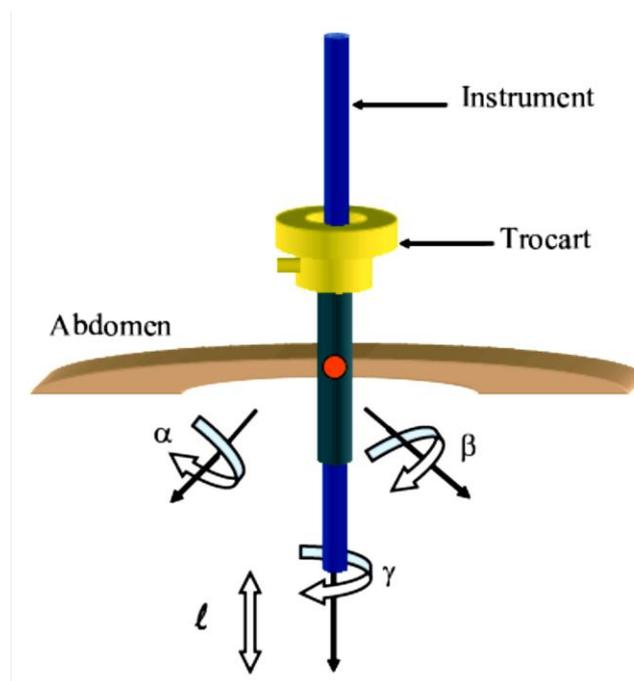


Figure 3. 5 : Degrés de liberté à l'intérieur du patient en C.M.I.

Le geste chirurgical peut être décomposé en deux sous-tâches bien distinctes : d'une part la phase de "couture" qui consiste à faire passer l'aiguille de suture à travers les tissus à suturer, et d'autre part la réalisation de nœuds avec le fil de suture. Le passage d'aiguille dépend fortement des configurations géométriques.

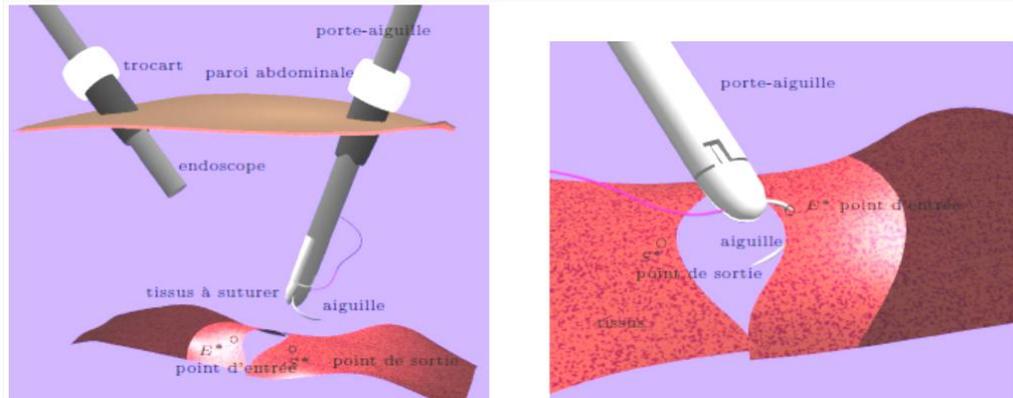


Figure 3. 6: À gauche : vue globale de l'installation des aiguilles. À droite : vue locale pendant le passage de l'aiguille.

### 3.3.2 Mécanisme sphérique pour l'orientation de la sonde (télé-échographie) :

- Modélisation d'une structure sphérique : [62]

Le mécanisme de cette structure est constitué de trois articulations rotoïdes à axes concourants  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_3$ . L'angle entre les axes de  $R_1$  et  $R_2$  est noté par  $\alpha_1$  et entre les axes de  $R_2$  et  $R_3$  par  $\alpha_2$  (Fig.3.7).

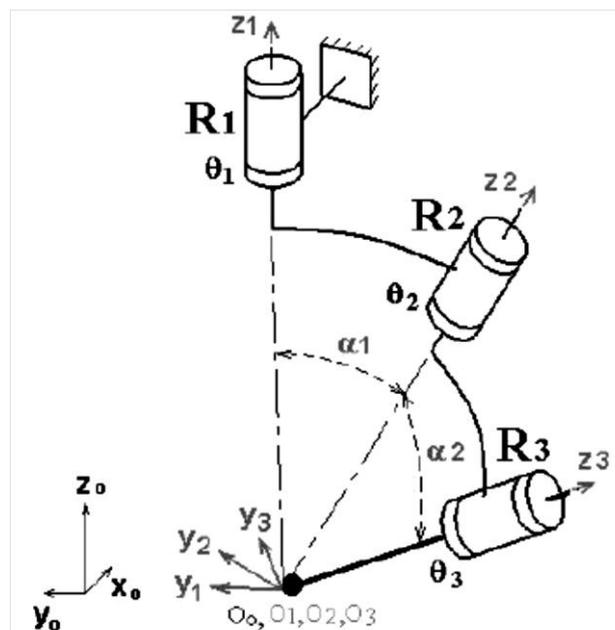


Figure 3.7: Structure sphérique série à trois liaisons rotoïdes à axes concourants.

### Modèle géométrique :

Il donne la relation entre les variables opérationnelles,  $X$  représentant la position/orientation de l'organe terminal et les variables articulaires  $q$  qui représentent les translations et les rotations des liaisons articulaires du robot.

Le vecteur des variables opérationnelles  $X$  est défini par :

$$X = [p_x \ p_y \ p_z \ s_x \ s_y \ s_z \ n_x \ n_y \ n_z \ a_x \ a_y \ a_z]^T \quad (3.11)$$

$$\text{Où } P \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$P$  est le vecteur position de l'origine du repère lié à l'organe terminal par rapport au repère fixe  $F_0 : (O_0; X_0, Y_0, Z_0)$

et :

$$R = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x \\ s_y & n_y & a_y \\ s_z & n_z & a_z \end{bmatrix} = [s \ n \ a] \quad (3.13)$$

$R$  est la matrice d'orientation de l'organe terminal exprimée par les cosinus directeurs (en fonctions des trois angles d'Euler  $\alpha$ ,  $\theta$  et  $\psi$ ). (Voir la détermination de cette matrice dans le chapitre 1).

Les variables articulaires pour ce mécanisme sont les angles de rotation des liaisons rotoïdes :  $\theta_1, \theta_2$  et  $\theta_3$ . Le vecteur des variables articulaires  $q$  est :

$$q = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Le modèle géométrique direct donne les variables opérationnelles  $X$  en fonction des variables articulaires  $q$  :

$$X = f(q) \quad (3.15)$$

Le modèle géométrique inverse donne les variables articulaires  $q$  en fonction des variables opérationnelles  $X$  :

$$q = f^{-1}(x) \quad (3.16)$$

Pour déterminer ces modèles, nous lions à chaque corps solide de la structure un repère  $F_i : (O_i; X_i, Y_i, Z_i)$  en respectant la convention de Denavit-Hartenberg.

(Voir les axes des repères  $F_1, F_2$  et  $F_3$  dans la figure 3.11). Puis, nous écrivons les matrices de passages entre les repères liés aux corps successifs. Dans la structure sphérique étudiée, les origines de tous les repères sont pris au centre de

rotation de la structure, les distances entre ses origines sont toujours nulles, nous nous limitons donc aux matrices de rotation.

En utilisant les notations suivantes :

$Ca=\cos(a)$ ,  $Sa=\sin(a)$ ,

$$R_{x_a} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & Ca & -Sa \\ 0 & Sa & Ca \end{bmatrix} \text{ et } R_{z_a} = \begin{bmatrix} Ca & -Sa & 0 \\ Sa & Ca & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Les matrices de passages de la structure s'écrivent:

$$R_1^0 = R_{Z_{\theta_1}}, R_2^1 = R_{Z_{\alpha_1}} R_{Z_{\theta_2}} \text{ et } R_3^2 = R_{X_{\alpha_2}} R_{Z_{\theta_3}} \quad (3.18)$$

Soit

$$U_s = \begin{bmatrix} s_x & n_x & a_x \\ s_y & n_y & a_y \\ s_z & n_z & a_z \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

La matrice d'orientation de l'organe terminal dans l'espace opérationnel, le modèle géométrique s'obtient de l'égalité :

$$R_3^0 = R_1^0 R_2^1 R_3^2 = U_s \quad (3.20)$$

Qui donne la relation suivante :

$$R_{Z_{\theta_1}} R_{Z_{\alpha_1}} R_{Z_{\theta_2}} R_{X_{\alpha_2}} R_{Z_{\theta_3}} = U_s \quad (3.21)$$

Les variables articulaires se calculent en fonction des variables opérationnelles donnant les relations suivantes :

$$\begin{aligned} * \theta_2 &= \arccos\left(\frac{C\alpha_1 C\alpha_2 - a_z}{S\alpha_1 S\alpha_2}\right), \\ * \theta_1 &= -\text{atan2}(S\theta_2 S\alpha_2, C\theta_2 C\alpha_1 S\alpha_2 + S\alpha_1 C\alpha_2) + \text{atan2}(a_x, -a_y), \\ * \theta_3 &= -\text{atan2}(S\theta_2 S\alpha_1, C\theta_2 C\alpha_2 S\alpha_1 + S\alpha_2 C\alpha_1) + \text{atan2}(s_z, n_z). \end{aligned} \quad (3.22)$$

Espace de travail : [63]

L'espace de travail représente l'ensemble des positions et orientations accessibles par le repère lié à l'organe terminal. Ici, l'espace de travail concerne seulement l'orientation de l'organe terminal dans l'espace.

Pour la structure étudiée, nous considérons que chaque variable articulaire  $\theta_i$  pour  $i = 1,2,3$  prend ses valeurs dans l'intervalle  $[0,2\pi]$ . L'espace de travail accessible par l'axe  $z_3$  est une région de la sphère unitaire limitée par les deux courbes  $f_1(a_z) = 0, f_2(a_z) = 0$ , (Figure 3.8a et Figure 3.8b). La structure atteint ses configurations singulières sur ces courbes. Pour déterminer les expressions de  $f_1(a_z), f_2(a_z)$ , nous remarquons, à partir de (3.22), que le modèle géométrique inverse donne une solution réelle aux variables articulaires lorsque l'inégalité suivante est vérifiée :

$$-1 \leq C\theta_2 \leq 1 \quad (3.23)$$

En substituant par l'expression obtenue dans (3.23) nous obtenons :

$$C(\alpha_1 + \alpha_2) \leq a_z \leq C(\alpha_1 - \alpha_2) \quad (3.24)$$

Alors les deux courbes sont données par les équations :

$$a_{z1} = C(\alpha_1 + \alpha_2) \text{ et } a_{z2} = C(\alpha_1 - \alpha_2) \quad (3.25)$$

L'espace de travail est la région de la sphère unitaire limitée par les deux plans parallèles au plan  $(x_0, y_0)$  et qui coupent l'axe  $z_0$  en  $a_{z1}$  et  $a_{z2}$ . (Fig.3.8)

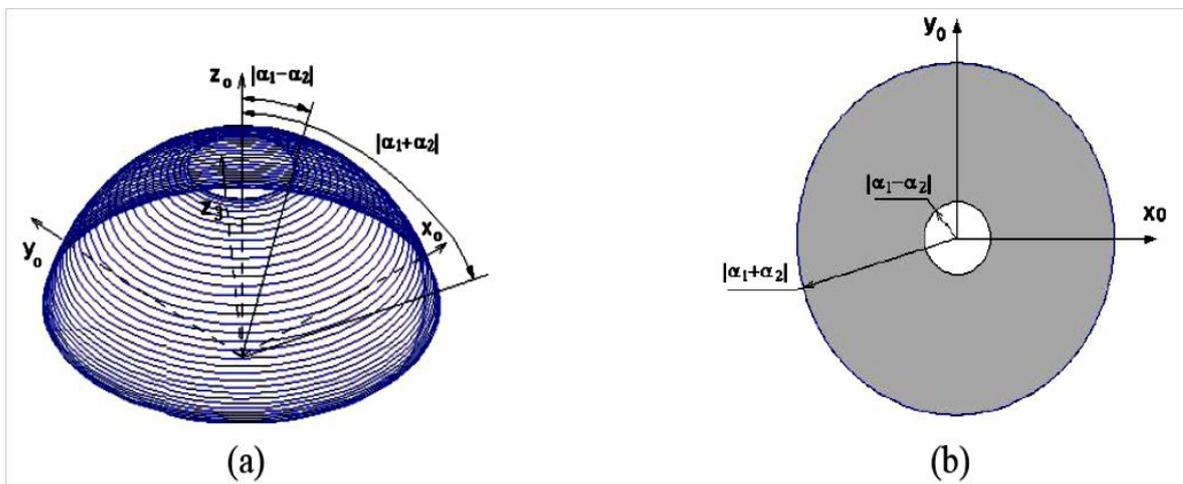


Figure 3.8: Espace de travail d'une structure sphérique série, (a) représentation dans l'espace et (b) représentation dans le plan.

## Conclusion :

Pour modéliser un système, c'est-à-dire gouverner ses sorties, il faut prévoir le comportement du système, en réponse aux différentes excitations d'entrée 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.

Dans la deuxième partie du chapitre 3, on a pris un exemple de la cinématique d'un robot dédié au domaine médical : exemple (la chirurgie mini-invasive), il ne s'agit pas d'un bras manipulateur préprogrammé, mais plutôt d'un bras passif manipulé directement par le chirurgien, dans le but d'opérer un patient sans avoir besoin d'effectuer des ouvertures, à la place on introduit deux bras manipulateur passifs, à l'intérieur, avec des degrés de liberté suffisants pour effectuer l'acte chirurgical.

La modélisation d'un mécanisme sphérique utilisé dans le domaine médical (télé-échographie) a été présentée à la fin de ce chapitre.

## CHAPITRE 4 : LA GEOMETRIE

### Génération de trajectoire

#### 4.1 Introduction : [64, 65,66et 67]

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.

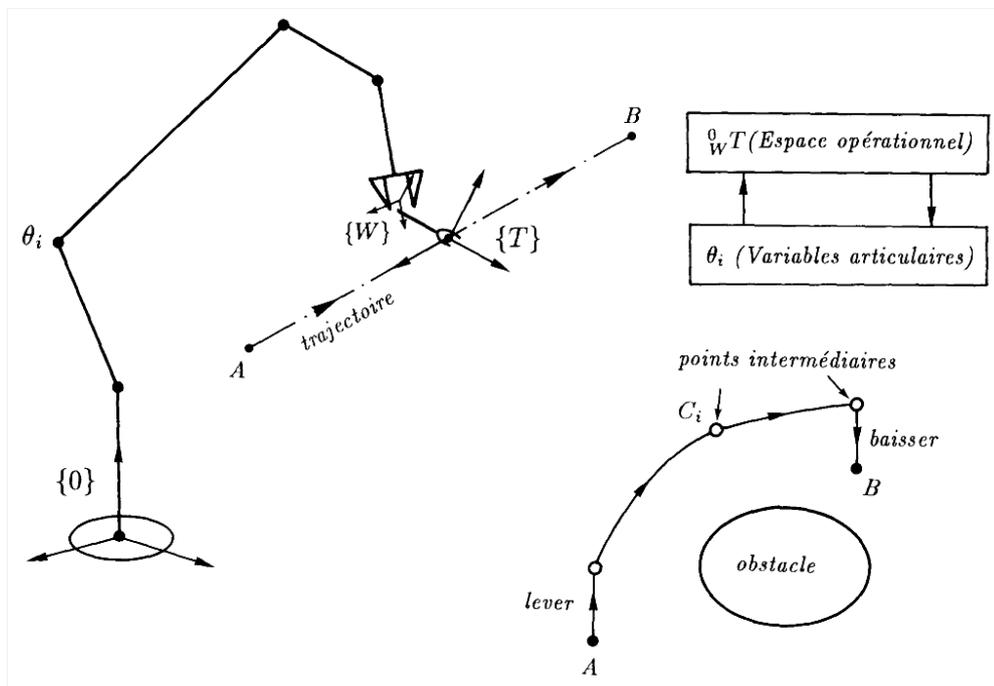


Figure 4. 1 Génération de trajectoire.

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

#### 4.2 Génération en variables articulaires : [68 et 69]

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.

### Trajectoire cubique : [70]

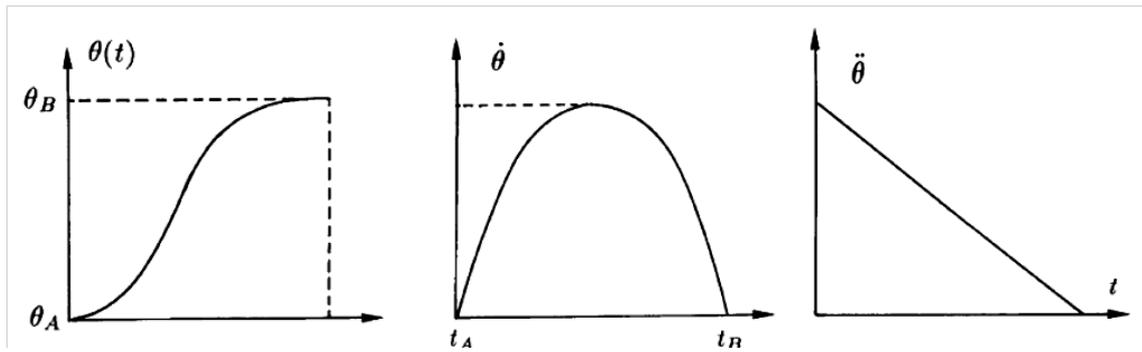


Figure 4. 2 Trajectoire cubique. Variable articulaire, vitesse, accélération.

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 :

$$\begin{aligned}\theta(t) &= a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 \\ \dot{\theta}(t) &= a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2 \\ \ddot{\theta}(t) &= 2a_2 + 6a_3t\end{aligned}$$

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

### Spline cubique : [70]

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.

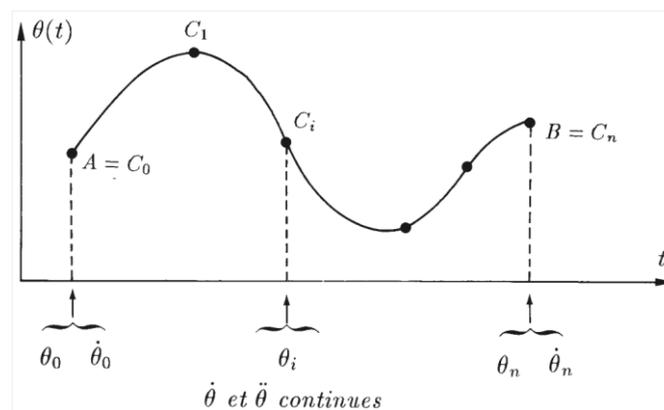


Figure 4. 3 Interpolation par spline cubique.

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

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

Interpolation linéaire avec transition parabolique : [65 et 66]

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

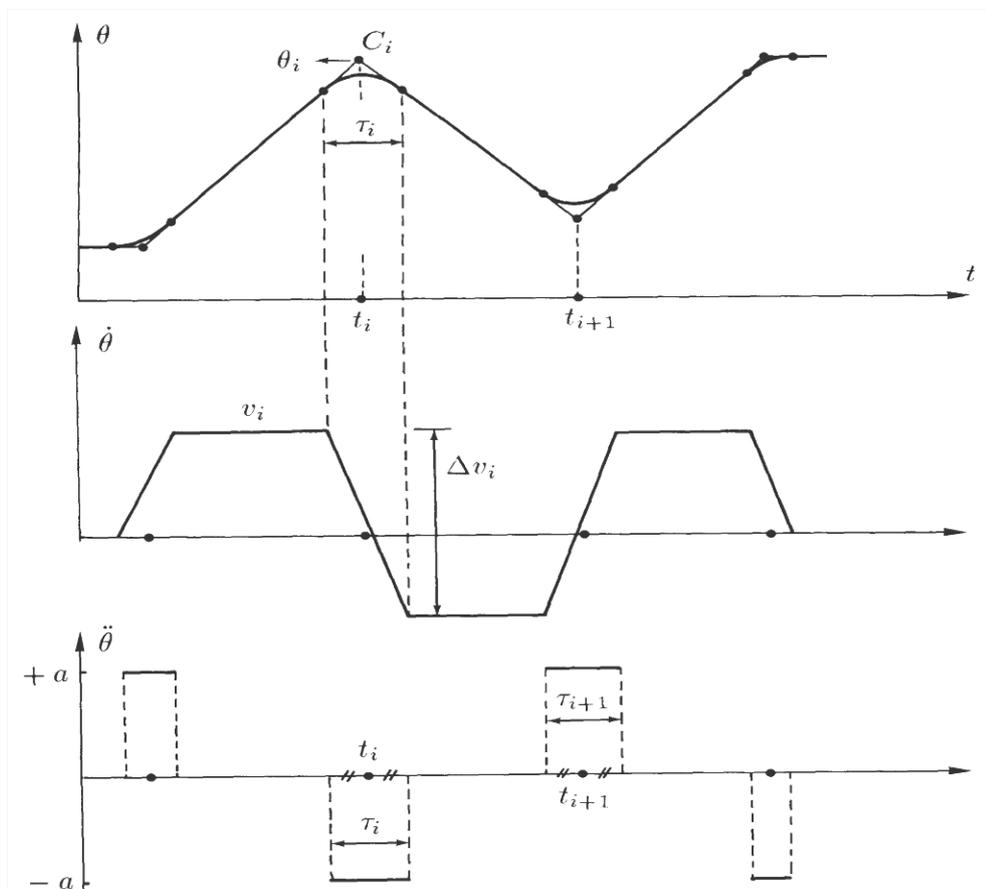


Figure 4. 4 Interpolation linéaire avec transition parabolique

Se référant à la figure 4.4, les données du problème sont les points intermédiaires  $(\theta_i, t_i)$ . 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.

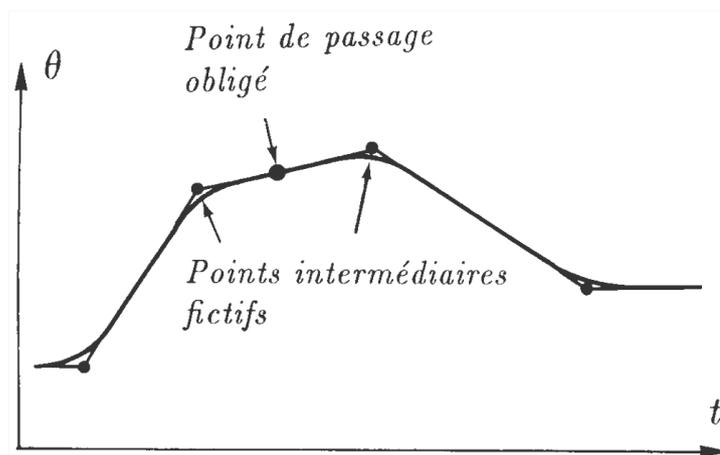


Figure 4. 5 Point de passage obligé.

### 4.3 Génération dans l'espace cartésien : [70 et 71]

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

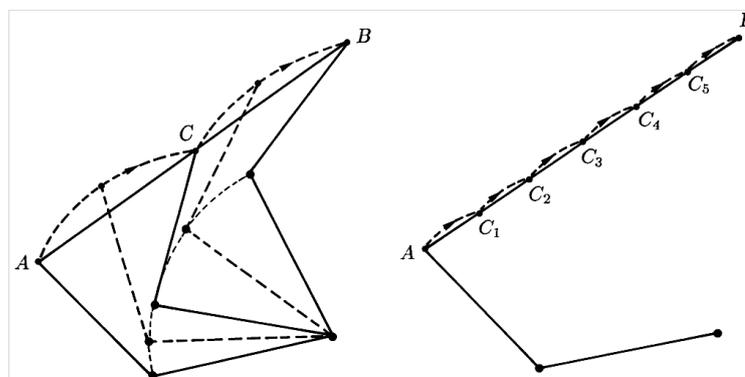


Figure 4. 6 Trajectoire rectiligne générée dans l'espace des coordonnées articulaires ; (a) 1 point intermédiaire ; (b) 5 points intermédiaires.

(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 : [72, 73]**

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.

Principe et concepts de base : [74]

Le planificateur de trajectoire a pour tâche, comme le montre sa représentation de fonctionnement (fig. 4.8) de planifier une trajectoire pour le robot entre deux

configurations arbitraires sans collision avec les obstacles dans un environnement complexe et contraint géométriquement (présence d'obstacles).

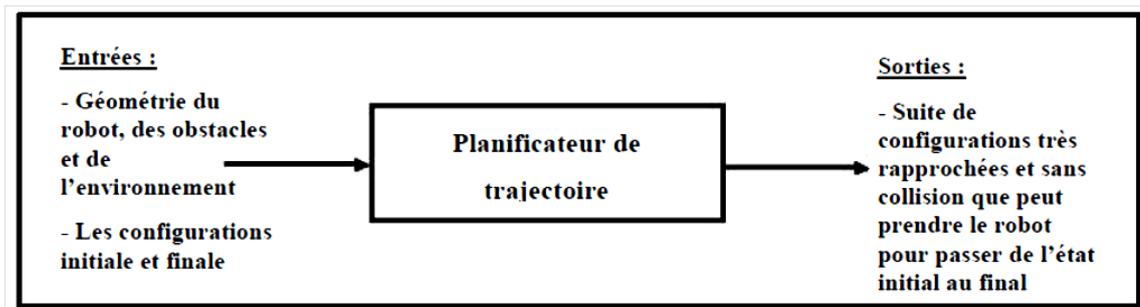


Figure 4. 7 Représentation du fonctionnement d'un planificateur de trajectoire FPMR

#### Les différentes méthodes de planification de trajectoire : [74]

Le problème de planification de mouvement consiste à calculer une trajectoire pour un robot entre une position initiale et une autre finale. Il peut être sommairement posé de la façon suivante :

Étant donné un robot évoluant dans un environnement parsemé d'obstacles. Trouver s'il existe un mouvement amenant ce robot d'une position à une autre respectant ces contraintes cinématiques tout en évitant les obstacles.

Les nouvelles méthodes de planification dites « méthodes probabiliste », permettent de faire face à la complexité exponentielle du problème. Par ailleurs, elles vérifient une propriété de complétude probabiliste (garantissant en probabilité de trouver une solution en temps fini, lorsqu'il existe). Certes cette propriété est moins forte que la complétude déterministe vérifiée par les méthodes exactes, mais ces nouvelles approches sont désormais moins sensibles à la dimension de l'espace de recherche et s'avèrent très efficaces en pratique.

#### Les méthodes probabilistes : [74, 75]

La technique développée se décompose en trois phases : phase d'apprentissage, phase de recherche et une phase de lissage des chemins. La figure (4.9) illustre les trois étapes d'une méthode probabiliste classique permettant la résolution d'un problème de planification de mouvement.

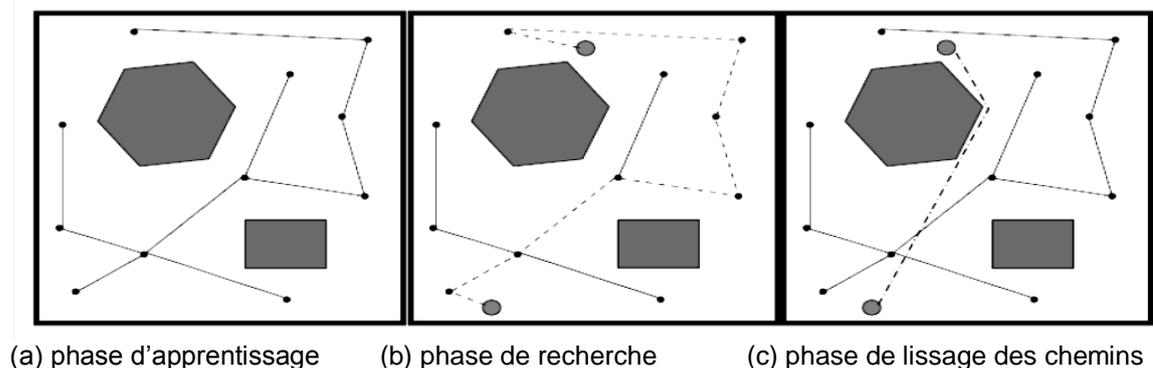


Figure 4. 8 les trois étapes d'une méthode probabiliste classique

Pour illustrer cette méthode, nous utilisons la figure 4.10. Dans cette figure on voit bien les deux modes :

Le premier mode de recherche en profondeur permet d'évoluer vers le but lorsqu'il n'y a pas d'obstacle, ni de singularité au voisinage du robot. Le deuxième mode est un mode de recherche en largeur. Il est actif au voisinage d'une position singulière ou d'un obstacle.

Il existe deux stratégies de contournement de l'obstacle. La première stratégie consiste à aller vers le haut et la deuxième consiste à aller vers le bas. Le mode de recherche en largeur explore les deux stratégies jusqu'à atteindre la position C. Dans cette position, l'obstacle ne gêne plus le robot pour atteindre son but. La meilleure stratégie dans ce cas, consiste à contourner vers la droite. Dans la position C, le mode de recherche en profondeur est repris jusqu'à la position G.

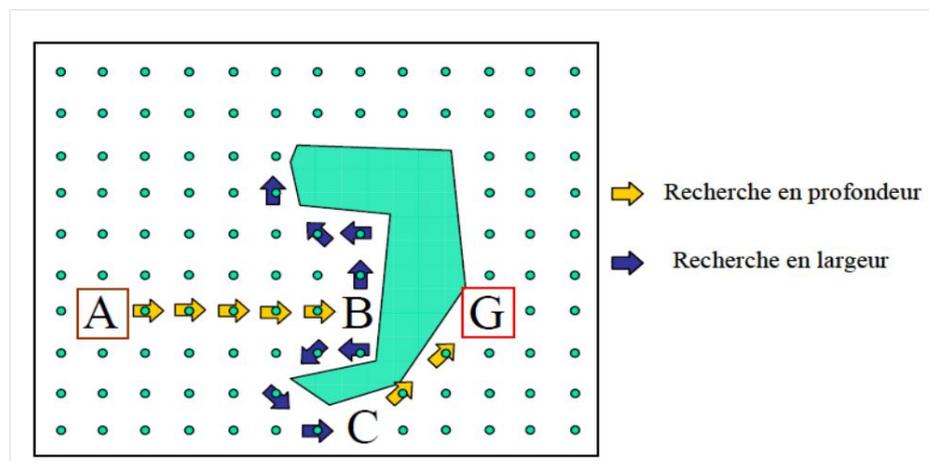


Figure 4. 9 Alternance entre les modes de recherche en profondeur et en largeur.

Les méthodes Déterministes (Méthode de décomposition en cellules) : [74, 75 et 76]

Ce type d'approche est fondé sur la décomposition géométrique de l'espace libre sous forme de cellules adjacentes. Le fonctionnement général de cette méthode se déroule en trois étapes successives (fig. 4.11).

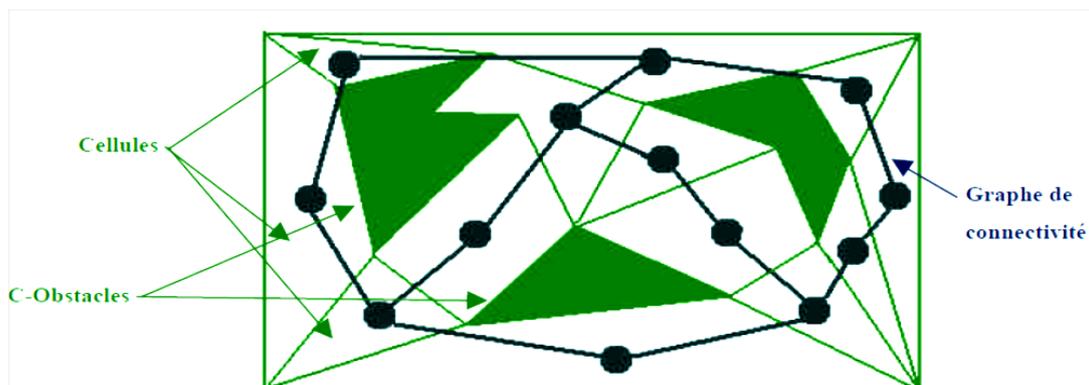


Figure 4. 10 : Méthode de décomposition en cellules.

Premièrement, on représente *Cfree* sous la forme d'une collection de cellules adjacentes avec le respect de la condition suivante : la planification entre deux configurations dans la même cellule doit être facile. En second lieu, on construit un arbre appelé graphe de connectivité représentant l'adjacence entre ces cellules. Finalement et en dernier lieu, on localise les cellules contenant les configurations initiales et finales et on parcourt l'arbre pour trouver une séquence de cellules adjacentes les reliant.

## **Conclusion**

L'utilisation courante des manipulateurs dans l'exécution des tâches répétitives fait que les recherches se sont naturellement orientées vers la planification de mouvements minimisant un coût relatif essentiellement le rendement du robot et son fonctionnement. Cette idée générale a conduit à la formulation du problème de planification.

Dans ce chapitre on a abordé 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 a proposé par la suite les méthodes utilisées pour résoudre ce problème, ainsi que les méthodes probabilistes et déterministes.

## CHAPITRE 5 : APPLICATION.

### 5.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous proposons une démarche pour aider au choix de conception de robot pour des applications médicales. A partir d'une étude menée sur le domaine d'application du robot, pour avoir une vision globale de l'acte chirurgical ainsi que les contraintes de conception et d'utilisation de ces mécanismes.

Certaines applications médicales comme la télé-échographie ou l'anesthésie robotisée imposent que le robot utilisé soit compact et léger pour être facilement transportable ou portable par une personne.

Nous pouvons préconiser a priori des solutions fiables qui ont déjà largement été utilisées dans diverses applications. Les solutions de structure série classique anthropomorphe peuvent être retenues.

- Objectif du projet

L'objectif principal de ce projet est d'étudier la cinématique d'un système robotisé qui effectue une analyse d'images ultrasons afin d'assurer la détection automatique d'une veine et d'en ressortir ses coordonnées. Ce système est un robot manipulateur articulé qui assure avec précision le mouvement qui permettra à une seringue l'insertion de l'aiguille dans la veine préalablement détectée pour y injecter des agents anesthésiants. (Voir les détails de ce domaine dans le chapitre2)

Ainsi, cet objectif est réparti en deux sous-objectifs :

1. Étude d'un système mécanique pour aider une sonde ultrasons à balayer un site prédéfini pour y détecter une veine (Problème de la géométrie directe) (Fig.4.1(a)).

2. Étude d'un système mécanique pour placer l'aiguille sur la veine détectée (Problème de la géométrie inverse) (Fig.4.1(b)).

Pour pouvoir effectuer les deux tâches on opte pour une solution simplifiée, comme l'utilisation de deux robots manipulateurs à deux degrés de liberté du type RR, un d'eux fait balayer la sonde ultrason, et une fois la veine est détectée, la position de l'insertion est bien défini, le deuxième prendre les informations (position) pour positionner l'aiguille.

Cependant on peut avoir des coordonnées dans l'espace, où un robot à 2ddl ne peut pas y arriver, c'est la raison pour laquelle on va proposer une deuxième solution, prenant un robot anthropomorphe à 3 ddl qui peut se déplacer dans l'espace.

Pour vérifier les résultats théoriques, on va utiliser le logiciel CATIA V5 qui va nous calculer les déplacements en fonction de variations des angles. Une comparaison par la suite va être présentée entre les valeurs calculés par le MATLAB et celles simulées sur CATIA V5, entre les trajectoires et aussi entre les deux configurations (elbow up et elbow down) dans le cas de la géométrie inverse.

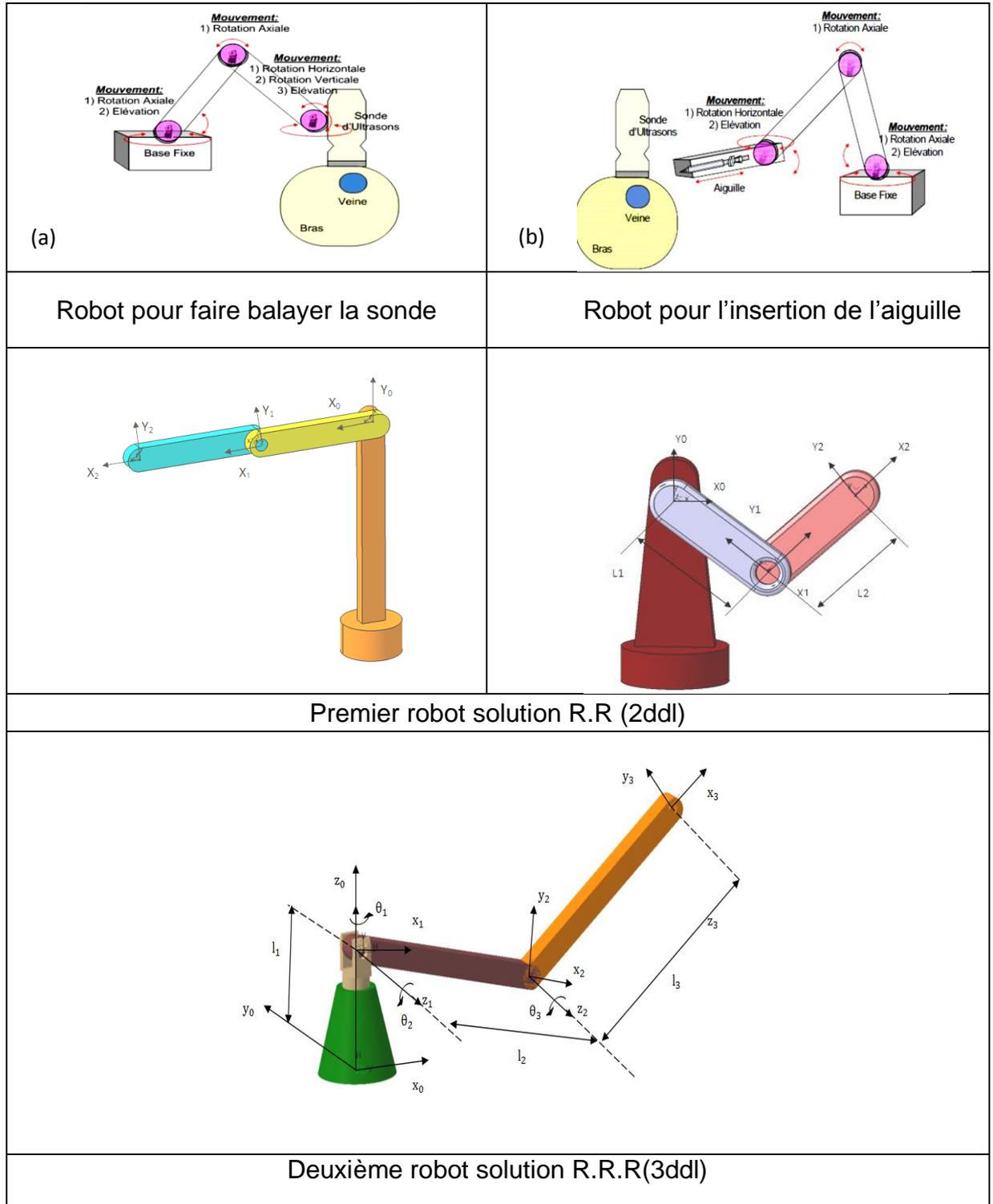


Figure 5. 1: Les deux robots proposés pour l'anesthésie robotique.

## 5.2 Problème de la cinématique :

### 5.2.1 Chaîne cinématique :

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.5.2) permet de comprendre cette architecture.

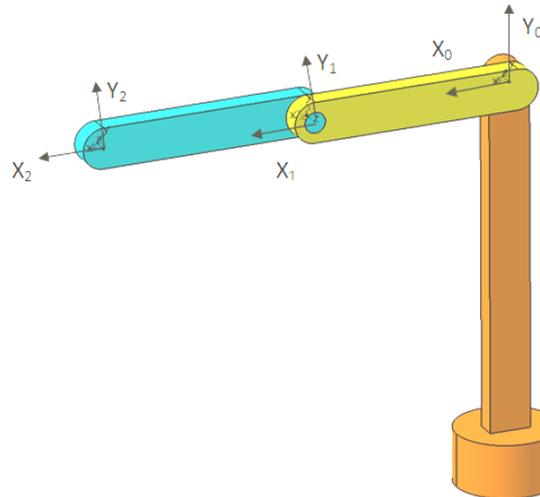


Figure 5. 2: Architecture de la chaîne cinématique du manipulateur à structure RR.

### 5.2.2 Les 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 5. 1: Paramètres géométriques de robot (R.R).

Type de couple	Valeur des paramètres			
	$\theta_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$a_i$
Rotatif	$\theta_1$	0	0	$l_1$
Rotatif	$\theta_2$	0	0	$l_2$

### 5.2.3 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.5.2). 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  ${}^{i-1}T_i$ .

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 & l_1 C_1 \\ S_1 & C_1 & 0 & l_1 S_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & l_2 C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & l_2 S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

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 :

$${}^0T_2 = {}^0T_1 {}^1T_2 \quad (5.3)$$

$${}^0T_2 = \begin{bmatrix} S_x & N_x & A_x & P_x \\ S_y & N_y & A_y & P_y \\ S_z & N_z & A_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$${}^0T_2 = \begin{bmatrix} C_{12} & -S_{12} & 0 & l_1C_1 + l_2C_{12} \\ S_{12} & C_{12} & 0 & l_1S_1 + l_2S_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Donc :

$$\begin{cases} P_x = l_1C_1 + l_2C_{12} \\ P_y = l_1S_1 + l_2S_{12} \\ P_z = 0 \end{cases} \quad (5.6)$$

#### 5.2.4 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  $\theta_1, \theta_2$ .

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

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1C_1 + l_2C_{12} \\ l_1S_1 + l_2S_{12} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Donc,

$$X^2 + Y^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2 \cos\theta_2 \quad (5.8)$$

$$\cos\theta_2 = \frac{X^2 + Y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \quad (5.9)$$

L'expression de  $\theta_2$  est donnée par la relation suivante :

$$\theta_2 = \cos^{-1} \frac{X^2 + Y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2} \quad (5.10)$$

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

$$\tan^2 \frac{\theta}{2} = \frac{1 - \cos\theta}{1 + \cos\theta}$$

(5.11)

Pour trouver  $\theta_2$  en fonction de la fonction atan2 :

$$\theta_2 = \mp 2 \operatorname{atan2} \sqrt{\frac{(l_1 + l_2)^2 - (X^2 + Y^2)}{(X^2 + Y^2) - (l_1 - l_2)^2}} \quad (5.12)$$

Le signe  $\mp$  donne deux solutions appelées "elbow up" et "elbow down" comme la (figure 5.3) montre.

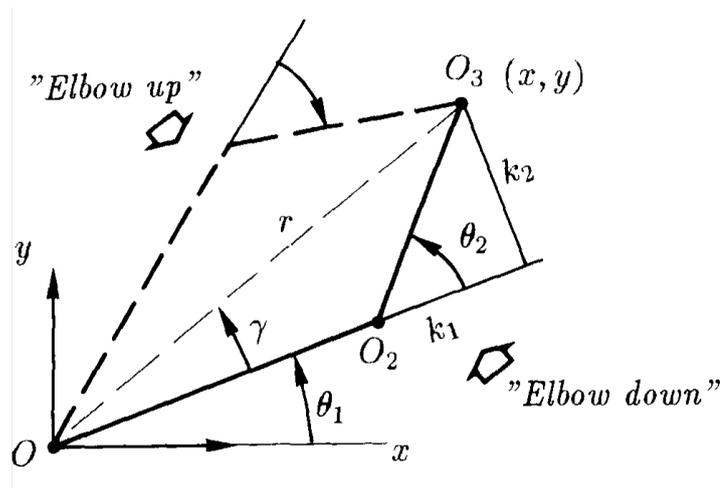


Figure 5. 3: Configuration "Elbow up" et "Elbow down".

Ayant obtenu  $\theta_2$ , l'angle  $\theta_1$  sera obtenu géométriquement.

Finalement,  $\theta_1$  s'obtient simplement pour la configuration de "elbow up" par :

$$\theta_1 = \operatorname{atan2} \frac{Y}{X} + \operatorname{atan2} \frac{l_2 \sin \theta_2}{l_1 + l_2 \cos \theta_2} \quad (5.13)$$

Et pour la configuration de "elbow down" on a :

$$\theta_1 = \operatorname{atan2} \frac{Y}{X} - \operatorname{atan2} \frac{l_2 \sin \theta_2}{l_1 + l_2 \cos \theta_2} \quad (5.14)$$

### 5.2.5 La matrice Jacobienne :

L'outil principalement utilisé pour traiter le problème de la cinématique, et particulièrement des modèles géométriques et cinématique des robots est « la matrice Jacobienne ». 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 Jacobienne. (Fig.5.4)

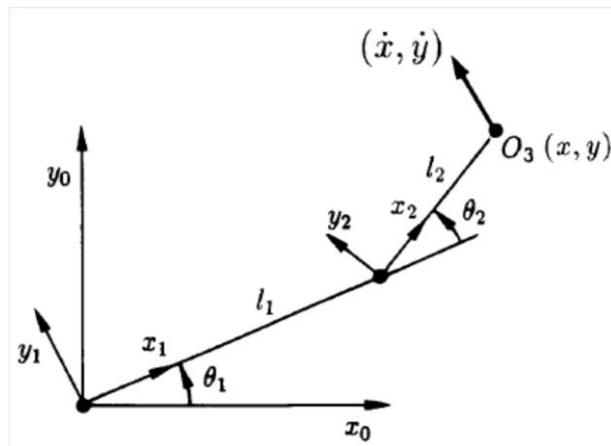


Figure 5. 4 Coordonnées de vitesse opérationnelle.

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

$$P_x = l_1 C_1 + l_2 C_{12} \quad (5.15)$$

$$P_y = l_1 S_1 + l_2 S_{12} \quad (5.16)$$

Le jacobien, exprimé dans le référentiel  $\{0\}$ , s'obtient directement par dérivation :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = J_0(\theta_1, \theta_2) \begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} \quad (5.17)$$

$$J_0 = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -l_1 s_1 - l_2 s_{12} & -l_2 s_{12} \\ l_1 c_1 + l_2 c_{12} & l_2 c_{12} \end{pmatrix} \quad (5.18)$$

### 5.2.6 Le Jacobien inverse, singularité :

Le Jacobien 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 :

$$\begin{pmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{l_1 l_2 s_2} \begin{pmatrix} l_2 c_{12} & l_2 s_{12} \\ -l_1 c_1 - l_2 c_{12} & -l_1 s_1 - l_2 s_{12} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} \quad (5.19)$$

Cette relation permet, pour chaque valeur de  $\theta_1$  et de  $\theta_2$  de calculer les  $\dot{\theta}_1$  et  $\dot{\theta}_2$  nécessaires pour obtenir les vitesses  $\dot{x}, \dot{y}$ . Elle est singulière pour  $\theta_2 = 0$  ou  $\pi$ . Pour ces valeurs, le Jacobien n'est plus de rang maximum, puisque ses colonnes deviennent proportionnelles :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\theta_1 \\ \cos\theta_1 \end{pmatrix} [(l_1 \mp l_2)\dot{\theta}_1 \mp l_2\dot{\theta}_2] \quad (5.20)$$

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 5.5. 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 5.5.a. La configuration est singulière en A et D, ainsi qu'à l'origine.

La figure 5.5.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.

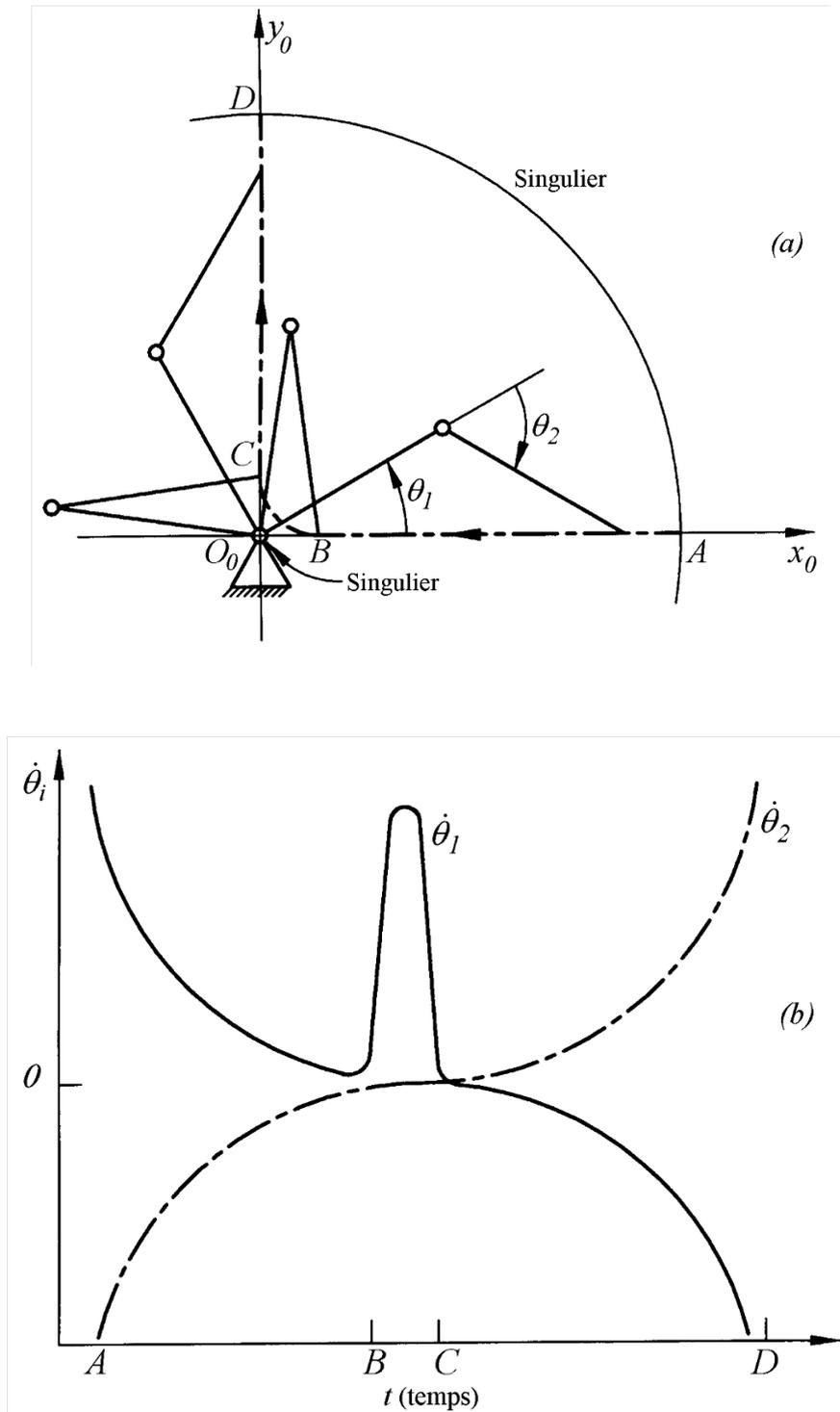


Figure 5. 5: Suivi de trajectoire traversant des points singuliers : (a) Changement brutal de configuration à proximité d'un point singulier. (b) Distribution des vitesses d'articulations.

### 5.3 Application :

#### 5.3.1 La première solution :

Comme l'on ait présenté à l'introduction de ce chapitre, on va faire la modélisation de deux bras manipulateurs, les deux sont du type RR à deux degrés de liberté, la seule différence c'est là tâche attribuée à chacun d'eux.

Le premier robot : (pour faire balayer la sonde ultrasonique)

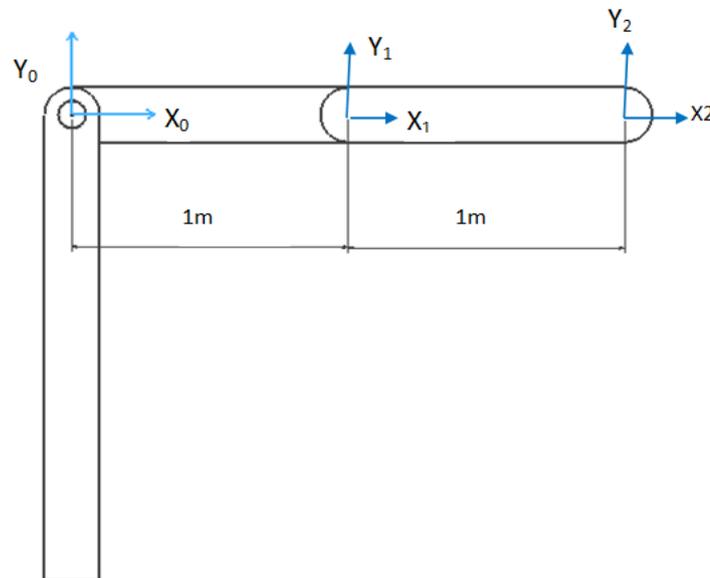


Figure 5. 6: Structure cinématique du premier robot (RR).

- Expérience N°1 :

On fait varier les angles  $\theta_1, \theta_2$  afin de balayer la sonde ultrason le long du bras humain tel que :

$$10^\circ < \theta_1 < 45^\circ$$

$$10^\circ < \theta_2 < 45^\circ$$

On peut donc poser comme des conditions initiales, afin de déterminer la trajectoire dans l'espace articulaire, les valeurs suivantes :

$$\theta_1(0) = 10^\circ \quad \dot{\theta}_2(0) = 0$$

$$\theta_2(1) = 45^\circ \quad \dot{\theta}_2(1) = 0$$

$$\theta_2(0) = 10^\circ \quad \dot{\theta}_2(0) = 0 \quad \ddot{\theta}_2(0) = 0$$

$$\theta_2(1) = 45^\circ \quad \dot{\theta}_2(1) = 0 \quad \ddot{\theta}_2(1) = 0$$

A partir d'une interpolation simple, on trouve la fonction polynomiale de  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  [77]:

$$\theta_1(t) = (10 + 105t^2 - 70t^3) \text{deg} \quad (5.21)$$

$$\theta_2(t) = (10 + 350t^3 - 525t^4 + 210t^5) \text{deg} \quad (5.22)$$

En utilisant les équations (5.6), (5.21) et (5.22) et après avoir calculé les valeurs de variables articulaires et opérationnelles par un programme sur MATLAB, on a le tableau suivant :

Tableau 5. 2: les positions calculées en variant les angles.

Temps (sec)	Tita1 (deg)	Tita2 (deg)	$p_x$ (m)	$p_y$ (m)
0	10	10	1.92	0.51
0.1	10.98	10.29	1.91	0.55
0.2	13.64	12.02	1.8	0.66
0.3	17.56	15.70	1.78	0.85
0.4	22.32	21.11	1.65	1.06
0.5	27.7	27.5	1.46	1.28
0.6	32.68	33.88	1.23	1.45
0.7	37.44	39.29	1.02	1.58
0.8	41.36	42.97	0.84	1.65
0.9	44.02	44.7	0.74	1.69
1	45	45	0.70	1.7

Remarque :

Le MATLAB étant un outil d'analyse solide et permettant des calculs assez rapides, il a été choisi parmi d'autres pour traiter les multiples analyses et mener le projet à termes. On a travaillé par une version récente MATLAB 7.8.0 (R2009a).

- Le programme sur le logiciel MATLAB donne aussi les graphes suivants :

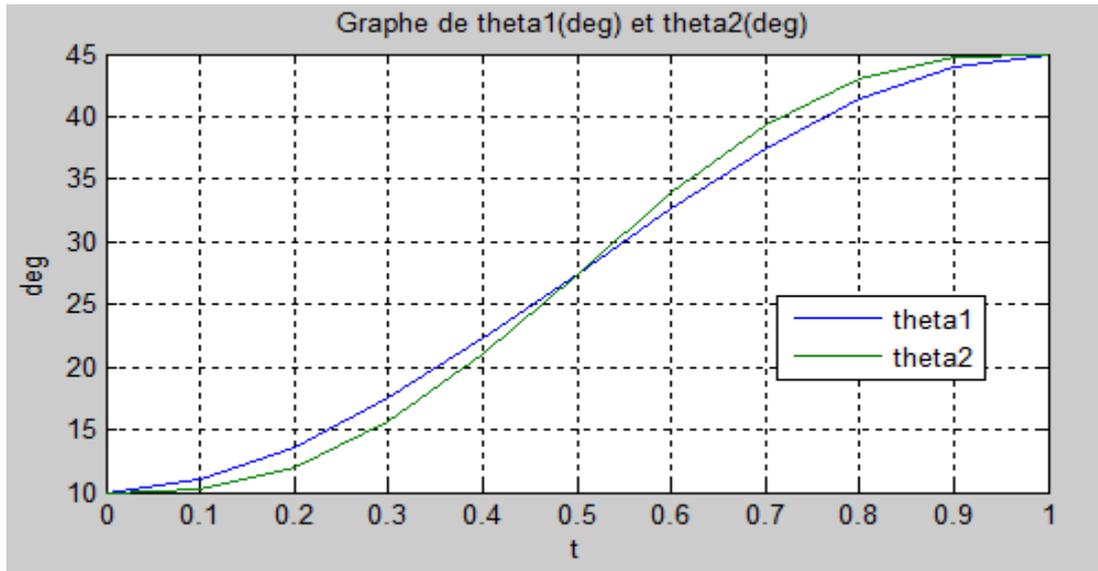


Figure 5. 7: La variation des angles en fonction du temps t(s).

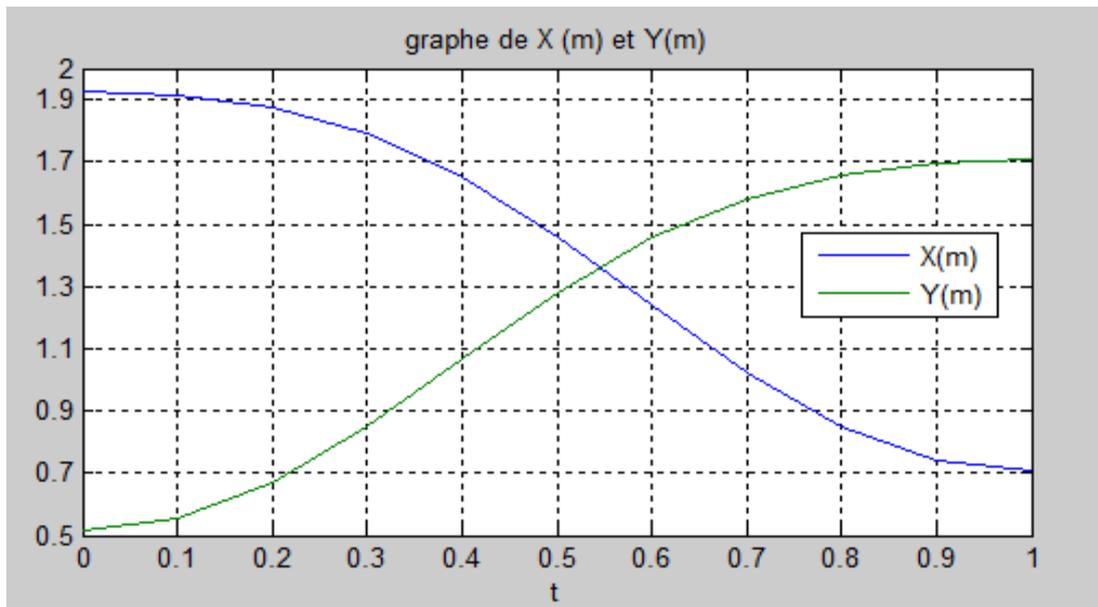


Figure 5. 8: Le déplacement suivant X et Y en fonction du temps t(s).

On constate que le déplacement suivant X est maximum à  $t=0$ (s) et minimum à  $t=1$ (s) tandis que le déplacement suivant Y est minimum à  $t=0$ (s) et maximum à  $t=1$ (s)

On peut avoir en utilisant la théorie, pour élaborer un programme sur MATLAB, toutes les informations sur le déplacement de notre robot, étant donné on impose les variables articulaires (les points de départ et les points désirés).

### Vérification des valeurs par le logiciel CATIA V5 :

Une fois le mécanisme est conçu sur CATIA V5, on fait comme première étape une analyse de mécanisme qui donne le type et le nombre de liaisons ainsi que le degré de liberté. (Fig.5.9)

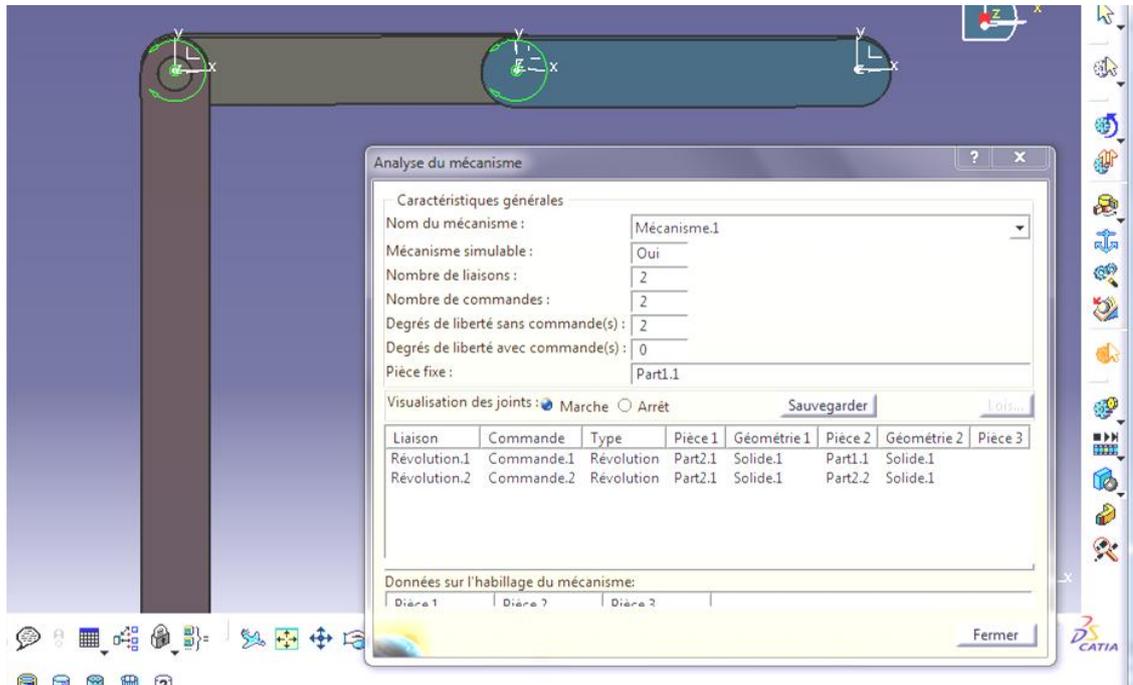


Figure 5. 9: Analyse du mécanisme sur CATIA V5.

La deuxième étape c'est la simulation qui donne les différentes positions suivant la variation des angles  $\theta_1$ ;  $\theta_2$ .

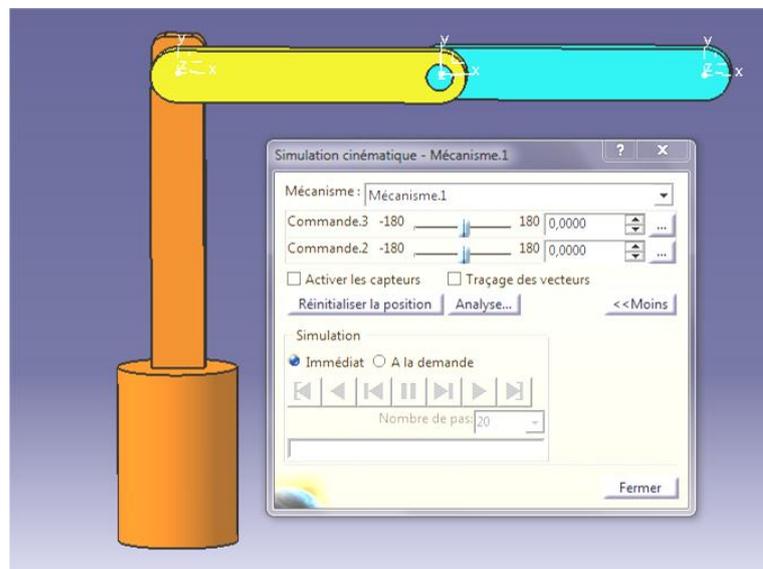
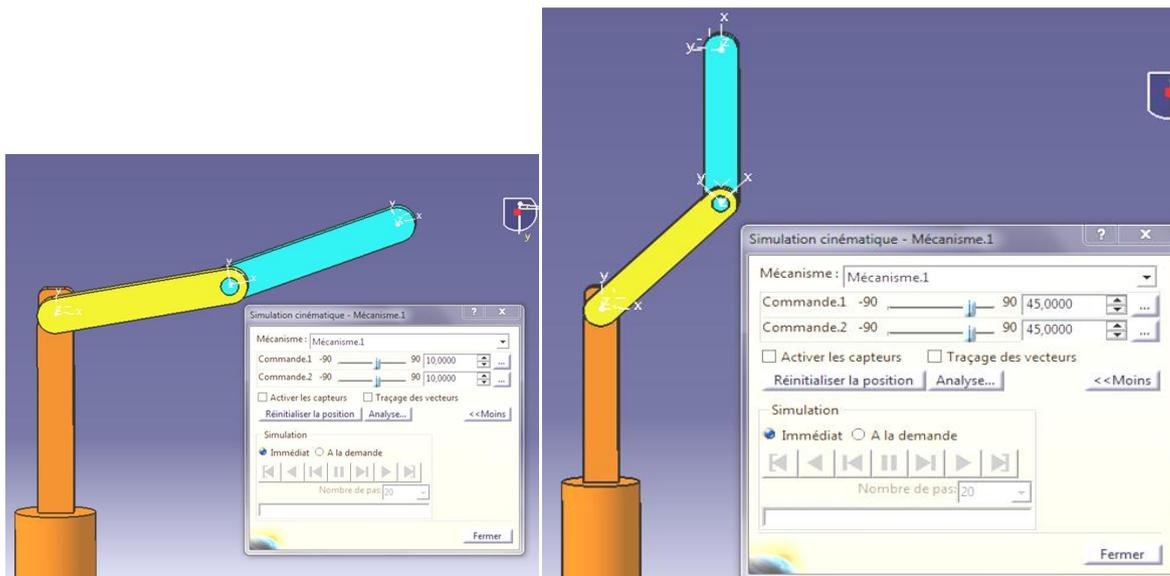


Figure 5. 10: La simulation cinématique du mécanisme sur CATIA V5.

Le robot à la position initial, à  $t=0(s)$ , ainsi qu'à la position finale, à  $t=1(s)$  :

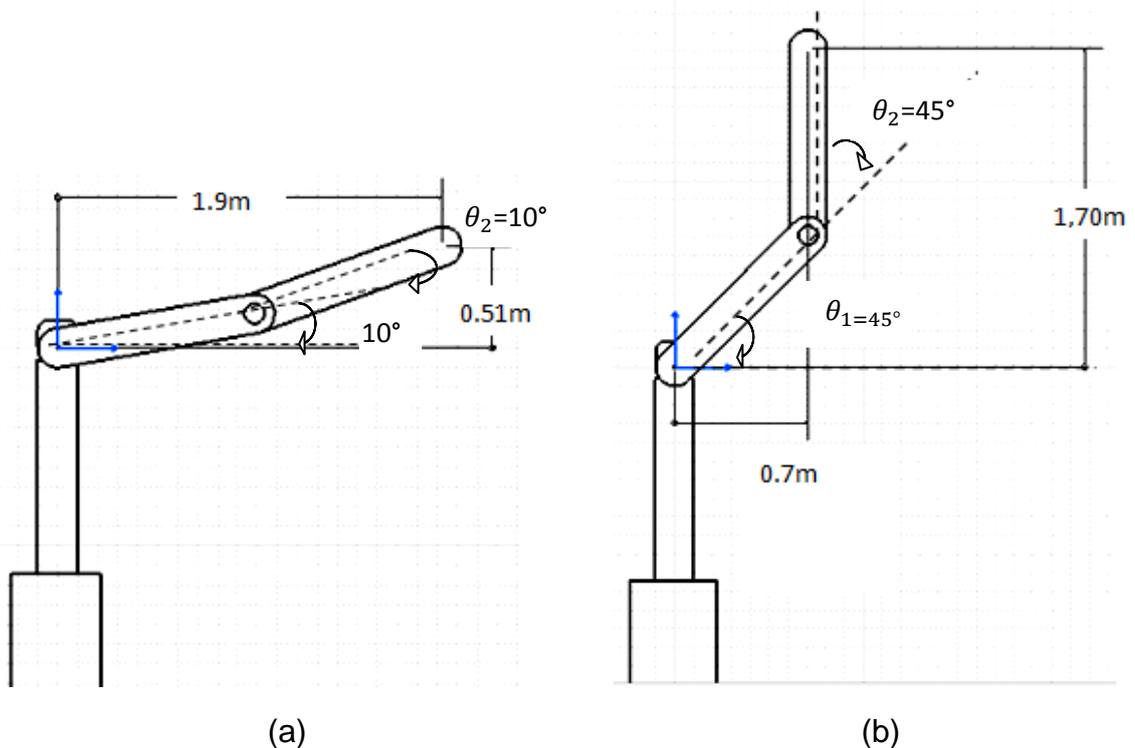


(a)

(b)

Figure 5. 11: (a) La position initiale du robot. (b) La position finale du robot.

Le déplacement de la position initiale, ainsi que la position finale sur CATIA :



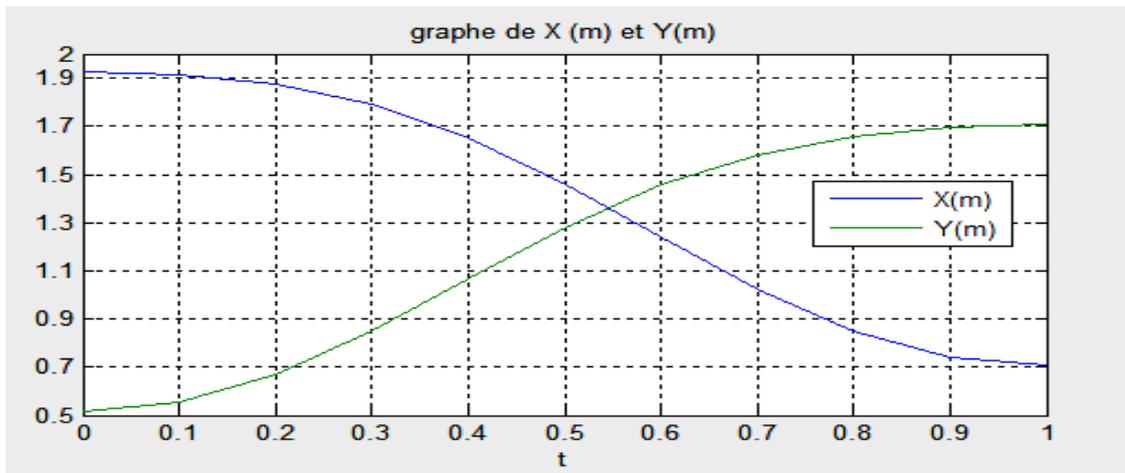
(a)

(b)

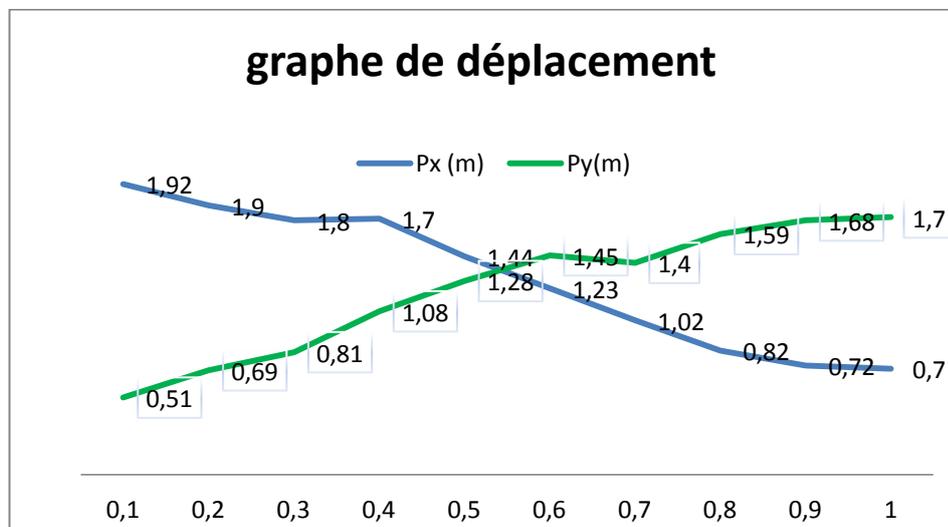
Figure 5. 12: (a) Vérification de la position initiale. (b) : Vérification de la position finale

### Comparaison entre les résultats de MATLAB et de CATIA V5 :

(Le premier graphe est tracé sur MATLAB, et le deuxième tracé à partir des valeurs obtenues sur CATIA.



(a)

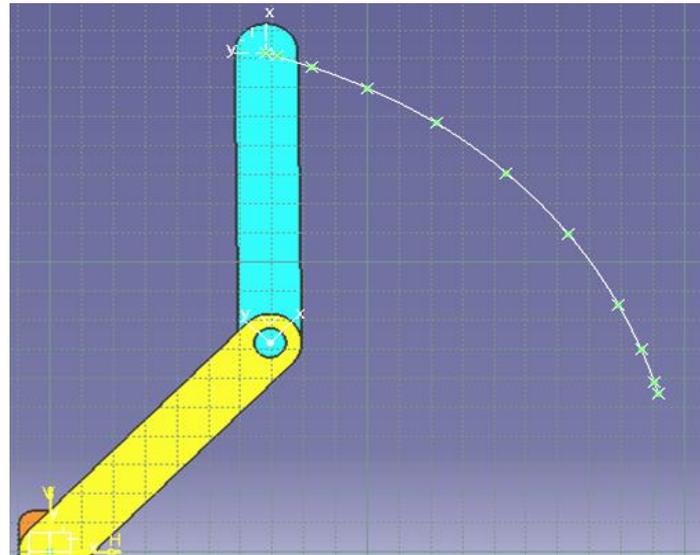


(b)

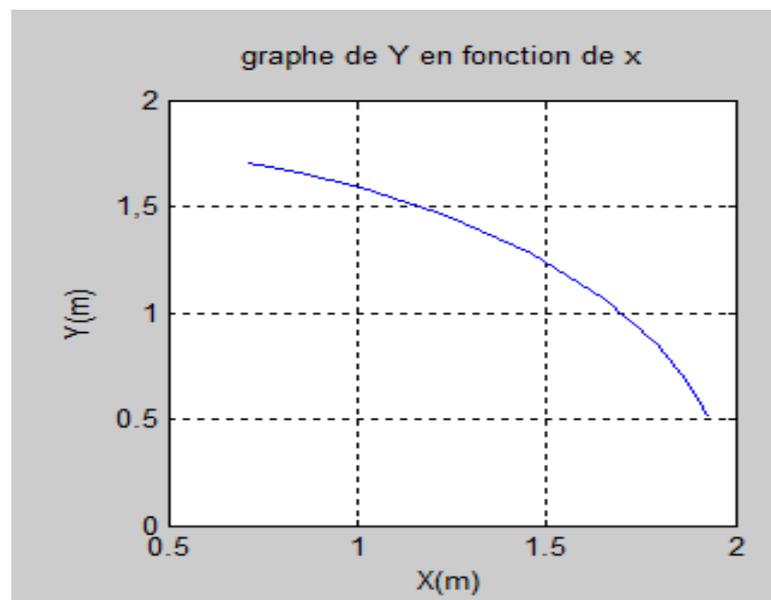
Figure 5. 13: Comparaison entre les graphes de déplacement calculés par le MATLAB et les valeurs simulées sur CATIA V5.

On peut constater qu'on a obtenu les mêmes résultats étant donné que les deux logiciels reposent sur la même théorie. Cependant, chacun d'eux a ses caractéristiques, le MATLAB est un outil d'analyse, permettant des calculs exacts et assez rapides. Par ailleurs, CATIA est un outil d'aide à la conception permettant d'avoir une simulation géométrique et cinématique.

La comparaison entre la trajectoire sur MATLAB et celle tracée à partir du modèle conçu sur le logiciel CATIA V5 :



(a) La trajectoire sur CATIA V5



(b) : La trajectoire sur MATLAB

Figure 5. 14 : Comparaison de trajectoire.

On constate qu'on a obtenu la même trajectoire sur les deux logiciels. Cependant la trajectoire sur MATLAB est obtenue à l'aide d'un programme qui calcule la variation de (y) en fonction de (x), tandis que la trajectoire sur CATIA est obtenu à partir d'un modèle géométrique conçu qui donne la configuration du robot à chaque position, on peut obtenir donc la trajectoire en raccordant les positions de l'organe terminale a chaque instant.

Calcul des vitesses (articulaires et opérationnelles) :

Par une dérivation des équations (5.21) et (5.22) on trouve les équations suivantes :

$$\dot{\theta}_1(t) = 210t - 210t^2 \quad (5.23)$$

$$\dot{\theta}_2(t) = 1050t^2 - 2100t^3 + 1050t^4 \quad (5.24)$$

A partir de (5.21), (5.22) et (5.23), (5.24) on a élaboré sur MATLAB un programme qui nous calcule les vitesses opérationnelles et articulaires. Les figures (5.15)(5.16), donnent les résultats obtenus:

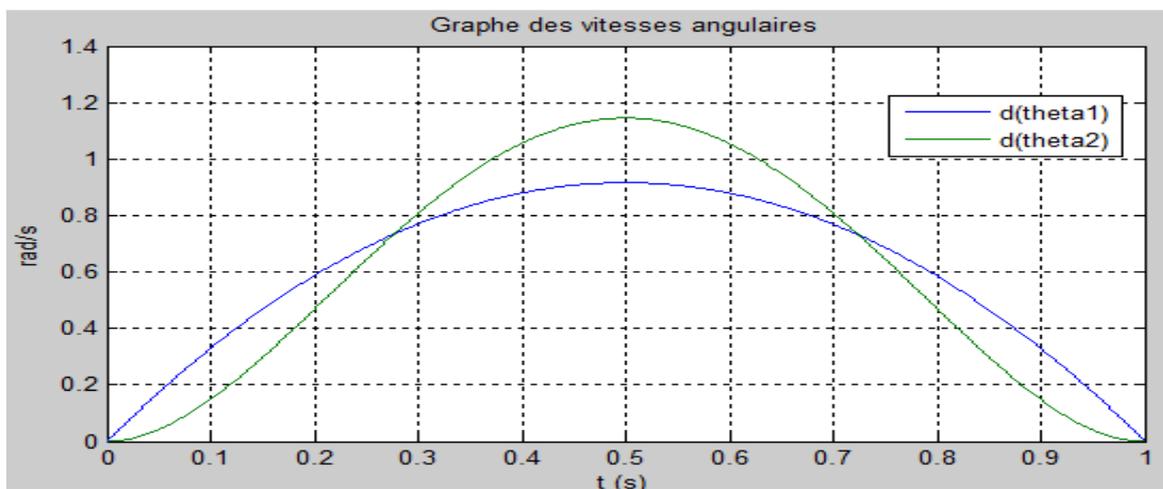


Figure 5. 15: Vitesses articulaires.

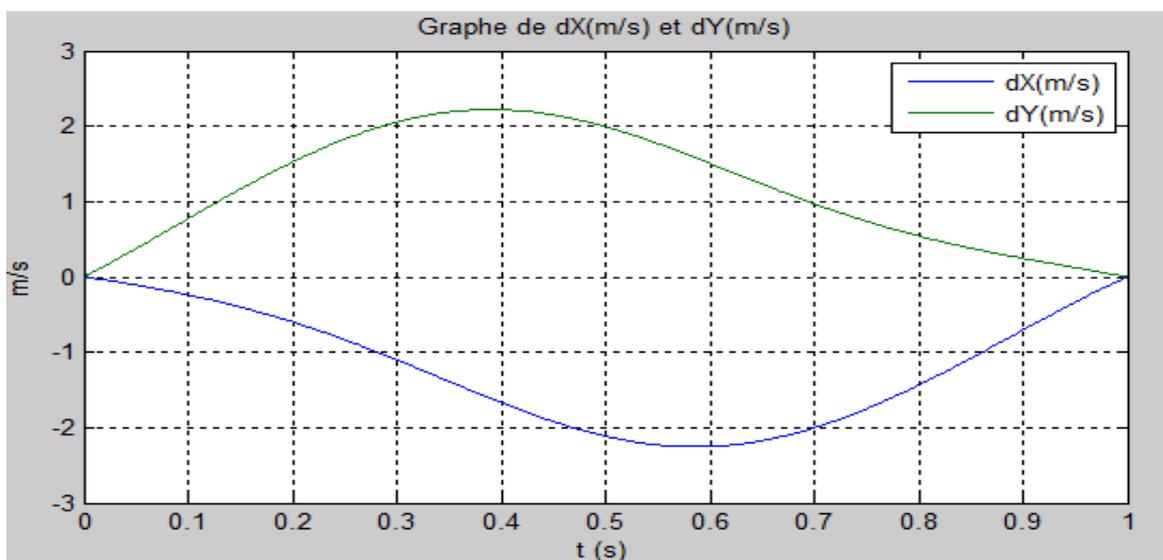


Figure 5. 16: Vitesses selon X et selon Y.

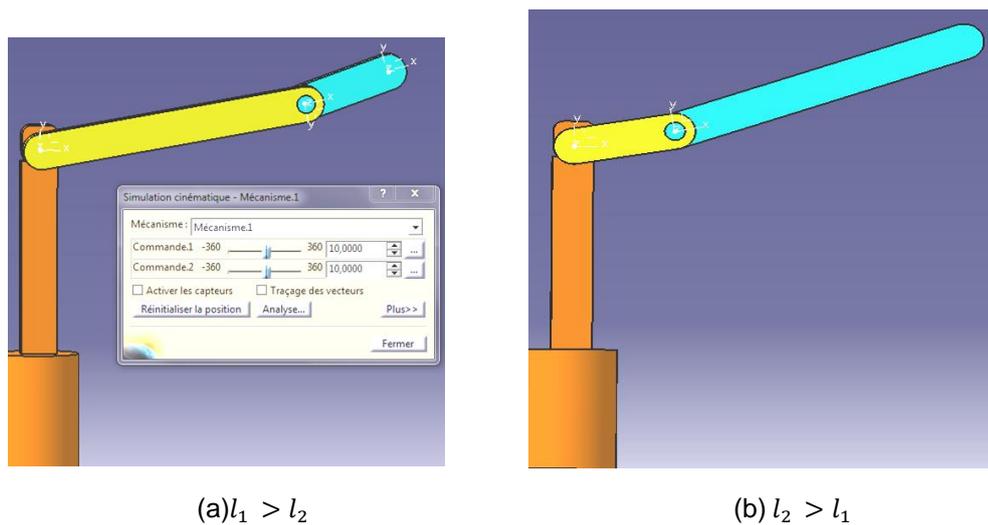
On constate que les vitesses sont nulles à la position initiale et finale cela confirme que le robot démarre de repos et s'arrête une fois il arrive à la position désirée.

### Changement de paramètre de robot :

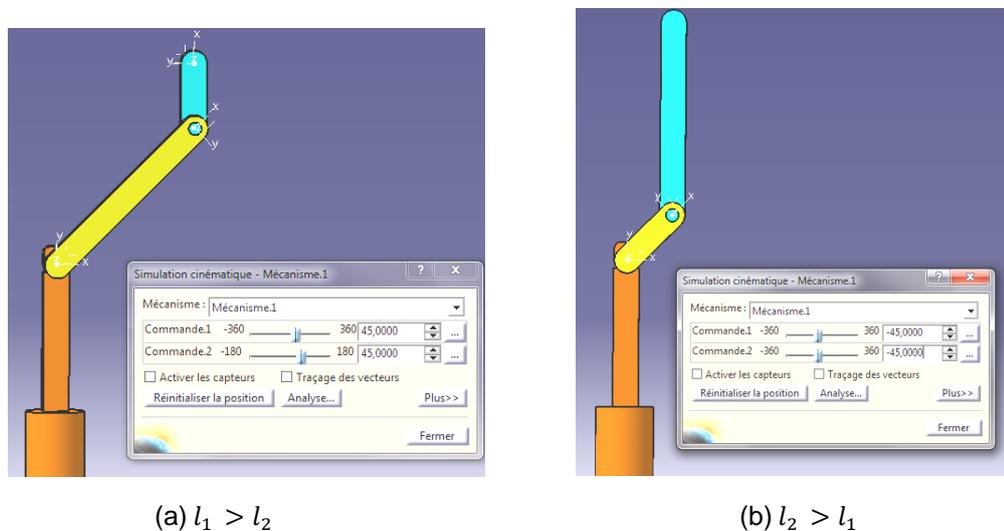
On change la longueur des bras tel que la somme des deux bras ne change pas dans ce cas on a :  $(l_1 + l_2 = 2m)$ .

- On suppose premièrement que  $l_1 > l_2$  :  $l_1 = 1.5m$  et  $l_2 = 0.5m$  : La conception de robot modifié sur CATIA V5 sera simple à changer sans avoir besoin de faire une nouvelle conception, une modification rapide des longueurs de bras va nous donner le modèle souhaité dans quelque seconde.
- Ensuite on pose le cas où  $l_2 > l_1$  :  $l_1 = 0.5m$  et  $l_2 = 1.5m$  .

Nous allons étudier les déplacements et la trajectoire dans les deux cas, en comparant les résultats :



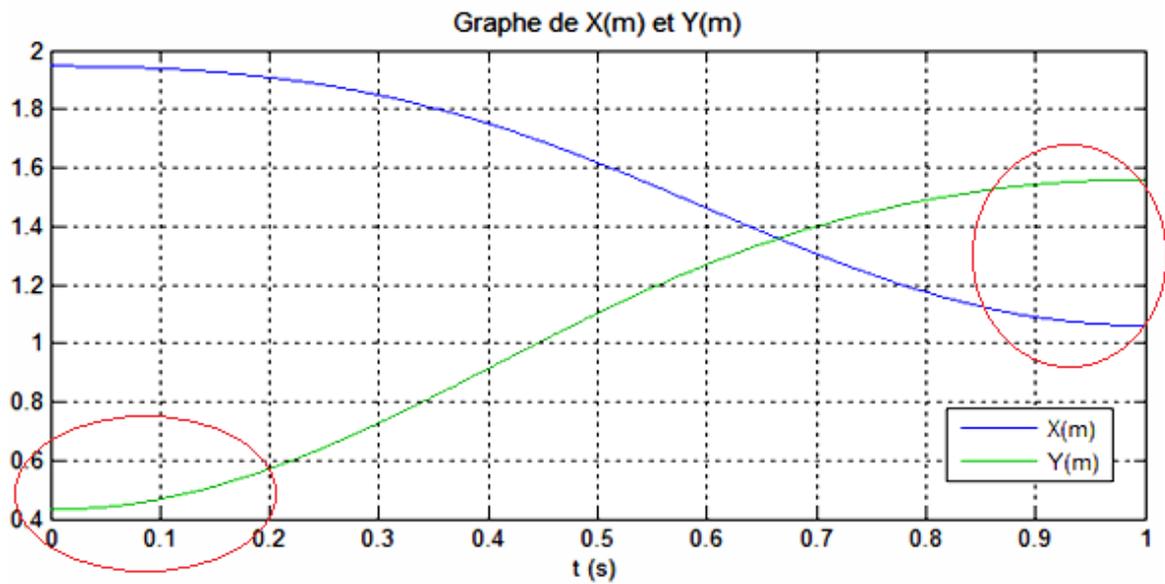
La position initiale



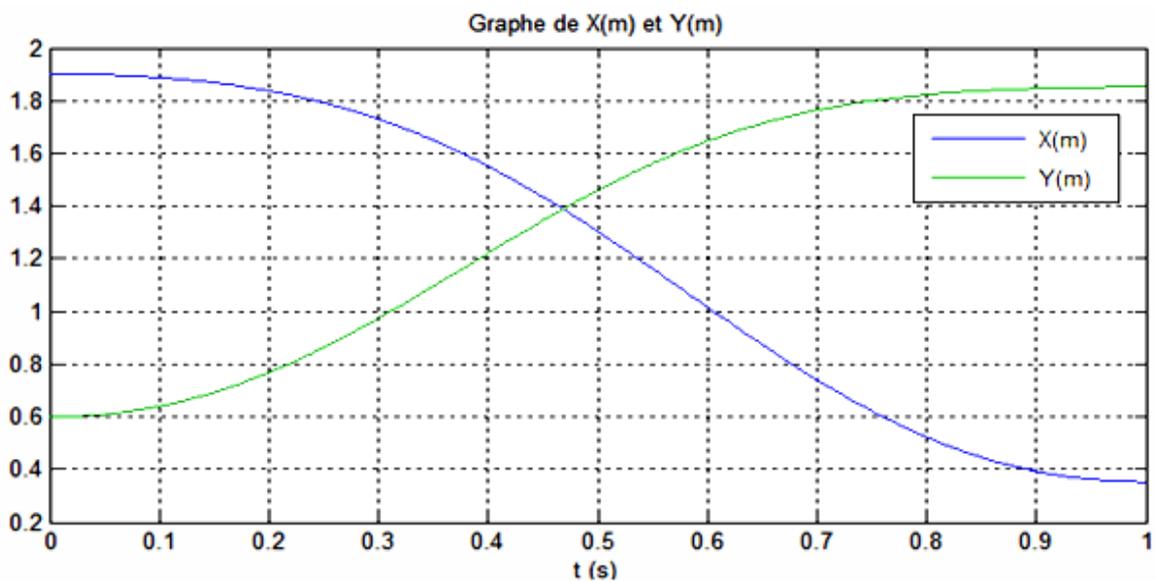
La position finale

Figure 5. 17: Comparaison de conception de robot avec changement de longueurs des bras.

Comparaison de déplacements entre les deux cas : ( $l_1 > l_2$ ) et ( $l_2 > l_1$ )



(a)  $l_1 > l_2$  ( $l_1 = 1.5m$  et  $l_2 = 0.5m$ )

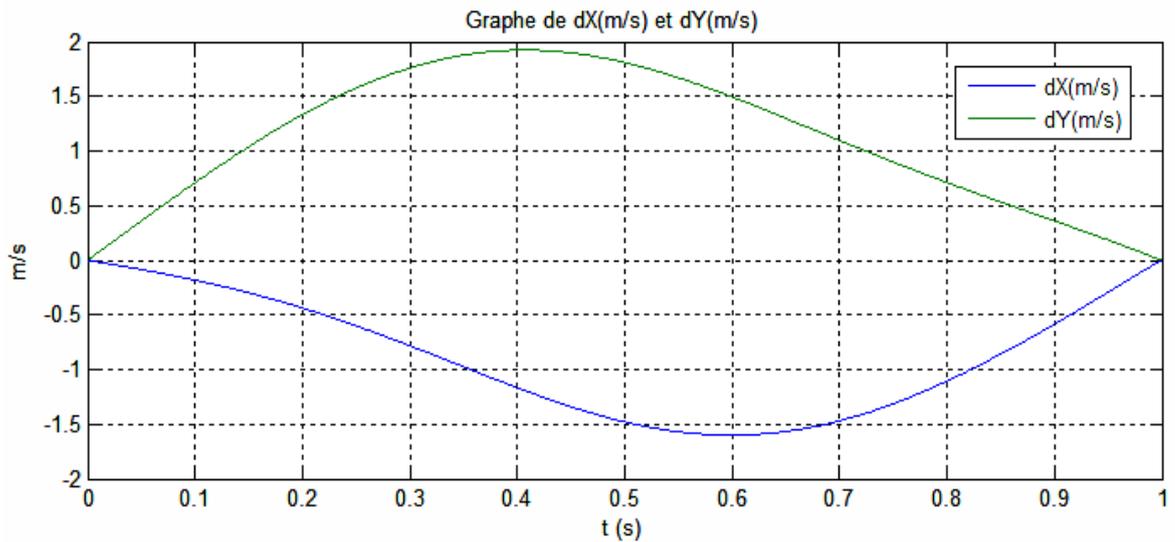


(b)  $l_2 > l_1$  ( $l_1 = 0.5m$  et  $l_2 = 1.5m$ )

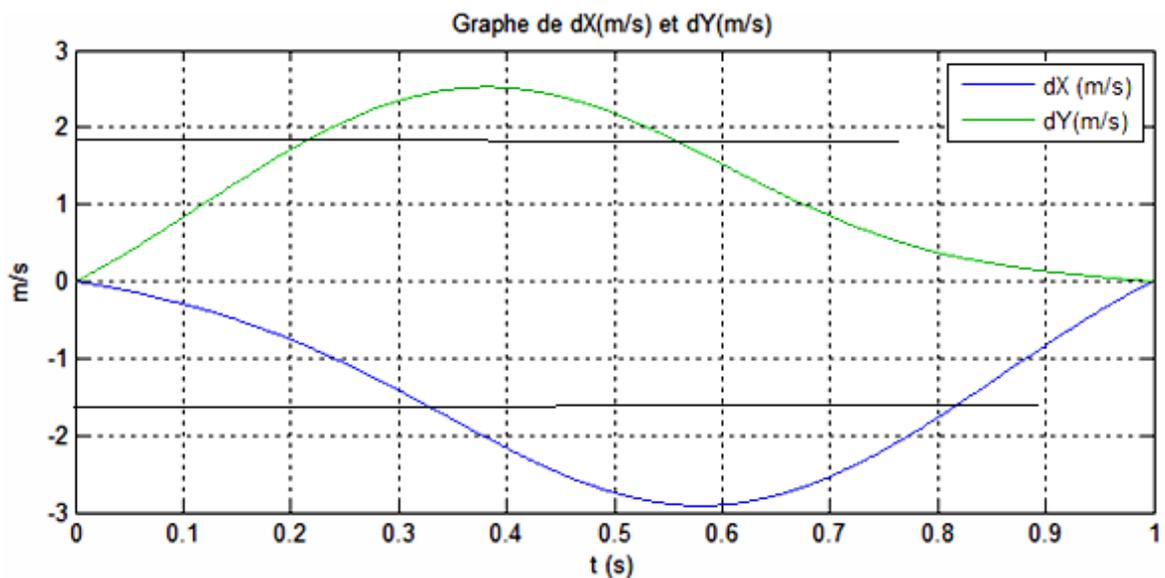
Figure 5. 18: comparaison de déplacement.

On constate que les déplacements selon X et Y seront plus les même quand on change les longueurs des bras.

Comparaison de Vitesses opérationnelles entre les deux cas : ( $l_1 > l_2$ ) et ( $l_2 > l_1$ )



(a)  $l_1 > l_2$  ( $l_1 = 1.5m$  et  $l_2 = 0.5m$ )



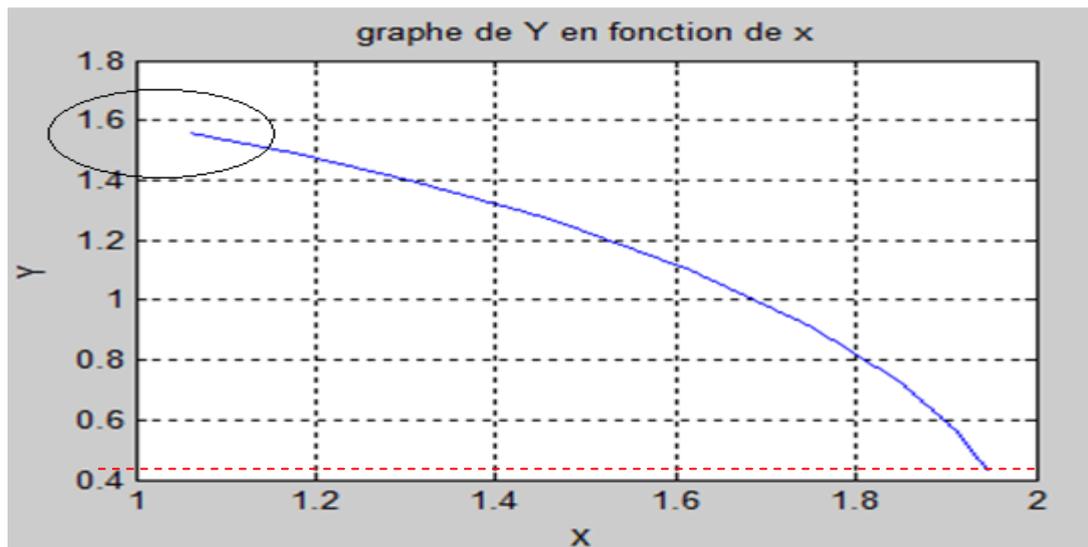
(b)  $l_2 > l_1$  ( $l_1 = 0.5m$  et  $l_2 = 1.5m$ )

Figure 5. 19: comparaison des vitesses

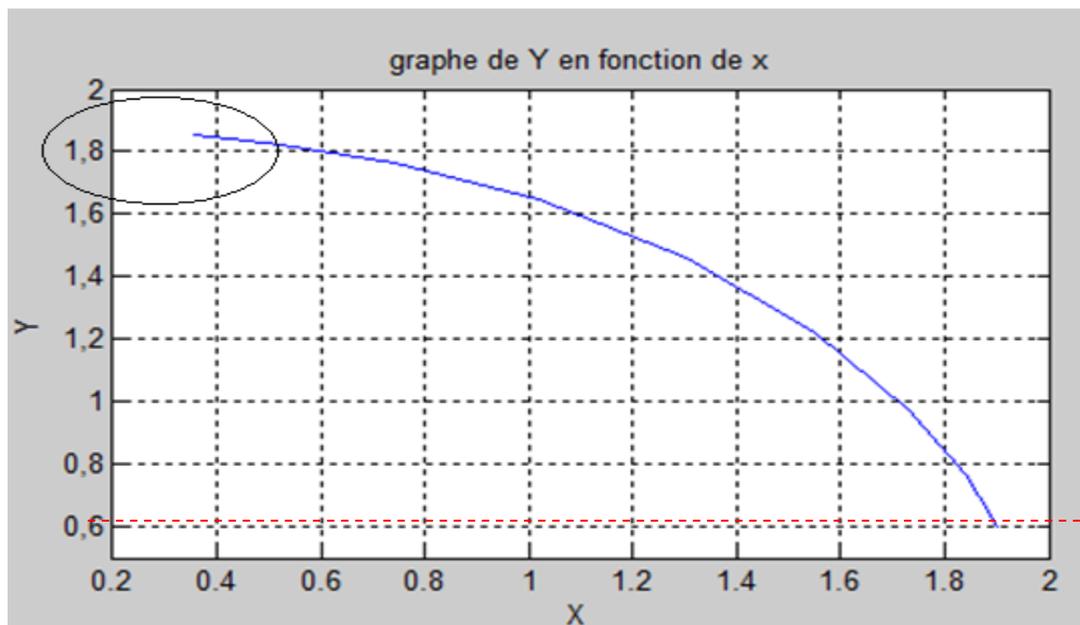
On constate qu'en changeant les longueurs de bras on peut obtenir des vitesses différentes. Cela nous permet de changer les vitesses par la modification de la géométrie.

La figure ci-dessous donne la comparaison de trajectoire entre les deux cas

( $l_1 > l_2$  et  $l_2 > l_1$ ) :



(a)  $l_1 > l_2$  ( $l_1 = 1.5m$  et  $l_2 = 0.5m$ )



(b)  $l_2 > l_1$  ( $l_1 = 0.5m$  et  $l_2 = 1.5m$ )

Figure 5. 20 : comparaison de déplacement.

On constate qu'en changeant de longueurs des bras, on obtient la même allure mais avec de coordonnées différentes.

Expérience N°2 :

On va étudier le cas d'une trajectoire rectiligne (le robot doit faire un balayage de la sonde le long d'un bras humain) tel que Y est constant, et X varie à partir du point (1,1.5) jusqu'au point (-1,1.5) dans un espace de temps d' 1s :

Prenant comme condition initiale :

$$X(0) = 1 \quad \dot{X}(0) = 0$$

$$X(1) = -1 \quad \dot{X}(1) = 0$$

L'interpolation polynomiale cubique donne :  $X=1-6t^2 + 4t^3$ , on a donc [77]:

$$x = 1 - 6t^2 + 4t^3 \quad (5.25)$$

$$y = 1.5 \quad (5.26)$$

On utilisant les équations (5.12), (5.13), (5.14), (5.25) et (5.26) et après avoir calculé les valeurs de variables articulaires par un programme sur MATLAB, on obtient le tableau suivant :

Tableau 5. 3: La variation des angles  $\theta_1, \theta_2$  du premier robot (variables articulaires)

Temps (sec)	Tita1 (de)	Tita2 (de)	$p_x$ (m)	$p_y$ (m)
0	30.6510	51.3178	1.0000	1.5
0.1	30.2113	55.2102	0.9440	1.5
0.2	30.1743	63.9834	0.7920	1.5
0.3	32.5786	73.3627	0.5680	1.5
0.4	38.6963	80.2815	0.2960	1.5
0.5	48.5904	82.8192	0	1.5
0.6	61.0222	80.2815	-0.2960	1.5
0.7	74.0587	73.3627	-0.5680	1.5
0.8	85.8424	63.9834	-0.7920	1.5
0.9	94.5785	55.2102	-0.9440	1.5
1	98.0312	51.3178	-1.0000	1.5

On obtient les graphes suivants :

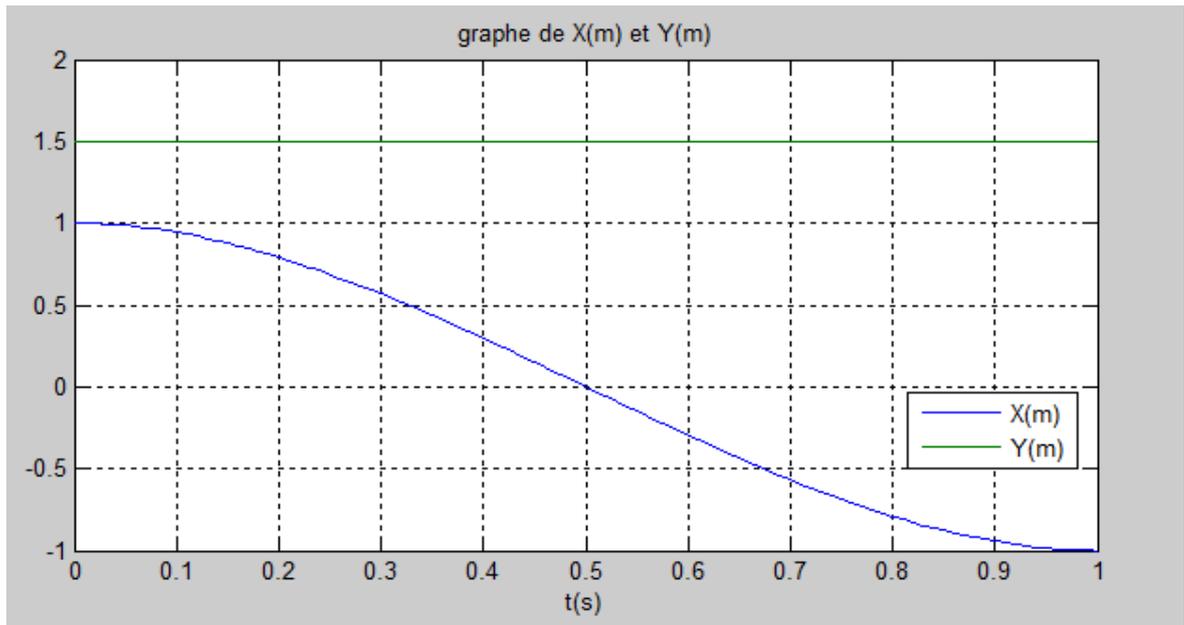


Figure 5. 21 : Le déplacement suivant X et Y.

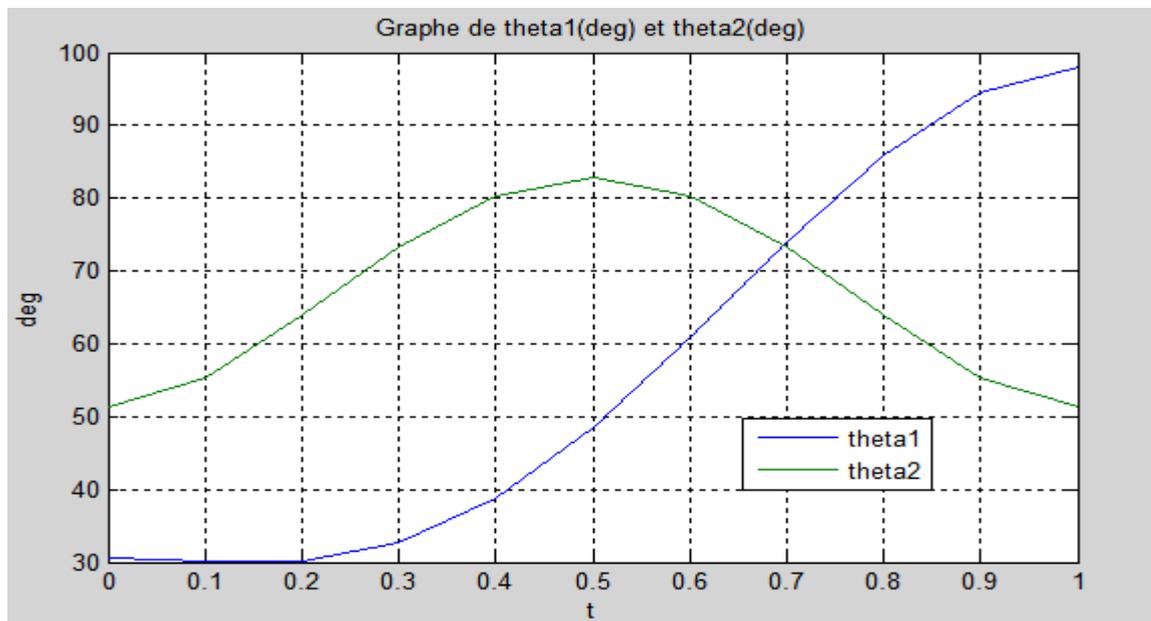


Figure 5. 22 : La variation des angles  $\theta_1, \theta_2$  durant 1(s).

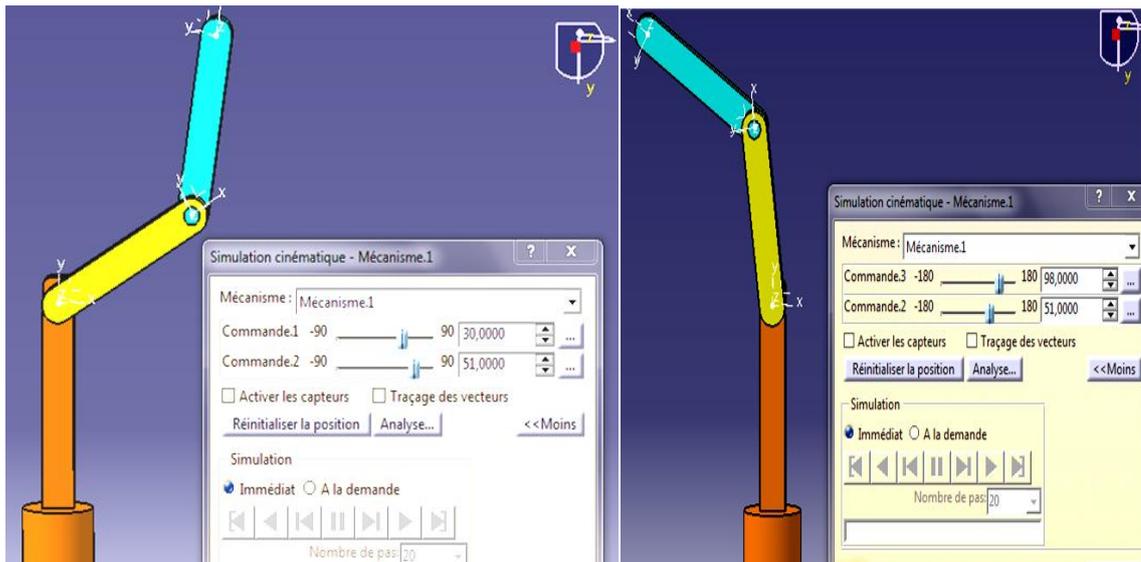
La variation de  $\theta_1$  est croissante ; varie de  $30^\circ$  jusqu'à  $98^\circ$ .

La courbe de la variation de  $\theta_2$  est parabolique le maximum est à mi-temps , le minimum est à  $t_{initial}$  et  $t_{final}$ .

On constate qu'on peut obtenir les variables articulaires en imposant une trajectoire rectiligne suivant un des axes, ou même suivant une droite quelconque.

Le graphe des angles (variables articulaire), nous permet d'avoir une idée sur la cinématique de robot en fonction des variables opérationnelles à chaque instant.

Le robot à la position initial, à  $t=0(s)$ , ainsi qu'à la position finale, à  $t=1(s)$  :

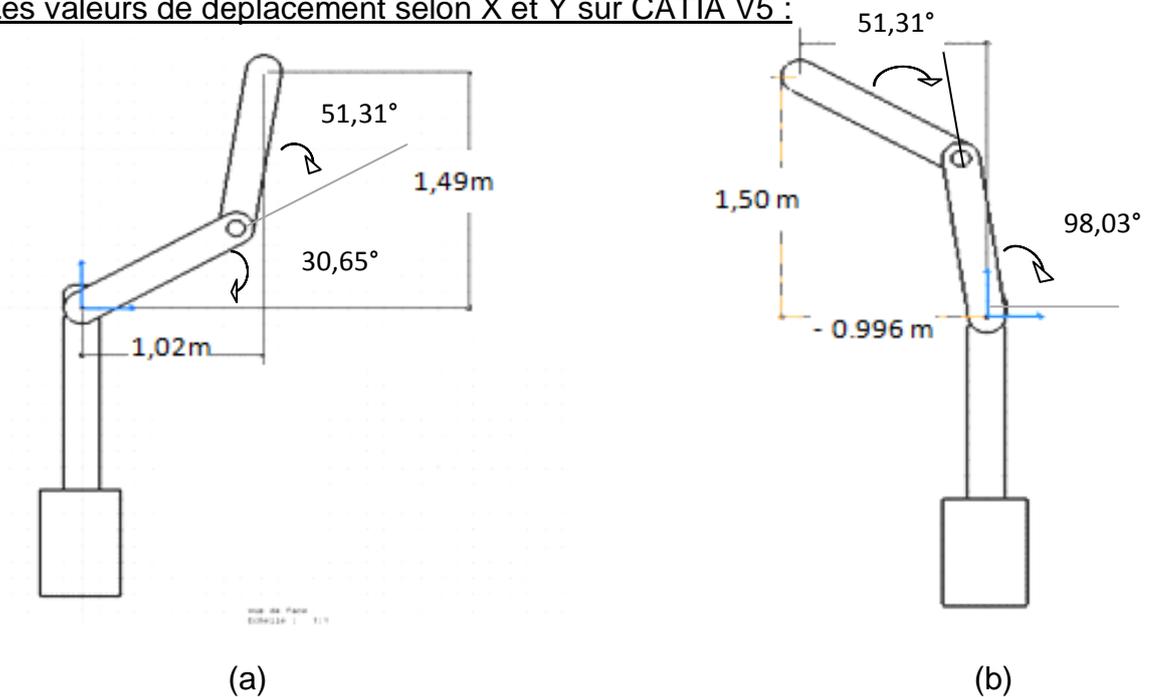


(a)

(b)

Figure 5. 23 : (a) La position initiale. (b) La position finale

Les valeurs de déplacement selon X et Y sur CATIA V5 :



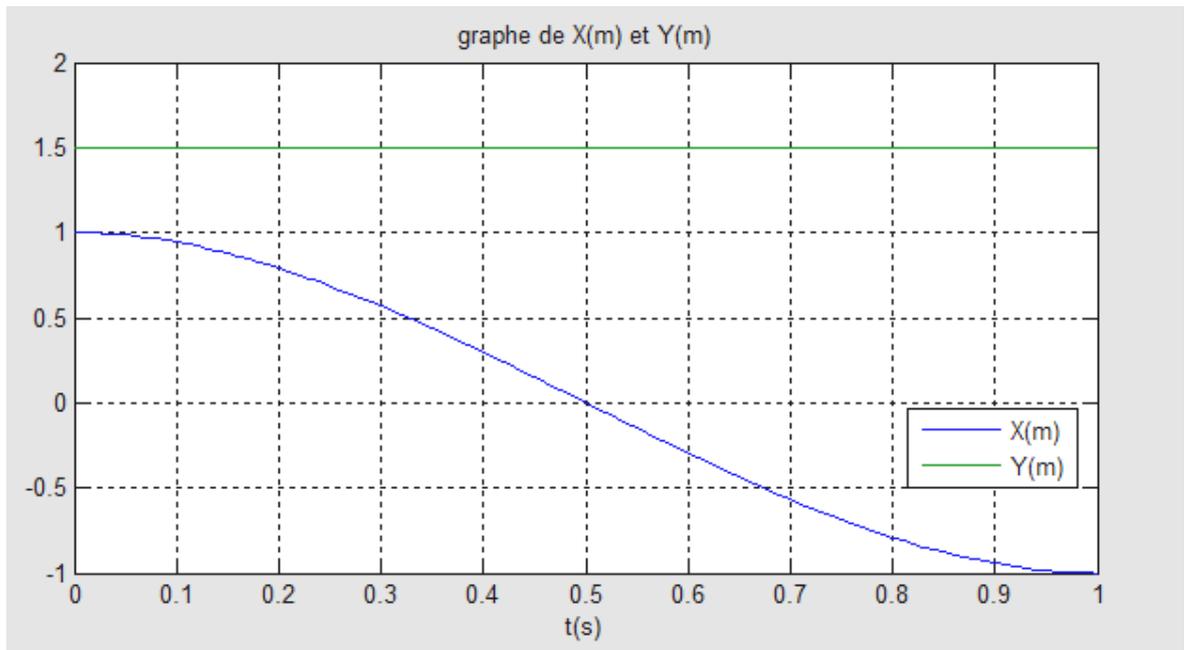
(a)

(b)

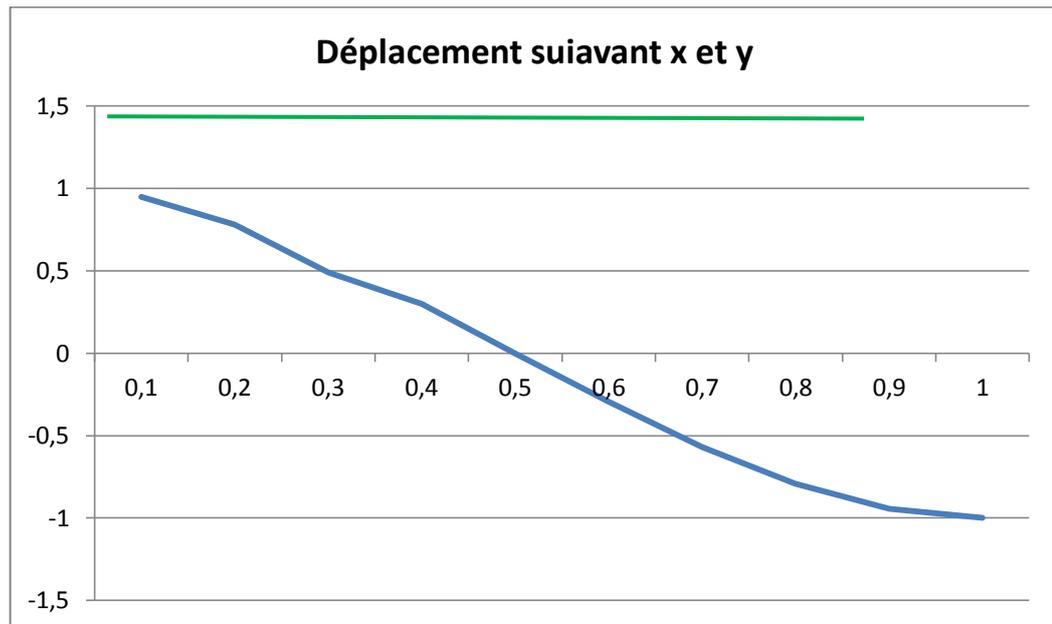
Figure 5. 24 : (a) Vérification de La position initiale. (b) Vérification de la position finale

Non seulement on a obtenu sur CATIA V5 les mêmes valeurs de déplacement, mais aussi la configuration du robot a l'instant désiré, prenant l'exemple de la position initiale et finale, on peut donc comprendre la géométrie et la cinématique de notre robot .

Comparaison des résultats (déplacements) entre les résultats de MATLAB et de CATIA V5 :



(a) Déplacement calculé sur MATLAB.



(b) Déplacement simulé sur CATIA V5.

Figure 5. 25 : Comparaison entre les graphes de déplacement calculés par MATLAB et les valeurs simulées par CATIA V5 en exemple 2.

La comparaison entre la trajectoire sur MATLAB et celle tracée à partir du model conçu sur le logiciel CATIA V5 :

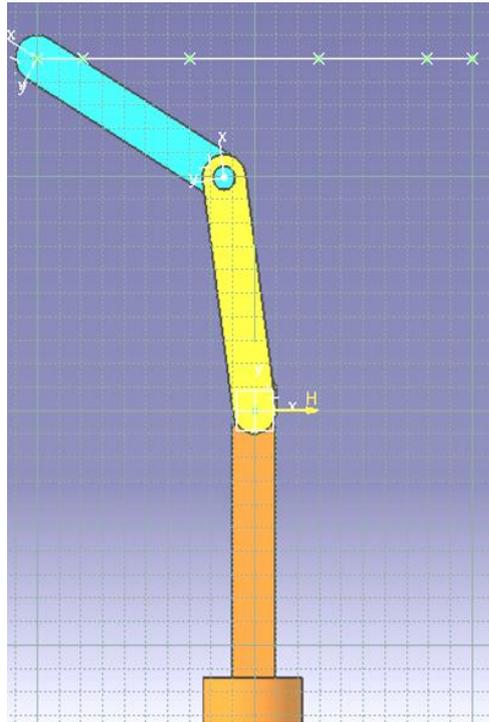


Figure 5. 26 : la trajectoire sur CATIA V5 .

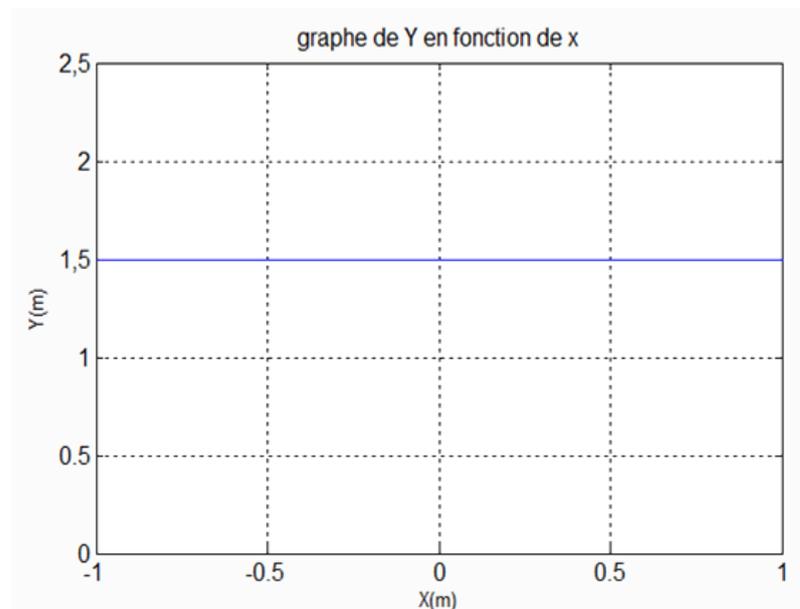


Figure 5. 27 : La trajectoire sur MATLAB.

On constate que le tracé de la trajectoire sur les deux logiciels est le même. Sur MATLAB on obtient seulement l'allure de la trajectoire tandis que sur CATIA on obtient la configuration du robot à chaque point de cette trajectoire.

Calcul des vitesses (articulaires et opérationnelles) :

Par une dérivation des équations (5.25) et (5.26) on trouve les équations suivantes :

$$\dot{x} = -12t + 12t^2 \quad (5.27)$$

$$\dot{y} = 0 \quad (5.28)$$

A partir de (5.19), (5.27), (5.28) on a élaboré sur MATLAB un programme qui nous calcule les vitesses et les accélérations, on obtient les graphes suivants :

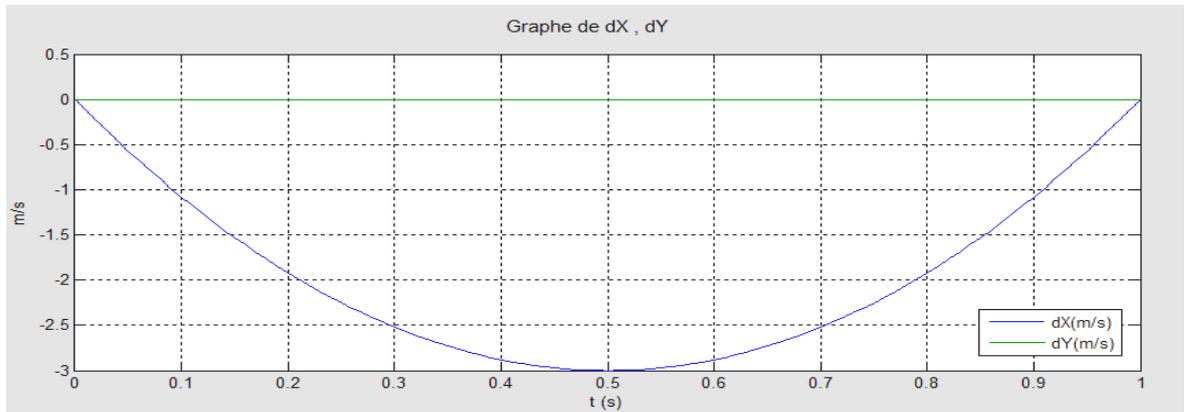


Figure 5. 28: Vitesse selon X et selon Y.

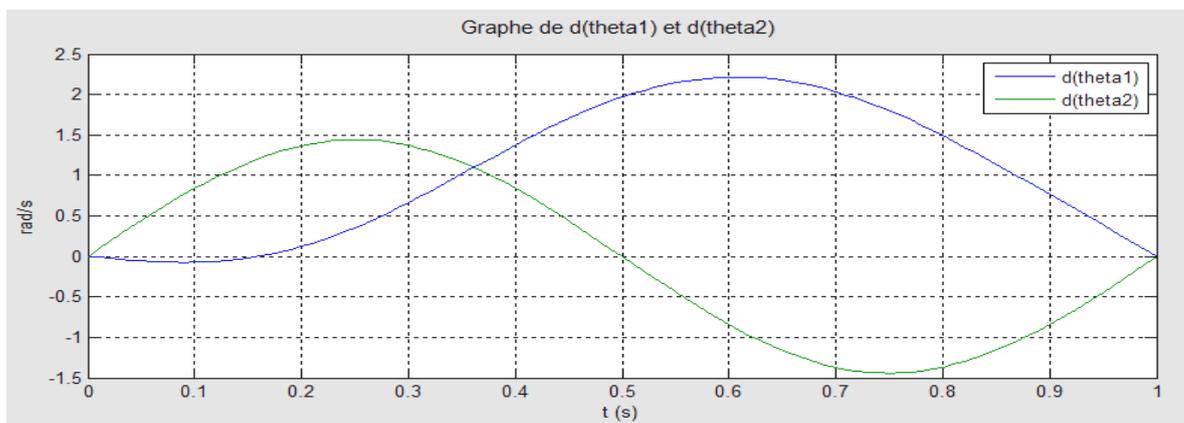


Figure 5. 29: Vitesses articulaires.

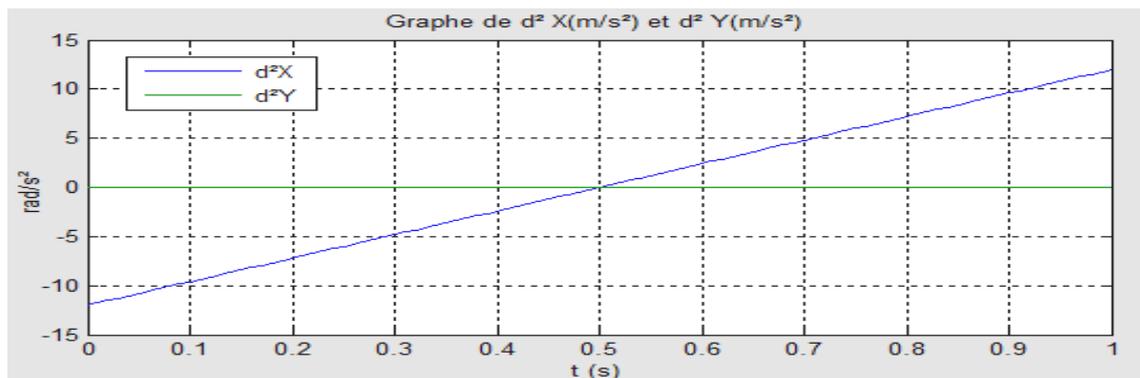


Figure 5. 30: Les accélérations selon X et Y.

Le deuxième robot (l'insertion de l'aiguille) :

a) Mouvement sans obstacle :

Un fois la position des points d'insertion au niveau de la veine est calculée, Le deuxième robot, positionne l'aiguille au point déterminé.

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

$$l_1 = l_2 = 0.25\text{m}$$

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

$$X = -0.25998 X + 0.3705$$

Le robot est supposé se déplacer de point  $P_1$  au point  $p_2$  dans un espace de temps de 10(s).

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

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

On peut déterminer la fonction polynomiale de  $X, Y$  à l'aide d'une interpolation cubique [77]:

$$X = 0.41122 - 0.0131826t^2 + 0.00087884t^3 \text{ (m)} \quad (5.29)$$

$$Y = -0.00022848 t^3 + 0.003427 t^2 + 0.26359 \text{ (m)} \quad (5.30)$$

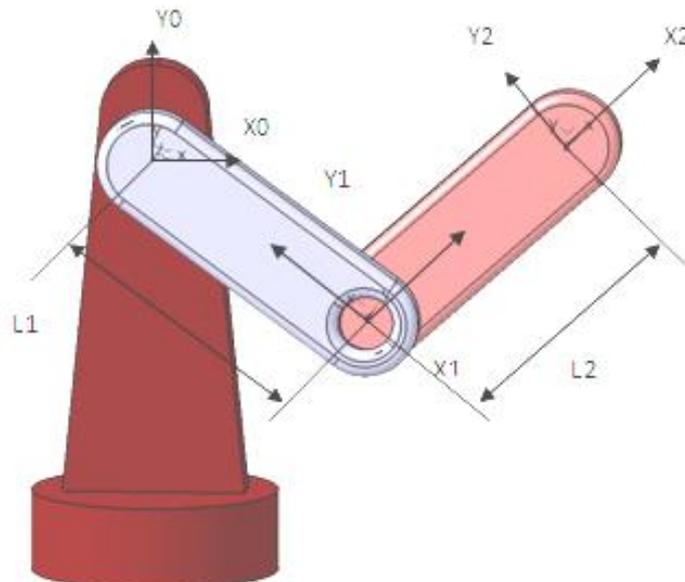


Figure 5. 31: Structure cinématique du deuxième robot.

On utilisant les équations (5.29), (5.30), (5.12), (5.13) et (5.14), et après avoir calculé les valeurs de variables articulaires sur MATLAB, on obtient le tableau suivant :

Tableau 5. 4: Les 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.

La configuration 1 : (Elbow down)

- Le logiciel MATLAB donne aussi les graphes suivants :

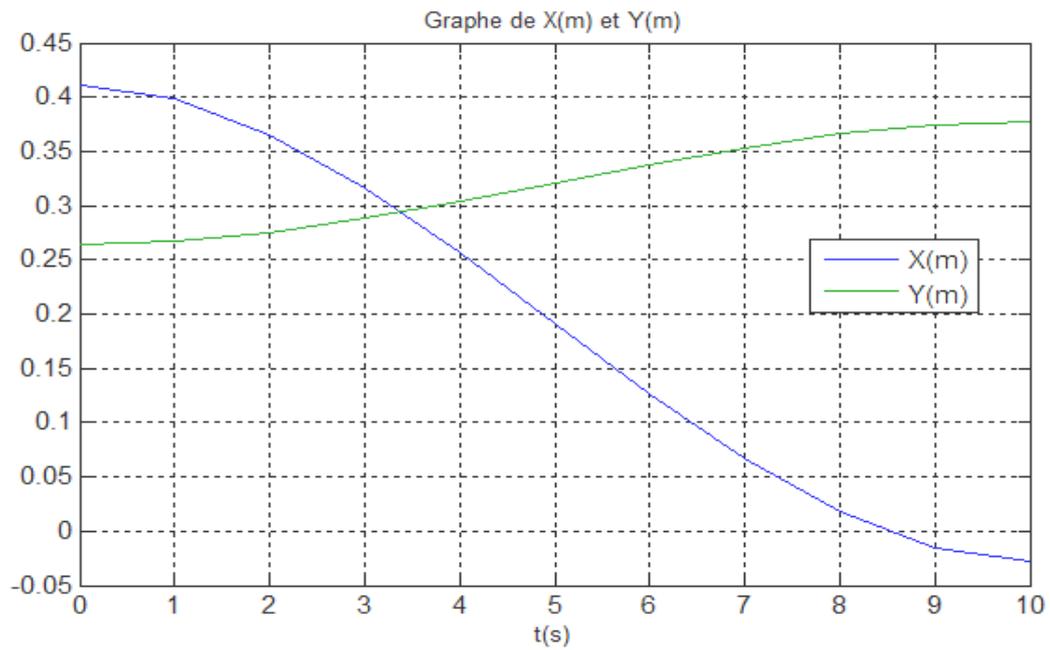


Figure 5. 32: Le déplacement suivant X et Y.

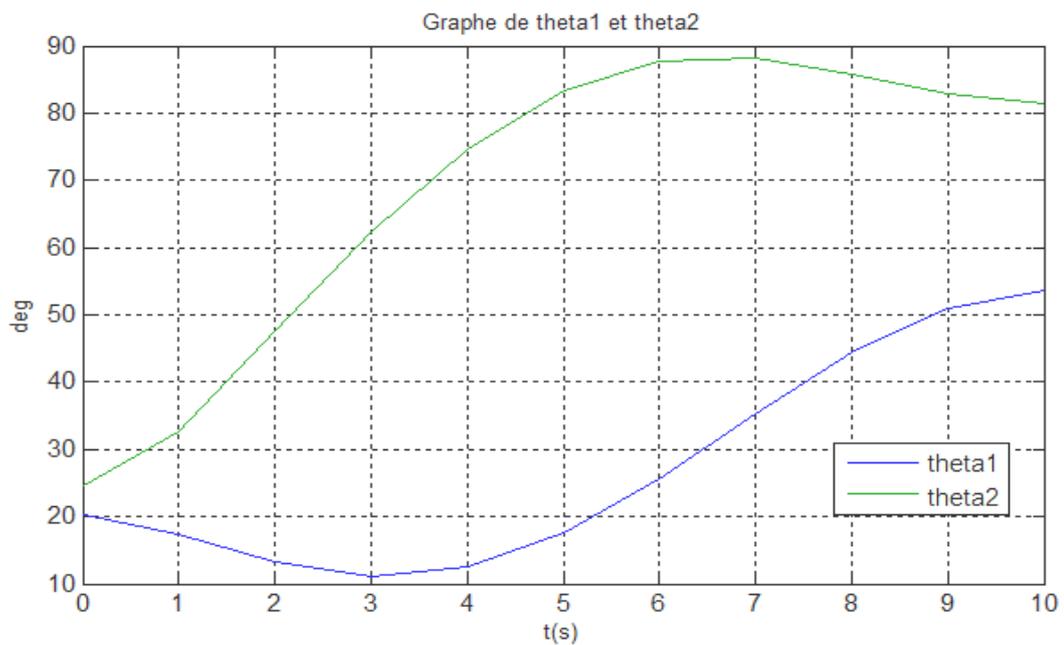
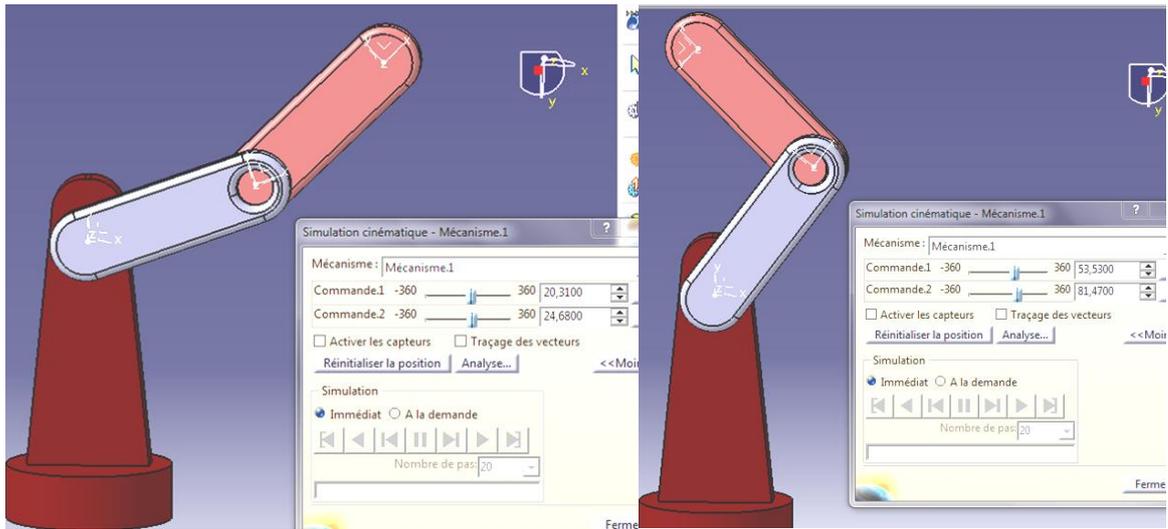


Figure 5. 33: La variation des angles  $\theta_1, \theta_2$  .

Le robot en première configuration sur CATIA V5 : (Elbow down)

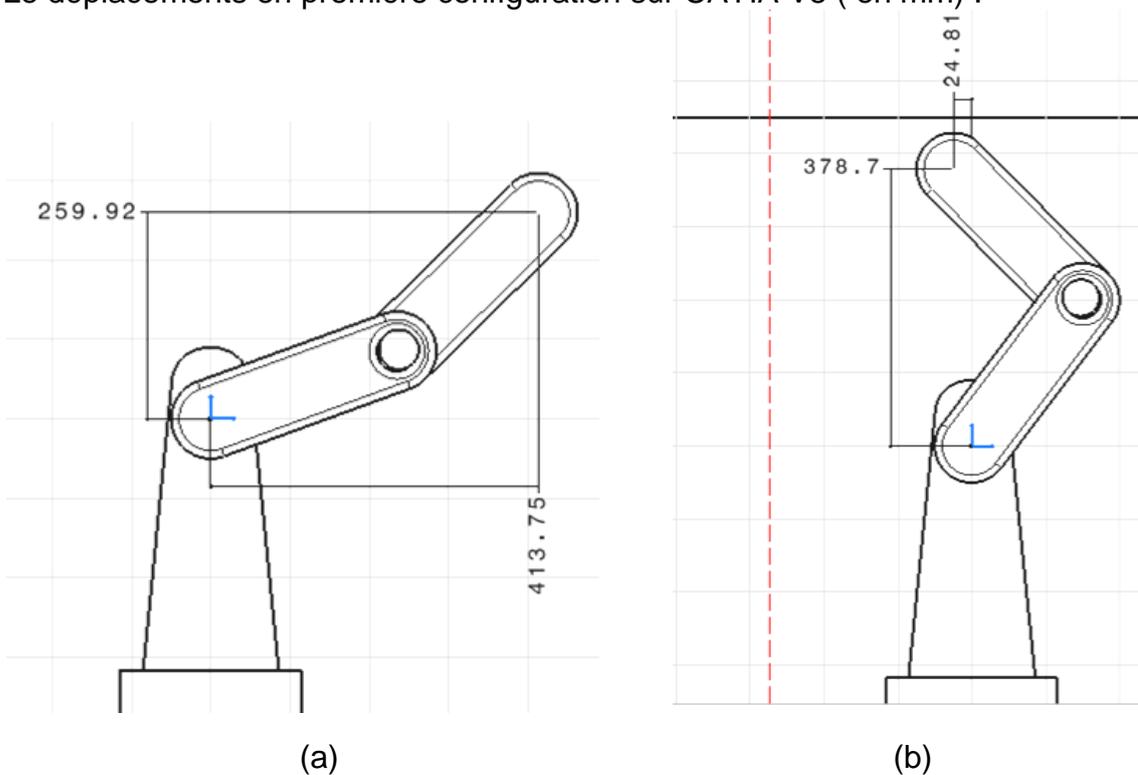


(a)

(b)

Figure 5. 34: (a) La position initiale. (b) La position finale.

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



(a)

(b)

Figure 5. 35: (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 :

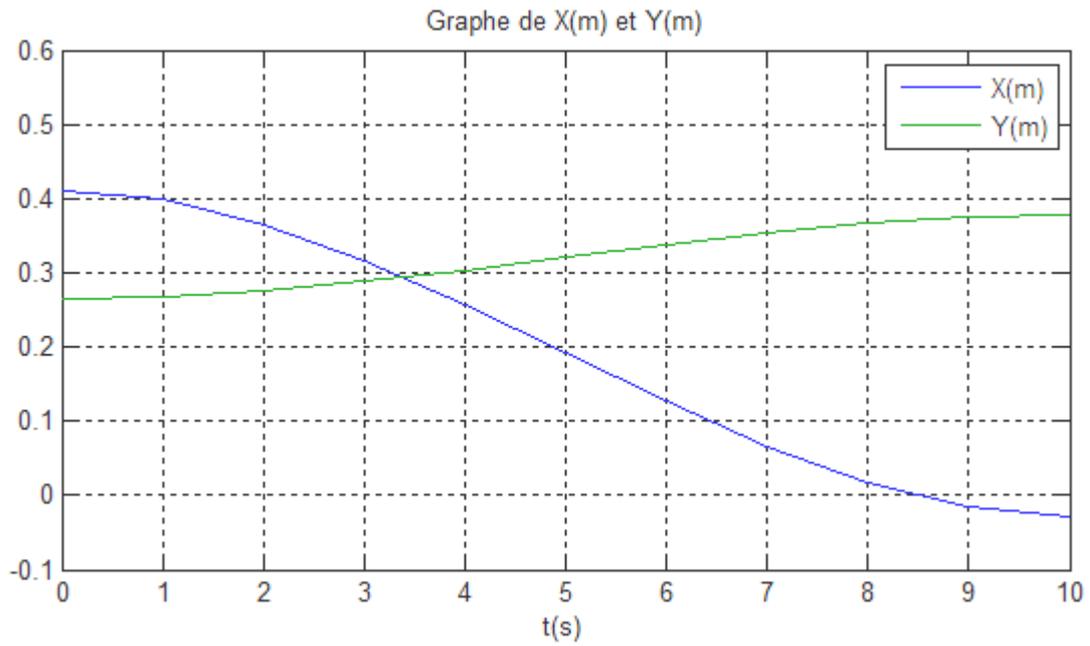


Figure 5. 36: Le déplacement suivant X et Y .

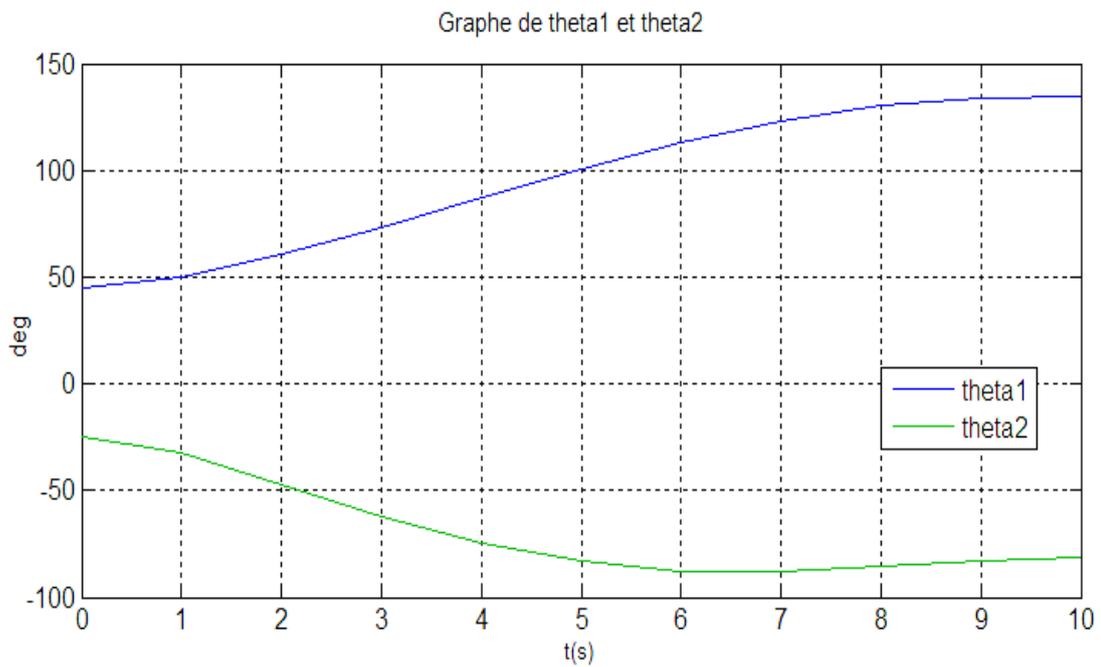
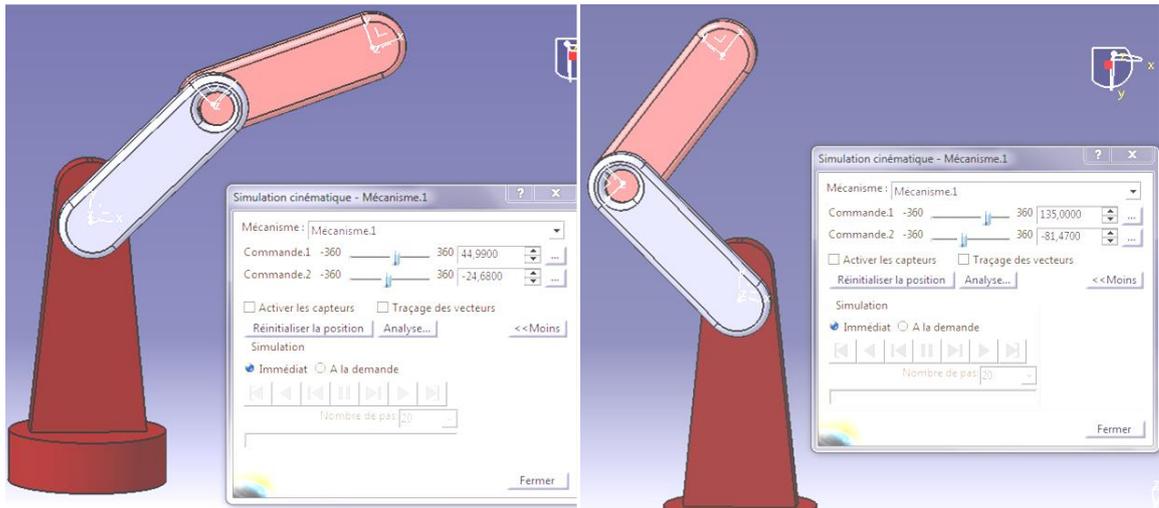


Figure 5. 37: La variation des angles  $\theta_1, \theta_2$  .

Le robot en deuxième configuration sur CATIA V5 : (elbow up)

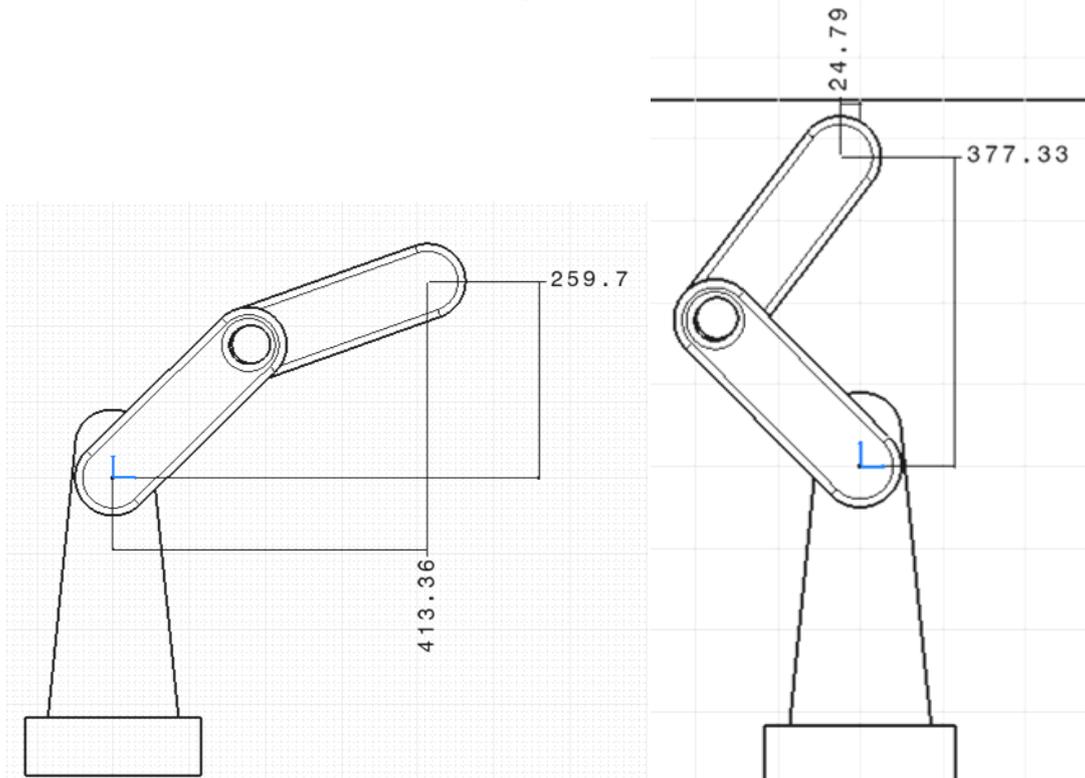


(a)

(b)

Figure 5. 38: (a) La position initiale (b) La position finale.

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

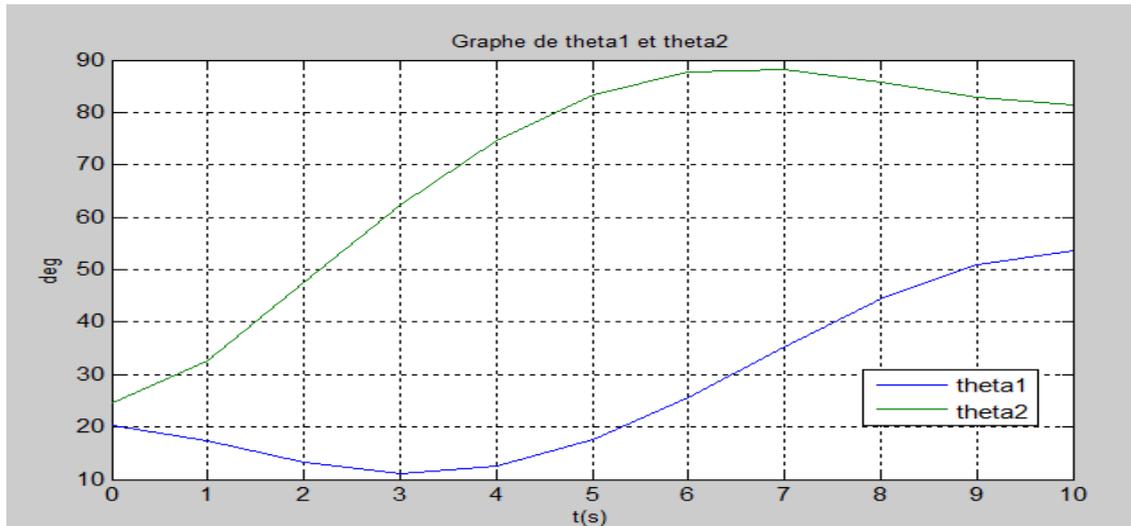


(a) La position initiale

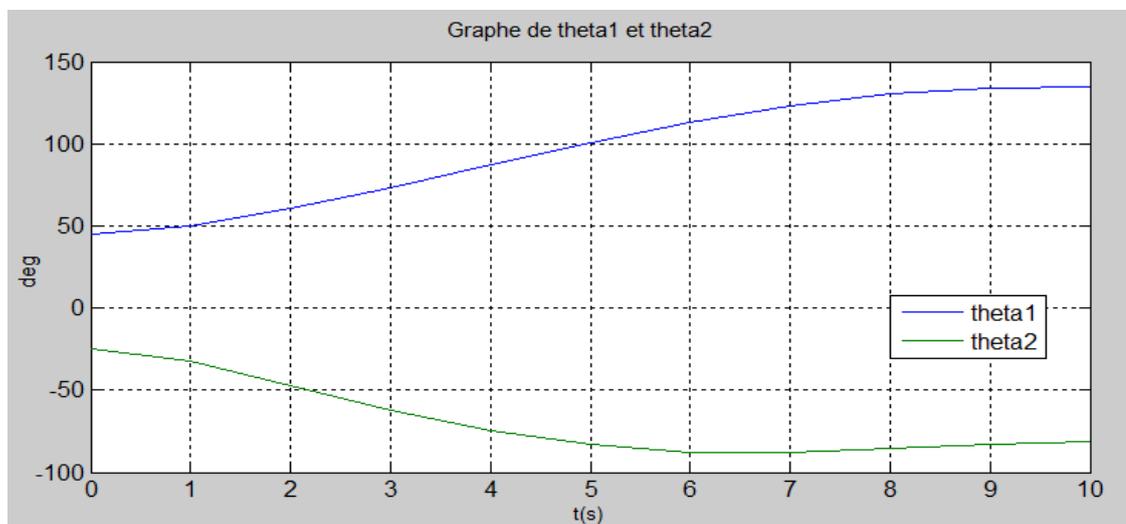
(b) La position finale

Figure 5. 39: 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 5. 40: Comparaison des angles  $\theta_1, \theta_2$  entre les deux configurations.

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

On peut comparer la géométrie de deux configurations à l'aide de CATIA V5, à la position initiale et à la position finale :

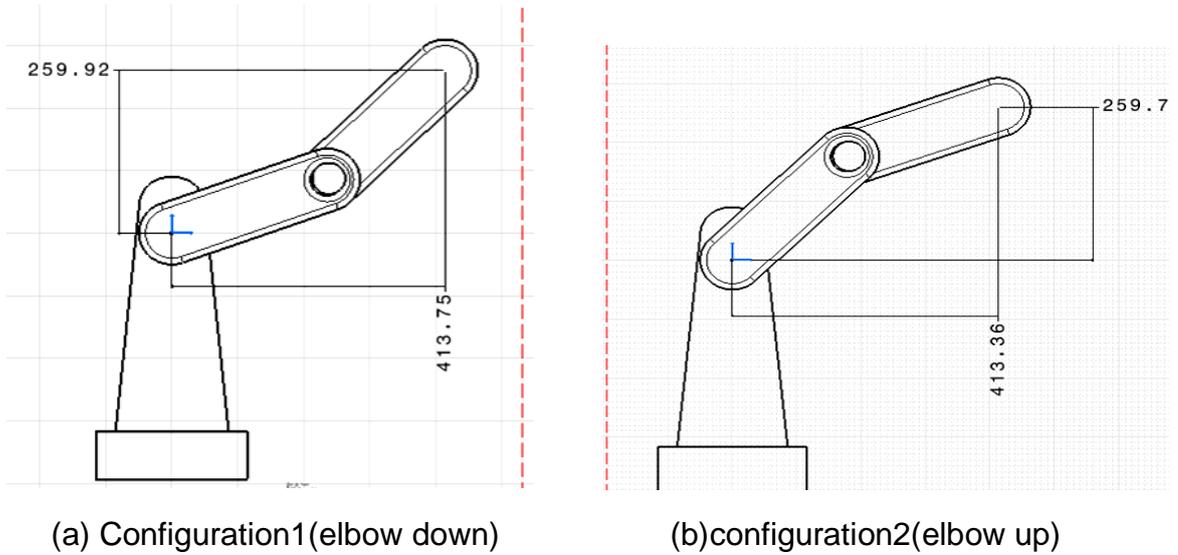


Figure 5. 41 : Comparaison de la géométrie des deux configurations à t = 0(s).

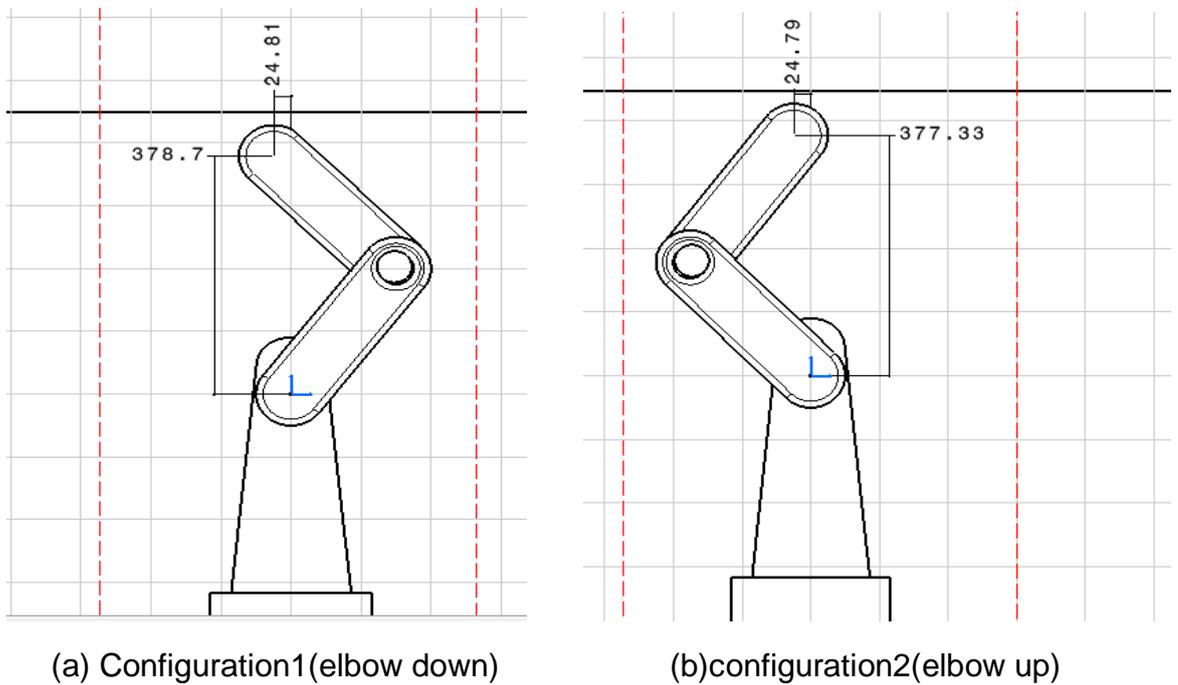


Figure 5. 42 : Comparaison de la géométrie des deux configurations à t = 10(s).

La comparaison des deux configurations sur CATIA V5 donne un aperçu sur la géométrie de deux configurations. On peut choisir donc celle qui nous convient dans notre opération.

Calcul des vitesses (articulaires et opérationnelles) :

Par une dérivation des équations (5.29) et (5.30) on trouve les équations suivantes :

$$\dot{x} = -0.0263652 t + 0.0263652 t^2 \quad (5.31)$$

$$\dot{y} = 0.006854 t - 0.0068544 t^2 \quad (5.32)$$

A partir de (5.19), (5.31) et (5.32), on a élaboré sur MATLAB un programme qui nous calcule les vitesses opérationnelles et articulaires, ainsi que les accélérations, on obtient les graphes suivants :

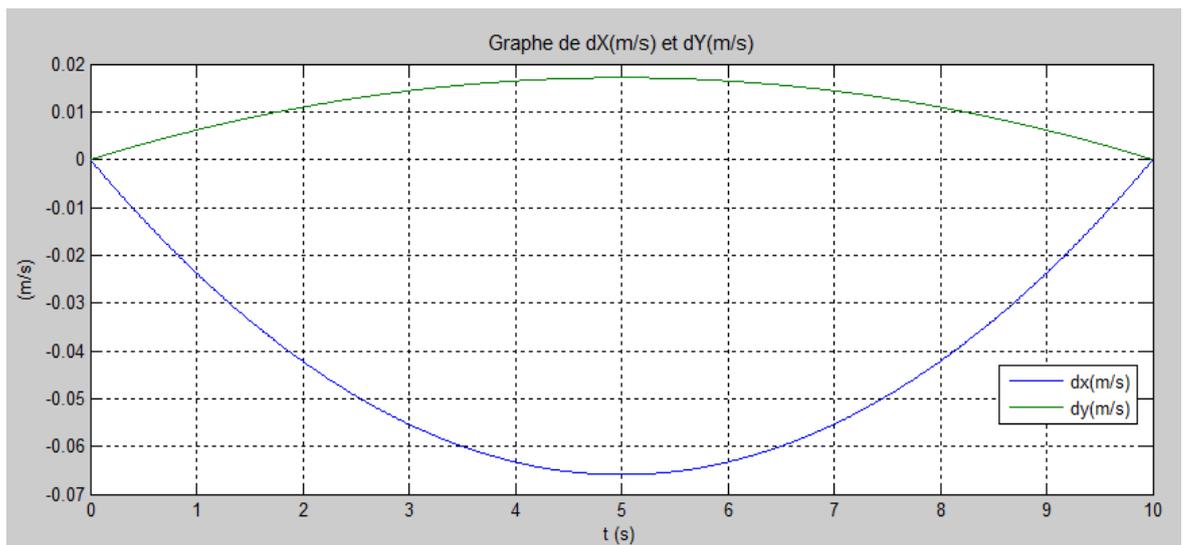


Figure 5. 43: Vitesse selon x et selon y.

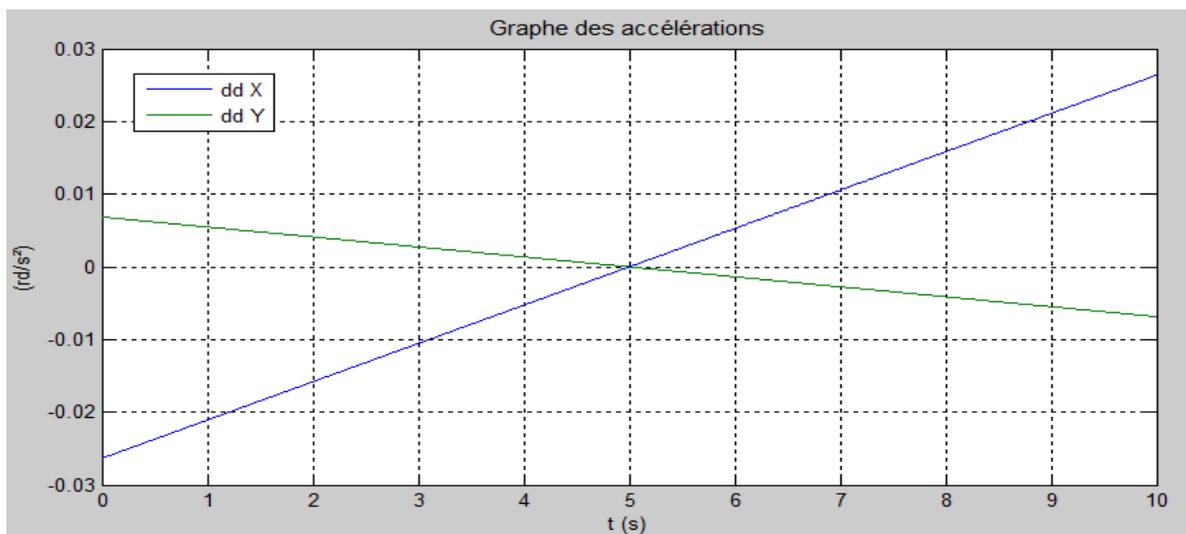
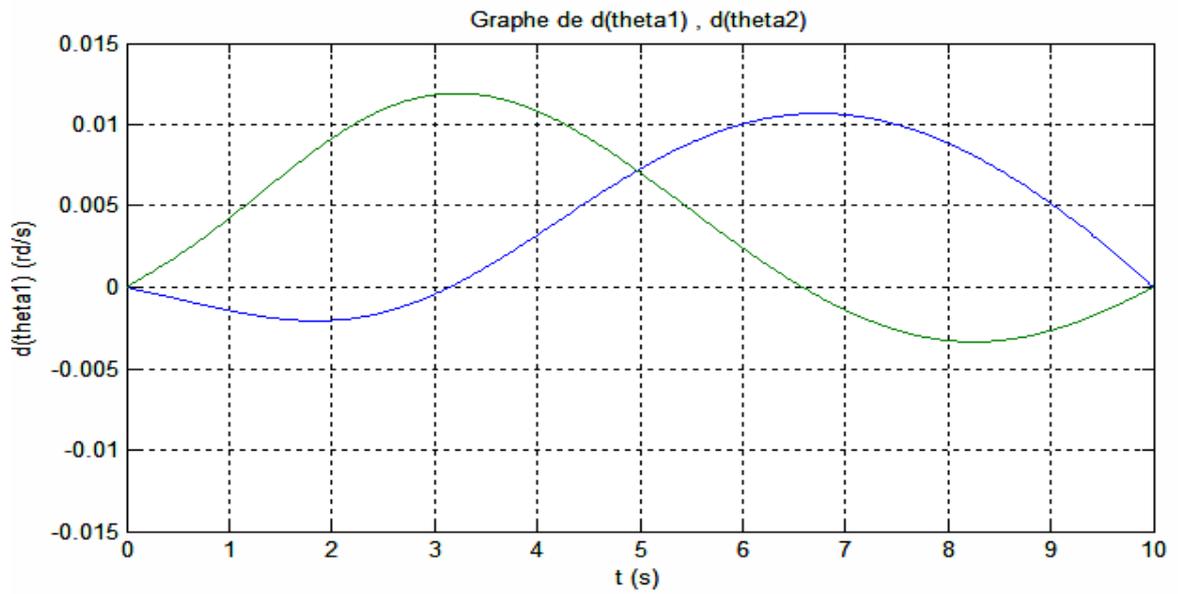
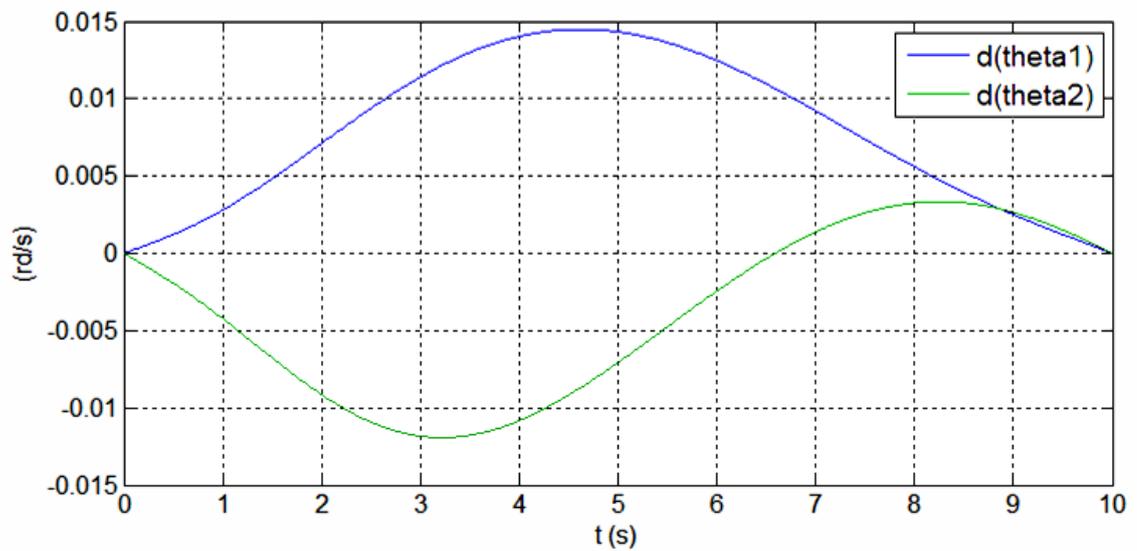


Figure 5. 44: Accélération selon x et selon y.



(a)



(b)

Figure 5. 45 : 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.

b) Mouvement avec obstacle :

Nous supposons que le robot doit éviter un obstacle circulaire au point  $P_3$  tel que :

$$X_{P_3} = 0,19151 \quad Y_{P_3} = 0,32071$$

$$(X - X_{P_3})^2 + (Y - Y_{P_3})^2 = 0.025^2$$

Pour trouver la trajectoire entre  $P_1$  et  $P_2$  en évitant l'obstacle, on va choisir l'arc dont le centre situe sur le bissecteur de  $P_1P_2$ , cet arc doit être dans l'espace de travail de notre robot :

$$(l_1 - l_2)^2 < X^2 + Y^2 < (l_1 + l_2)^2$$

$$0 < X^2 + Y^2 < 0.5^2$$

Le centre de la trajectoire circulaire doit suivre la ligne,

$$Y - Y_{P_3} = 3.8464 (Y - Y_{P_3})$$

On va choisir le point  $P_c$ , le centre du trajectoire circulaire tel que :

$$X_c = 0.1 \quad Y_c = -0.06$$

L'équation de trajectoire est donc :

$$(X - X_c)^2 + (Y - Y_c)^2 = 0.45^2$$

A l'aide d'une interpolation polynomiale on obtient les équations de trajectoire suivantes :

$$X = 0.41122 - 0.0043942 t^3 + 0.00065913 t^4 - 0.0000263652 t^5 \quad (5.33)$$

$$Y = Y_c + \sqrt{0.45^2 - (X - X_c)^2} \quad (5.34)$$

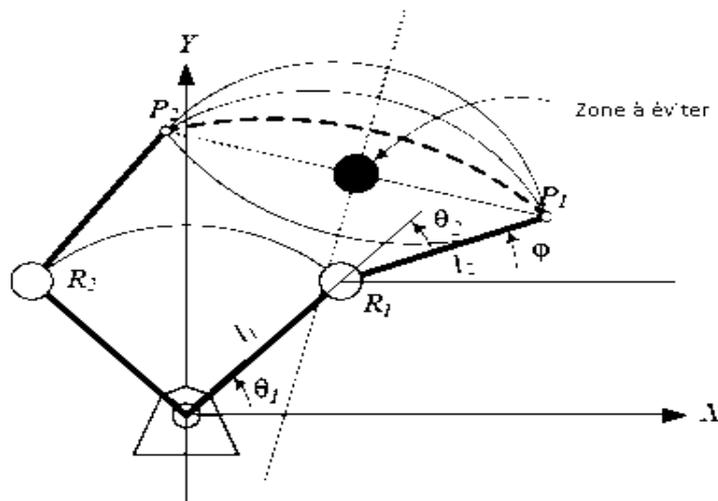
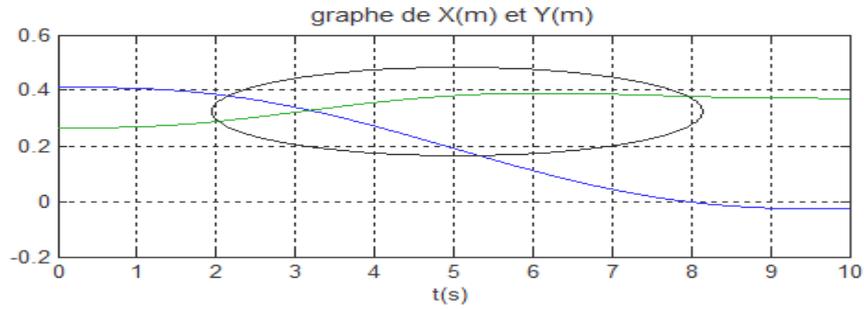
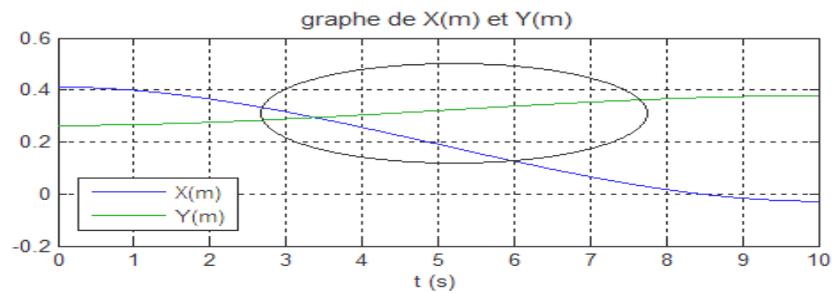


Figure 5. 46 : La trajectoire en évitant un obstacle circulaire.

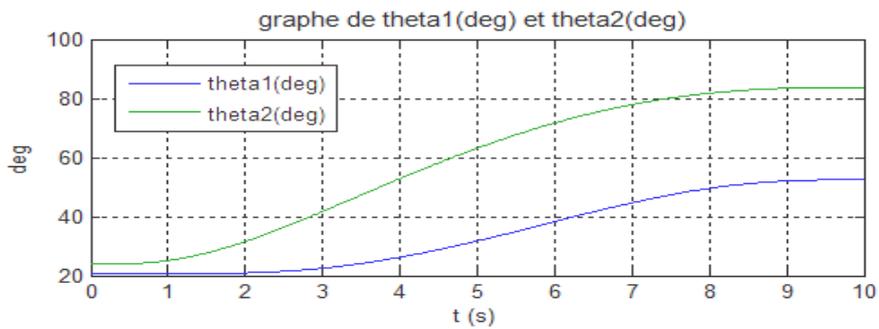
Les graphes suivants illustrent une comparaison des variables articulaires et opérationnelles entre le cas précédents et le cas d'un évitement d'obstacle :



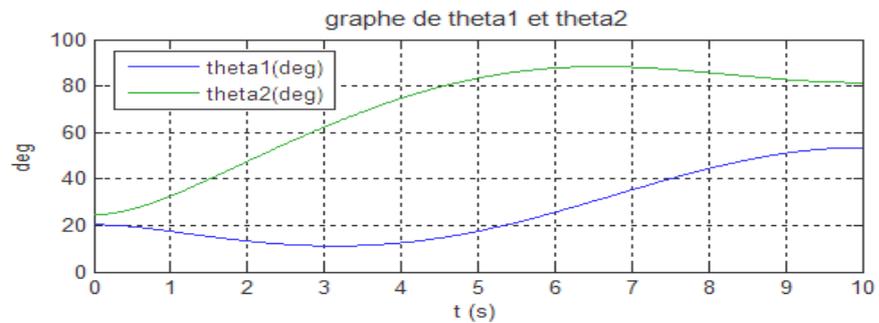
Cas d'un obstacle



Le cas classique



Cas d'un obstacle



Le cas classique

Figure 5. 47 : Comparaison des variables opérationnelles et articulaires.

Comparaison entre La trajectoire à partir du model conçu sur le logiciel CATIAV5 et la trajectoire tracée sur le logiciel MATLAB :

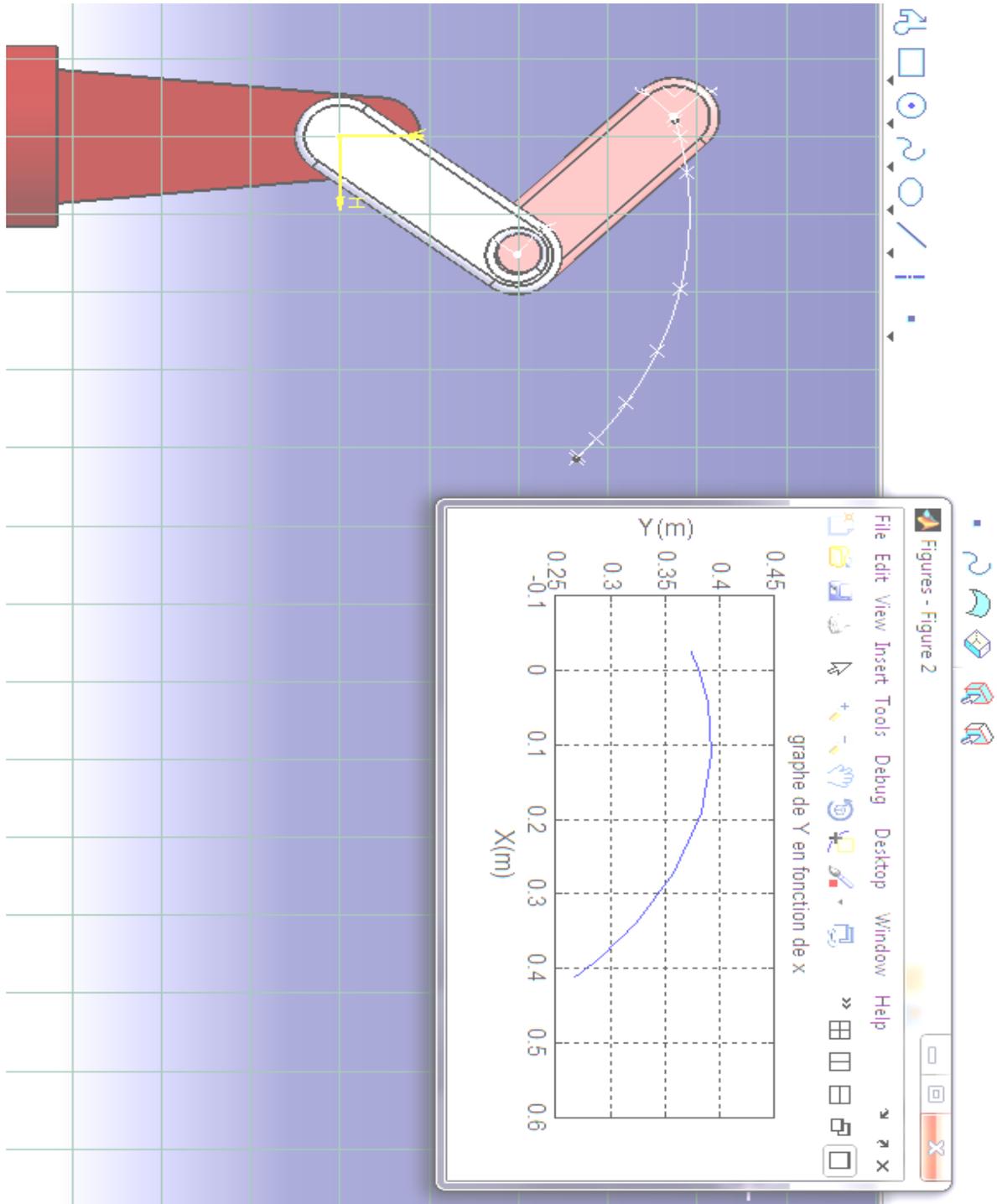
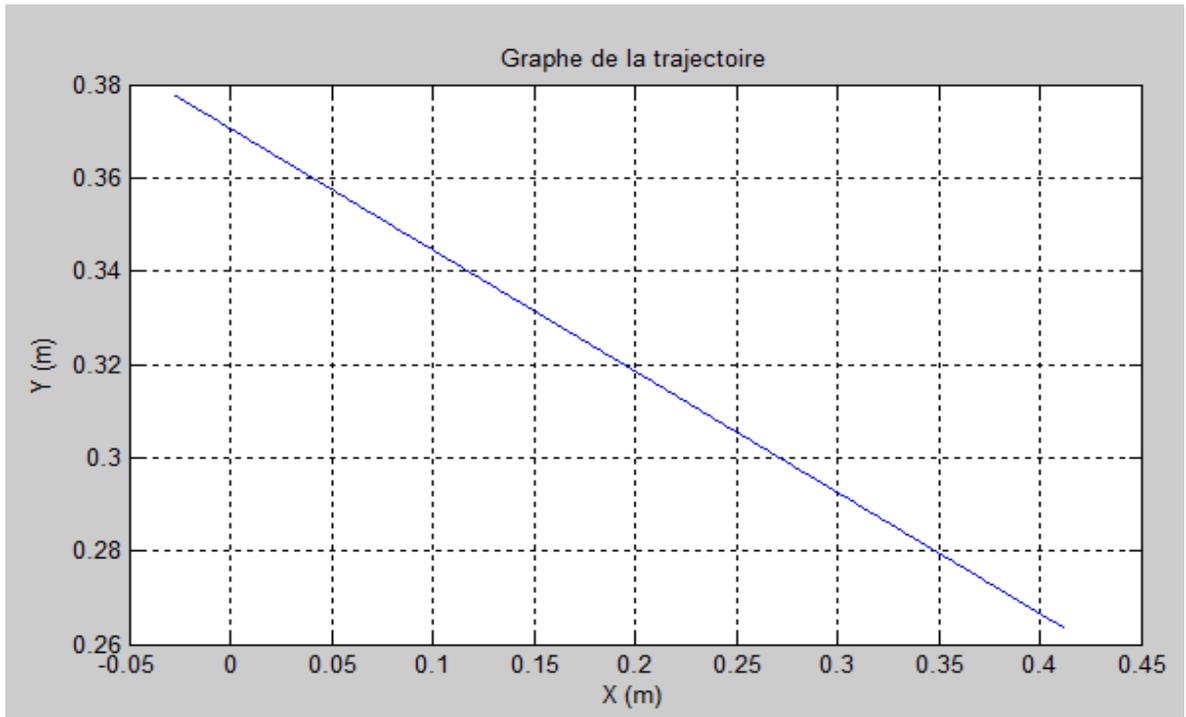
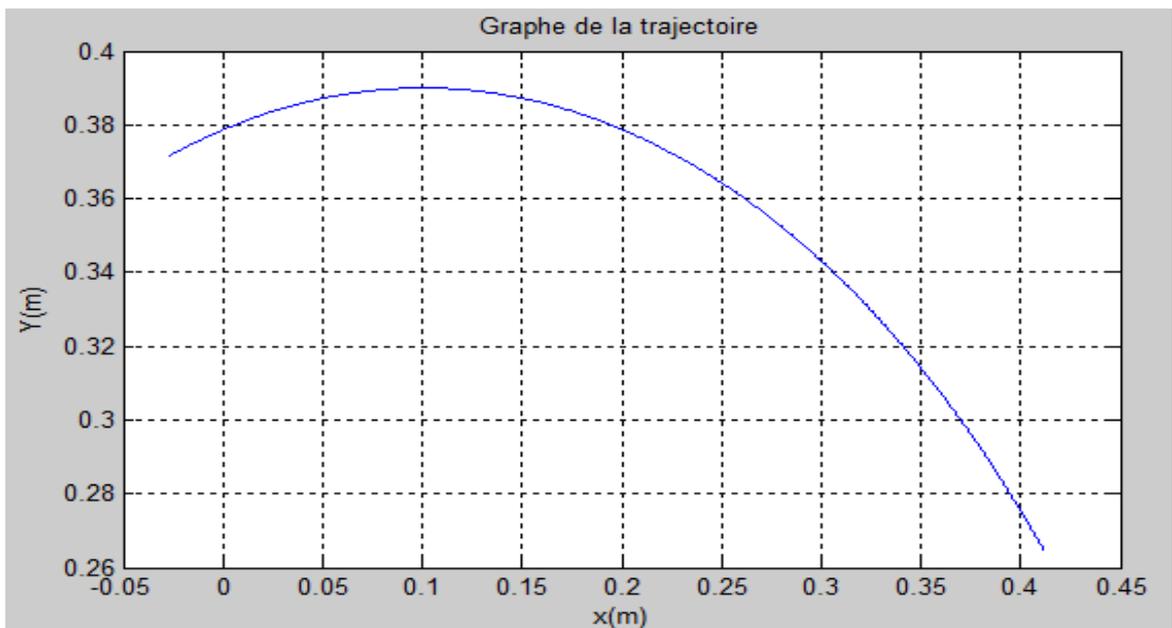


Figure 5. 48 : Comparaison entre la trajectoire entre le modèle conçu sur CATIA et le programme élaboré sur MATLAB.

Comparaison entre la première trajectoire sans obstacle et la deuxième avec l'obstacle circulaire :



(a)



(b)

Figure 5. 49 : (a) trajectoire rectiligne d'un mouvement sans obstacle (b) trajectoire circulaire d'un mouvement avec obstacle.

### 5.3.2 La deuxième solution : (en cas d'un positionnement dans l'espace)

Supposant que le point d'insertion détecté par la sonde ultrasonique est dans l'espace. Cela veut dire qu'un robot à deux degrés de liberté est incapable d'atteindre un point dans l'espace étant donné qu'il travaille dans le plan. C'est la raison pour laquelle on va opter dans ce cas à un autre robot solution, un robot sphérique à 3ddl. On va étudier donc un robot anthropomorphique R.R.R.

#### Chaîne cinématique :

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 se faire, nous utilisons la notation de Denavit-Hartenberg standard. La Figure 2.4 permet de comprendre cette architecture.

#### Les 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 5. 5: Paramètres géométriques du robot.

Type de couple	Valeur des paramètres			
	$\theta_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$a_i$
Rotatif	$\theta_1$	$\pi/2$	0	$l_1$
tatif	$\theta_2$	0	$l_2$	0
Rotatif	$\theta_3$	$\pi/2$	$l_2$	0

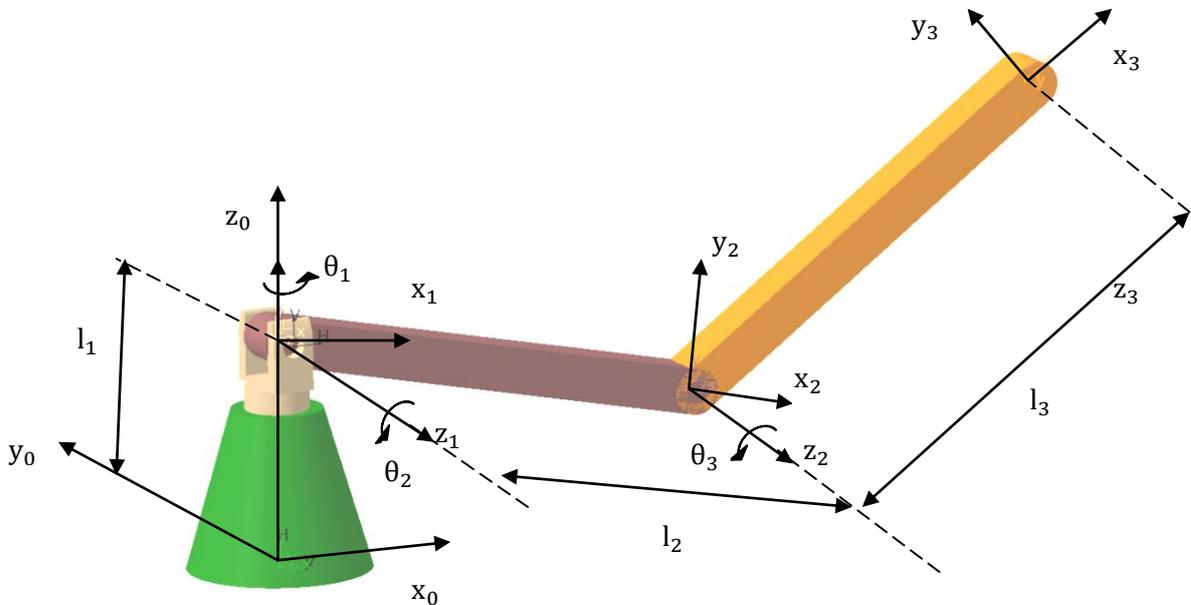


Figure 5. 50 : Architecture de la chaîne cinématique du manipulateur à structure RRR(deuxième robot solution).

Calcul de Modèle géométrique directe M.G.D:

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

La détermination du modèle géométrique direct (MGD) :les matrices de passage des repères  $R_{i-1}$  aux repères  $R_i$ , exprimées par les matrices homogènes  ${}^{i-1}T_i$ .

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & S_1 & 0 \\ S_1 & 0 & -C_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.35)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & 0 & l_2 C_2 \\ S_2 & C_2 & 0 & l_2 S_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.36)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} C_3 & 0 & S_3 & 0 \\ S_3 & 0 & -C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.37)$$

Les équations du modèle cinématique directe sont données donc :

$${}^0T_4 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \quad (5.38)$$

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} S_x & N_x & A_x & P_x \\ S_y & N_y & A_y & P_y \\ S_z & N_z & A_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.39)$$

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} C_1 C_{23} & S_1 & C_1 S_{23} & l_2 C_1 C_2 \\ S_1 C_{23} & -C_1 & S_1 S_{23} & l_2 S_1 C_2 \\ S_{23} & 0 & -C_{23} & l_2 S_2 + l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.40)$$

Donc :

$$\begin{cases} S_x = C_1 C_{23} \\ S_y = S_1 C_{23} \\ S_z = S_{23} \end{cases} \quad (5.41)$$

$$\begin{cases} N_x = S_1 \\ N_y = -C_1 \\ N_z = 0 \end{cases} \quad (5.42)$$

$$\begin{cases} A_x = C_1 S_{23} \\ A_y = S_1 C_{23} \\ A_z = -C_{23} \end{cases} \quad (5.43)$$

$$\begin{cases} P_x = l_2 C_1 C_2 \\ P_y = l_2 S_1 C_2 \\ P_z = l_2 S_2 + l_1 \end{cases} \quad (5.44)$$

### Calcul 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  $d_i$  et  $a_i$  sont nulles et les angles  $\theta_i$  et  $\alpha_i$  sont égaux à  $0, \mp\pi/2$ ), le modèle géométrique inverse (MGI) peut être obtenu analytiquement via la méthode de Paul.

### Équations de position :

$${}^0dp = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_3 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.45)$$

$$\begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_3 S_{23} C_1 + l_2 C_1 C_2 \\ l_3 S_{23} S_1 + l_2 S_1 C_2 \\ l_1 - l_3 C_{23} + l_2 S_2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.46)$$

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

$$T_{10} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ 1 \end{bmatrix} = {}^1T_2 {}^2T_3 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.47)$$

Il en résulte les équations suivantes :

$$\begin{cases} C_1 d_x + S_1 d_y = l_3 S_{23} + l_2 C_3 \\ l_1 - d_z = -l_3 C_{23} + l_2 S_2 \\ d_x S_1 - d_y C_1 = 0 \end{cases} \quad (5.48)$$

La deuxième équation permet de déduire la valeur de  $\theta_1$ , en effet, on a :

$$d_x S_1 - d_y C_1 = 0$$

$$\theta_1 = \text{atan2}(d_x, d_y) \quad (5.49)$$

$$\begin{cases} l_3 C_{23} = C_1 d_x + S_1 d_y - l_2 C_2 \\ l_3 C_{23} = l_2 S_2 - d_z \end{cases}$$

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

On en déduit la valeur suivante du paramètre  $\theta_2$  :

$$\theta_3 = \arccos\left(\frac{l_1 - Z + l_2 \sin\theta_2}{l_3}\right) - \theta_2 \quad (5.50)$$

$$\theta_2 = 2 \arctan \frac{-C_2 + \sqrt{C_2^2 - C_1 C_3}}{C_1} \quad (5.51)$$

Avec :

$$C_1 = l_1^2 - 2l_1 Z + l_2^2 + \frac{2l_2 X}{\cos\theta_1} - l_3^2 + \frac{X^2}{\cos^2\theta_1} + Z^2 \quad (5.52)$$

$$C_2 = 2l_1 l_2 - 2l_2 Z \quad (5.53)$$

$$C_3 = l_1^2 - 2l_1 Z + l_2^2 - \frac{2l_2 X}{\cos\theta_1} - l_3^2 + \frac{X^2}{\cos^2\theta_1} + Z^2 \quad (5.54)$$

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 :

$$P_1 = \begin{bmatrix} 1.5 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad P_1 = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \\ 1.5 \end{bmatrix}$$

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 [75]:

$$X = 1.5 - 0.025 t^3 + 0.00375t^4 - 0.00015t^5 \quad (5.55)$$

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

$$Y = 0.010 t^3 - 0.0015t^4 + 0.00006t^5 \quad (5.56)$$

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

$$Z = 1 + 0.005 t^3 - 0.00075t^4 + 0.00003t^5 \quad (5.57)$$

Tableau 5. 1 : les variables articulaires et opérationnelles.

Temps (sec)	Tita1 (deg)	Tita2 (deg)	Tita3 (deg)	d <sub>x</sub> (m)	d <sub>y</sub> (m)	d <sub>z</sub> (m)
0	0	56.1962	14.4775	1.5000	0	1.0000
1	0.3317	57.4680	12.7275	1.4786	0.0086	1.0043
2	2.4473	64.5880	-3.4318	1.3552	0.0579	1.0290
3	8.4915	79.1550	-12.7706	1.0923	0.1631	1.0815
4	24.1981	99.8294	-28.8920	0.7064	0.3174	1.1587
5	63.4349	115.4152	-34.2289	-0.2500	0.5000	1.2500
6	106.8248	106.2505	-23.0715	-0.2064	0.6826	1.3413
7	125.2876	88.3609	3.0145	-0.5923	0.8369	1.4185
8	132.2325	74.1933	16.3139	-0.8552	0.9421	1.4710
9	134.6266	66.6675	27.7772	-0.9786	0.9914	1.4957
10	135.0000	65.2644	30.0000	-1.0000	1.0000	1.5000

On obtient ainsi sur MATLAB les graphes suivants :

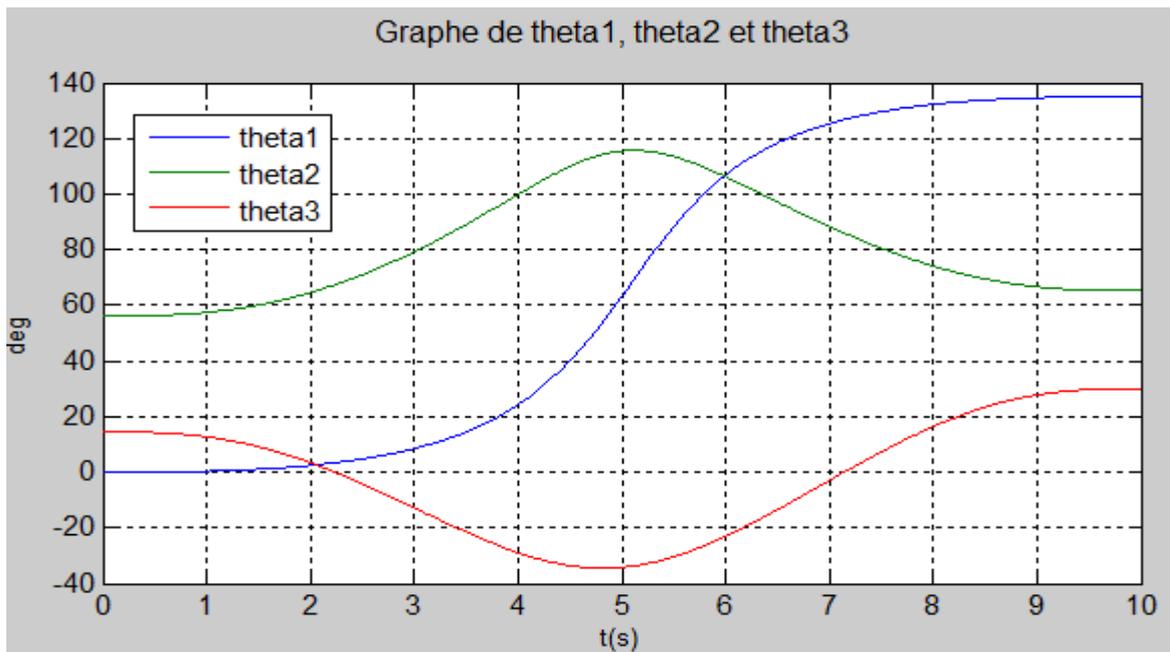


Figure 5. 51 : Variation des angles  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  (variables articulaires).

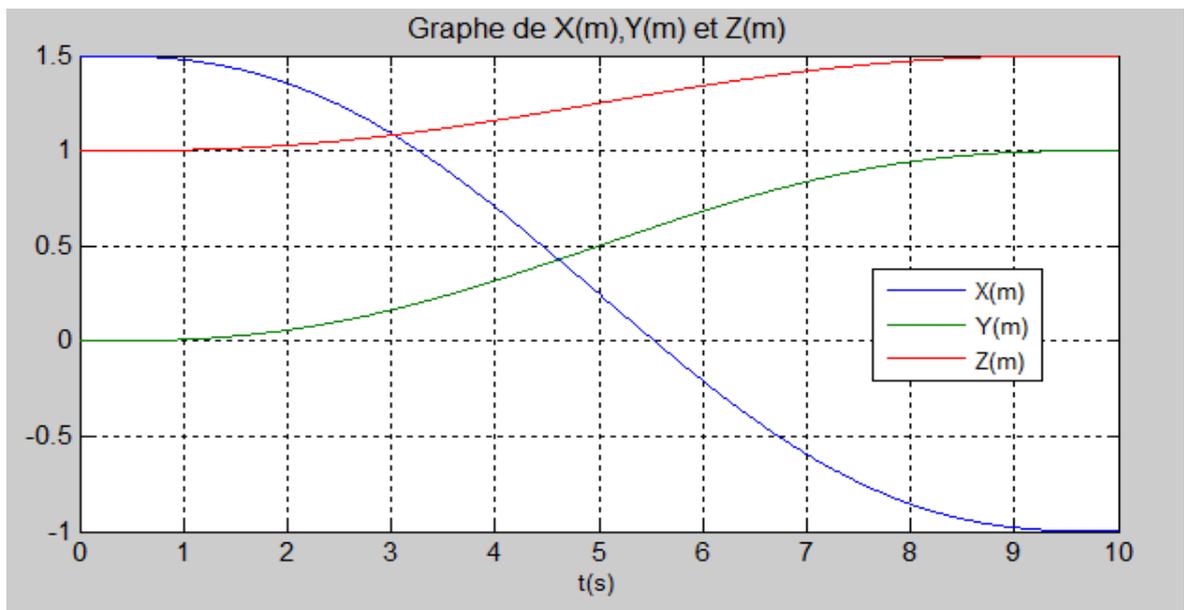


Figure 5. 52 : Les déplacements suivant X , Y et Z (variables opérationnelles).

On constate que le mouvement d'un robot dans l'espace est difficile à comprendre à l'aide des graphes qui illustrent les variables articulaires et opérationnelles. Nous avons besoin d'un outil de conception ainsi que CATIA5 qui nous permet d'assimiler le mouvement d'un robot suivant les X, Y et Z en variant les angles dans notre cas.

On obtient sur MATLAB la variation des vitesses et des accélérations :

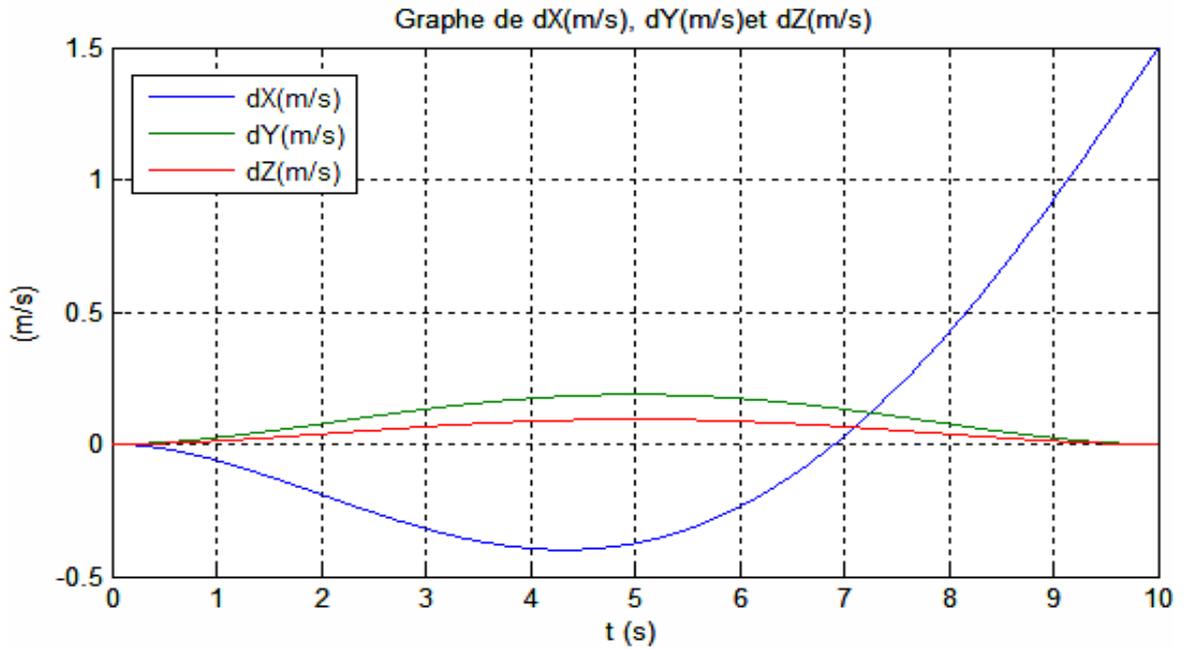


Figure 5. 53 : Les vitesses suivant X, Y et Z.

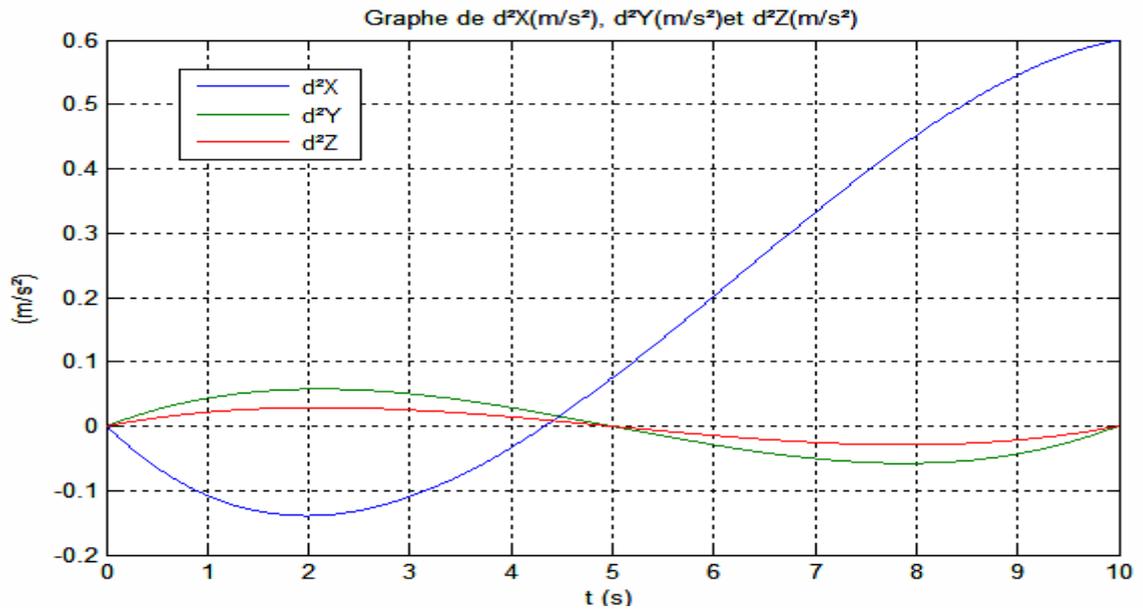


Figure 5. 54 : Les vitesses suivant X, Y et Z.

Sur CATIA on obtient :

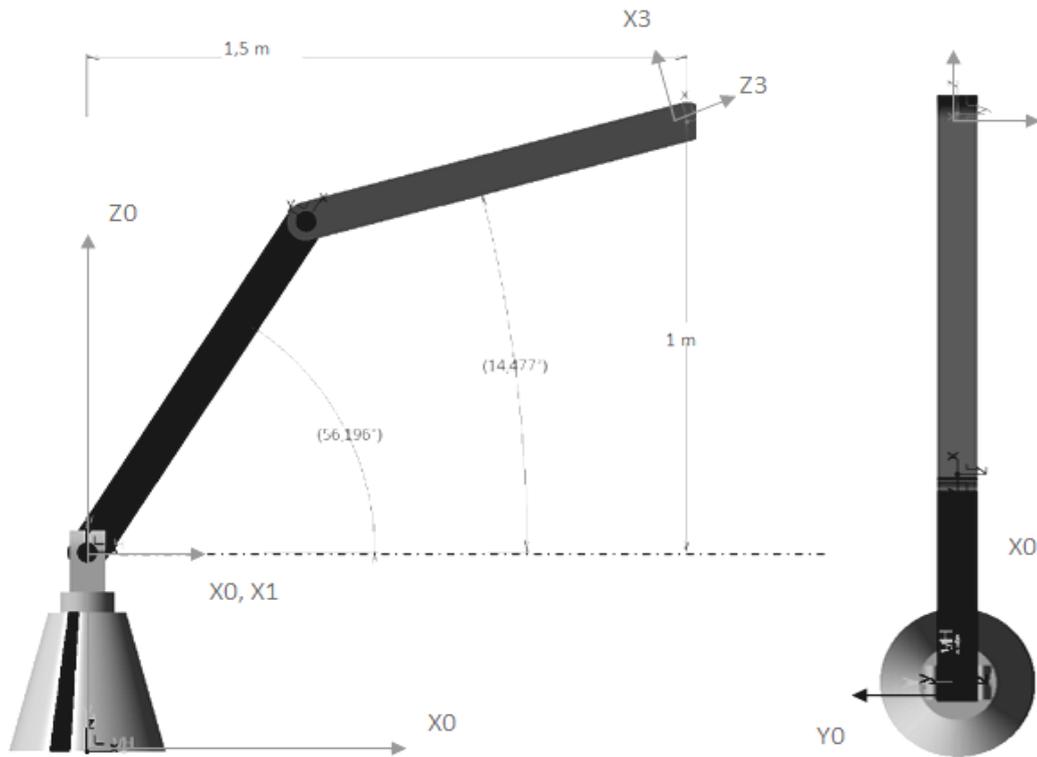


Figure 5. 55 : La position initiale.

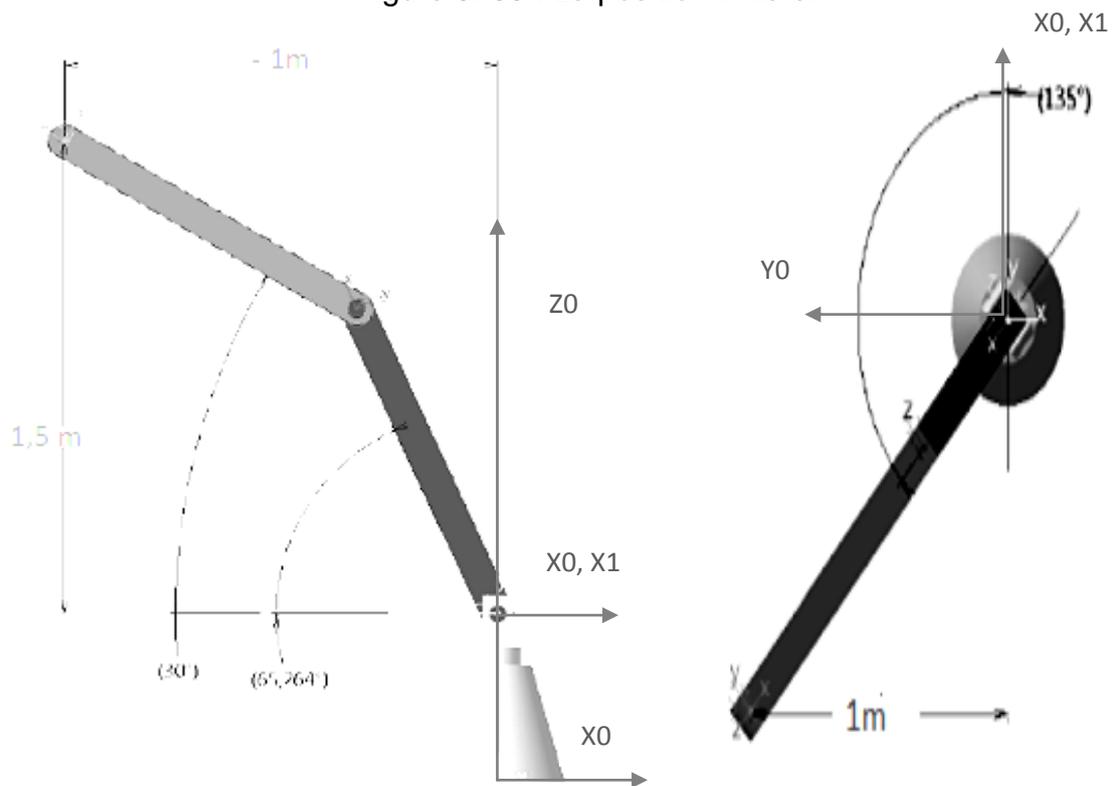


Figure 5. 56 : La position finale.

On obtient le tracé de la trajectoire :

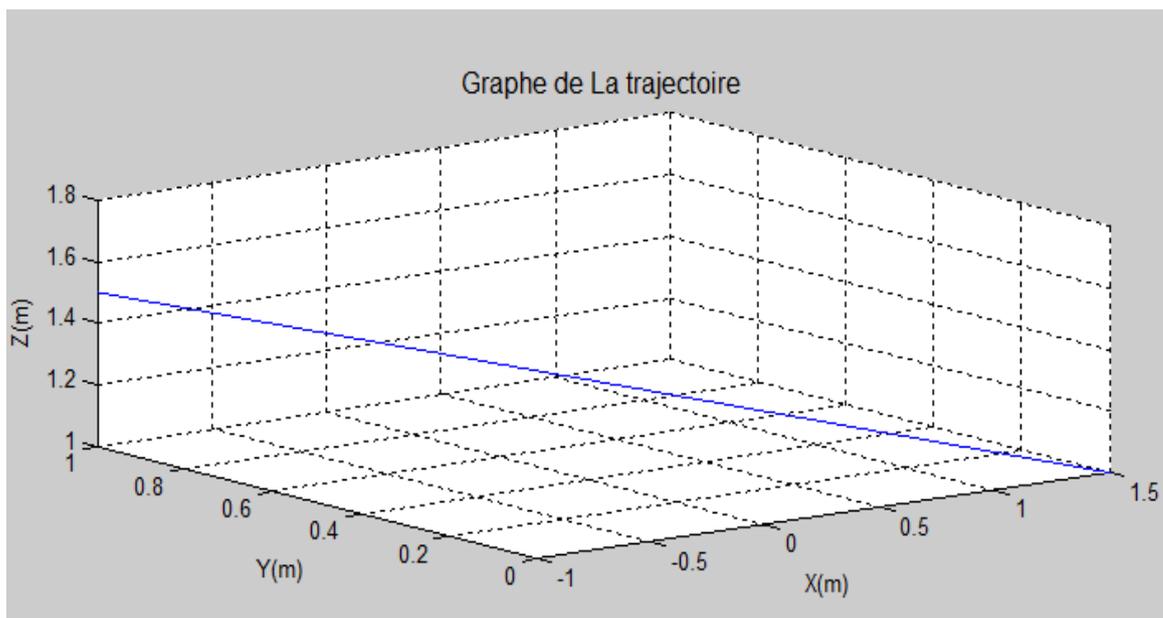


Figure 5. 57 : Le tracé de la trajectoire sur MATLAB.

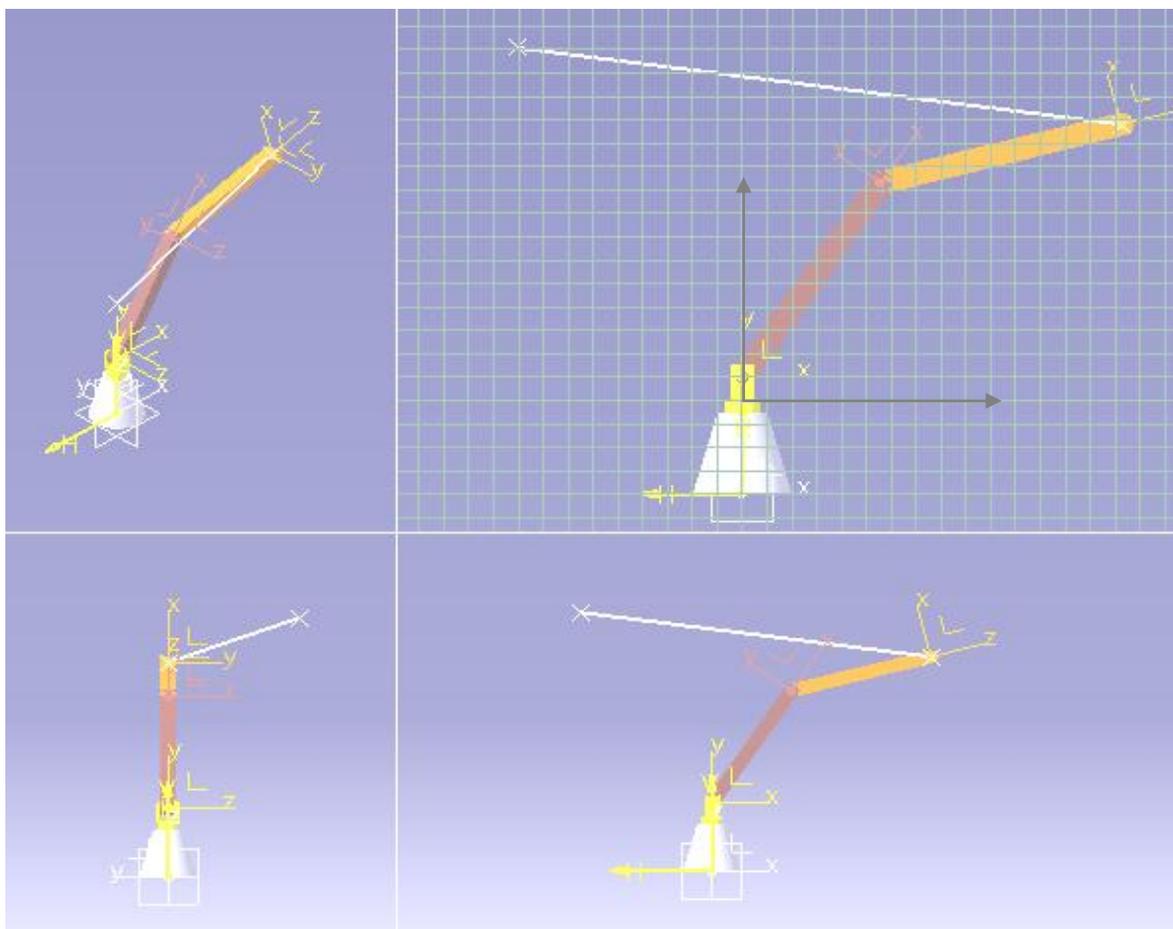


Figure 5. 58 : Le tracé de la trajectoire sur CATIAV5.

On a obtenu les mêmes tracés de la trajectoire sur les deux logiciels. Cela nous confirme que le problème est bien posé et résolu. Ça nous confirme Par ailleurs, que la conception sur le logiciel CATIAV5 ainsi que le choix des repères sont correctes.

### **Conclusion :**

l'utilisation de la robotique dans le domaine médical a commencé par adapter des robots industriels pour faire une partie où tout le travail d'un médecin, commençant par l'étude de l'acte chirurgical ou médical, l'étude de mouvement qui doit faire un être humain pour effectuer, soit une chirurgie, ou une échographie, ou d'autres activités médicales selon les différents domaines.

Après avoir étudié les mouvements utilisés par un médecin ou un chirurgien, on opte pour un robot solution qui peut effectuer les mouvements planifiés après l'étude.

Dans ce chapitre notre but est d'adapter un robot industriel à une tâche médicale composée de deux actions : balayage d'une sonde, et positionnement d'une aiguille d'où l'étude de la cinématique directe et inverse.

On a commencé par une solution simple et facile en choisissant un robot à deux degrés de liberté pour faire le balayage de la sonde, on a supposé que ce mouvement se fait dans le plan. Cependant un robot R.R est incapable d'atteindre un point dans l'espace, dans le cas où le point d'insertion de l'aiguille est situé dans l'espace. C'est la raison pour laquelle on a étudié par la suite un robot anthropomorphe de type R.R.R dont l'espace de travail est une sphère.

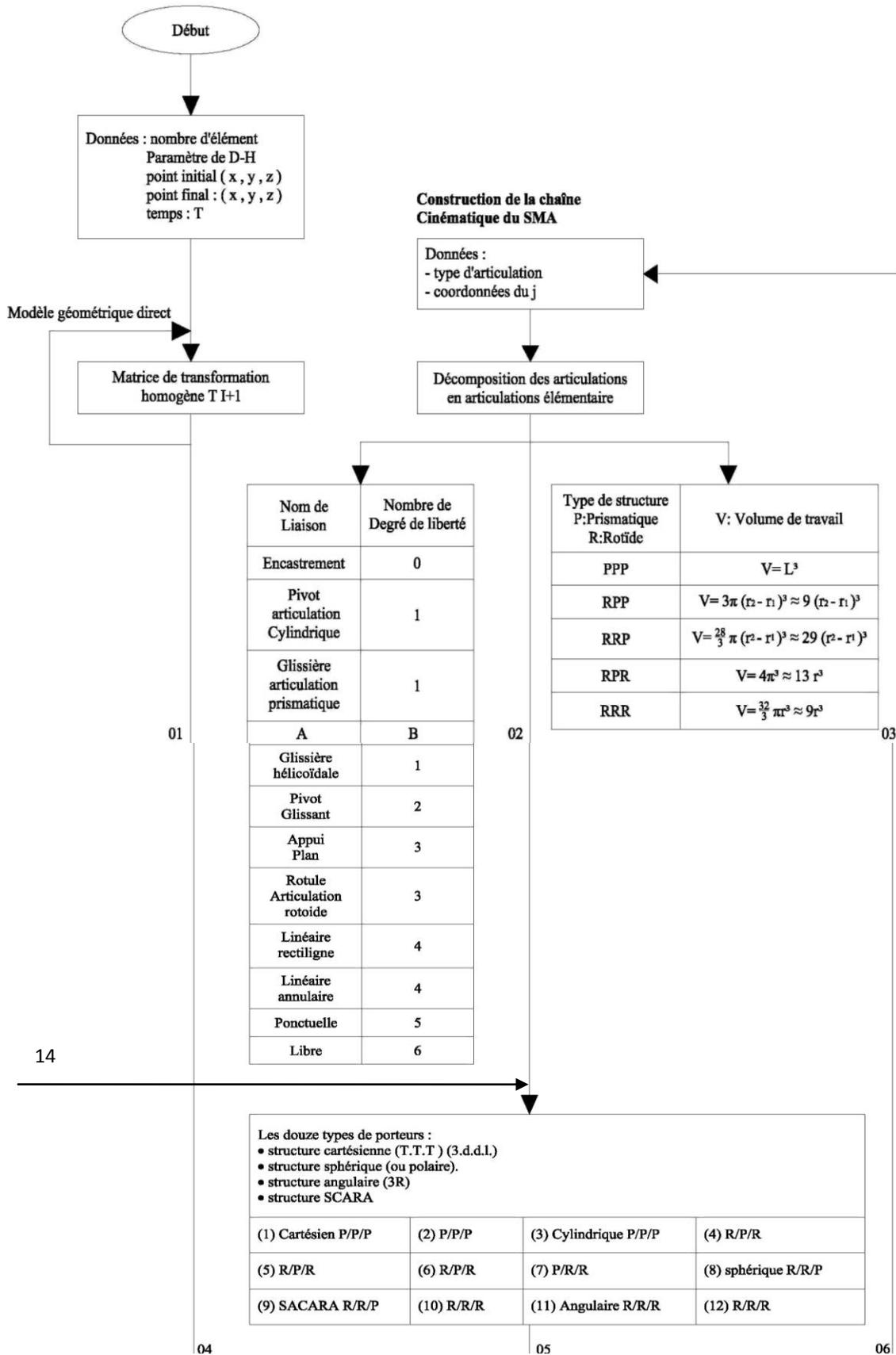
On a étudié aussi les exemples d'un changement des longueurs de bras, le cas d'un obstacle, et aussi les deux configurations (Elbow up et Elbow down).

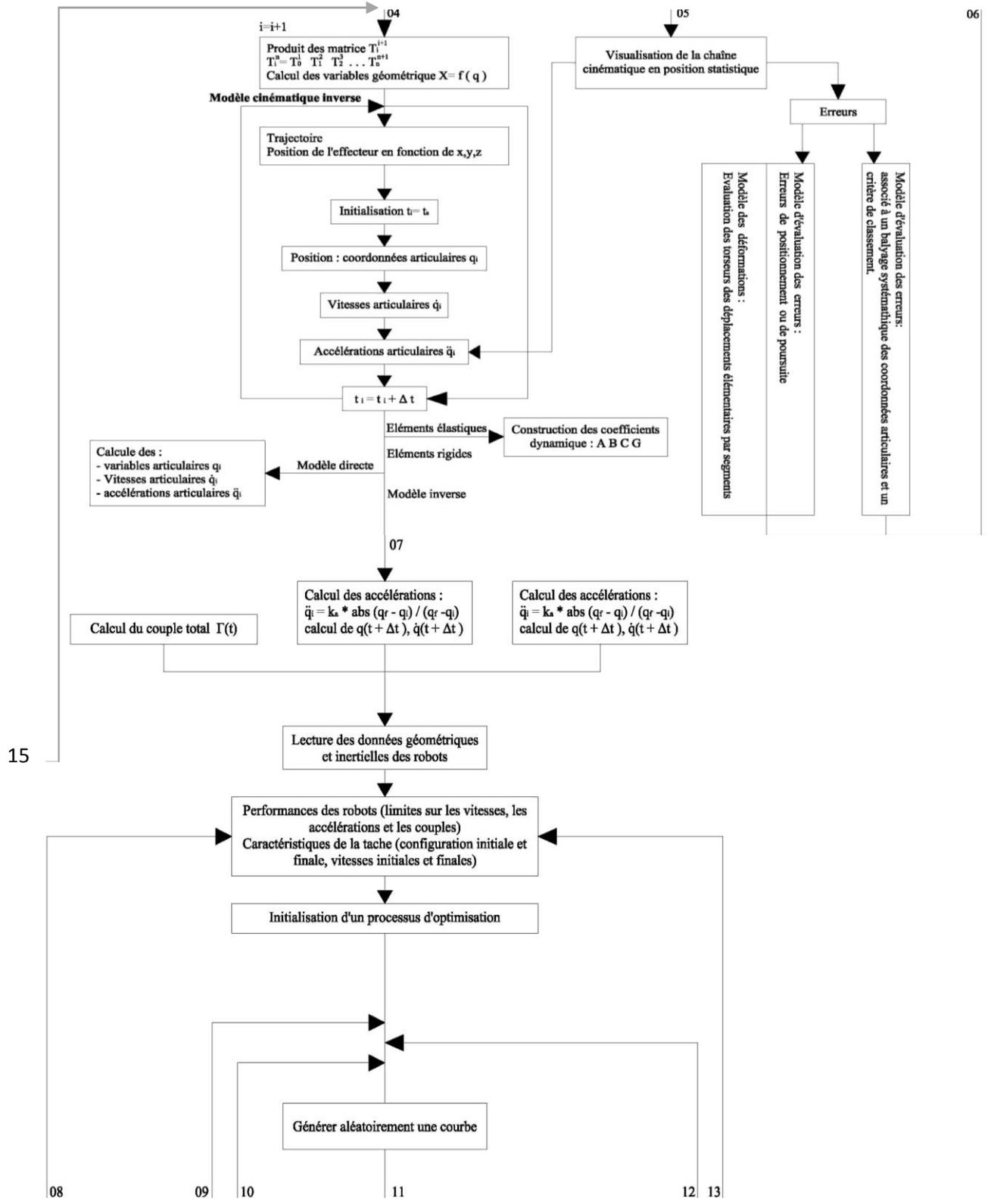
Le but des logiciels de conception est de donner une image quasi-réelle afin de trouver des solutions rapides pour un choix d'un mécanisme, par ailleurs on peut l'utiliser pour simuler les mouvements souhaités par le robot, avant qu'il soit opérationnel sur le site.

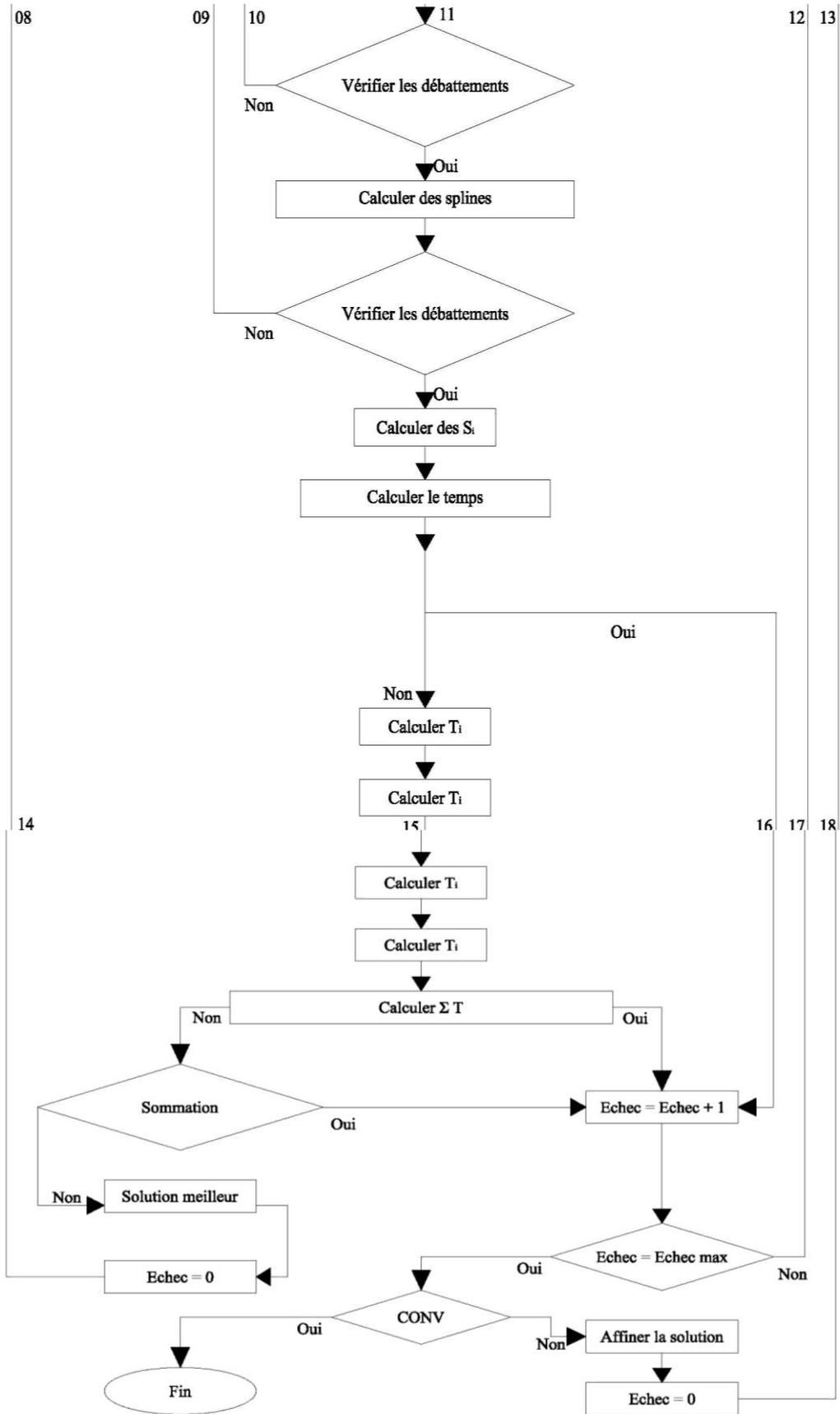
À l'aide de logiciel CATIA V5, on peut faire la conception des robots, tout en définissant leurs types de liaisons, ainsi que leurs degrés de liberté. On arrive aussi à faire la simulation des mécanismes pour étudier leurs mouvements et calculer les positions et les vitesses.

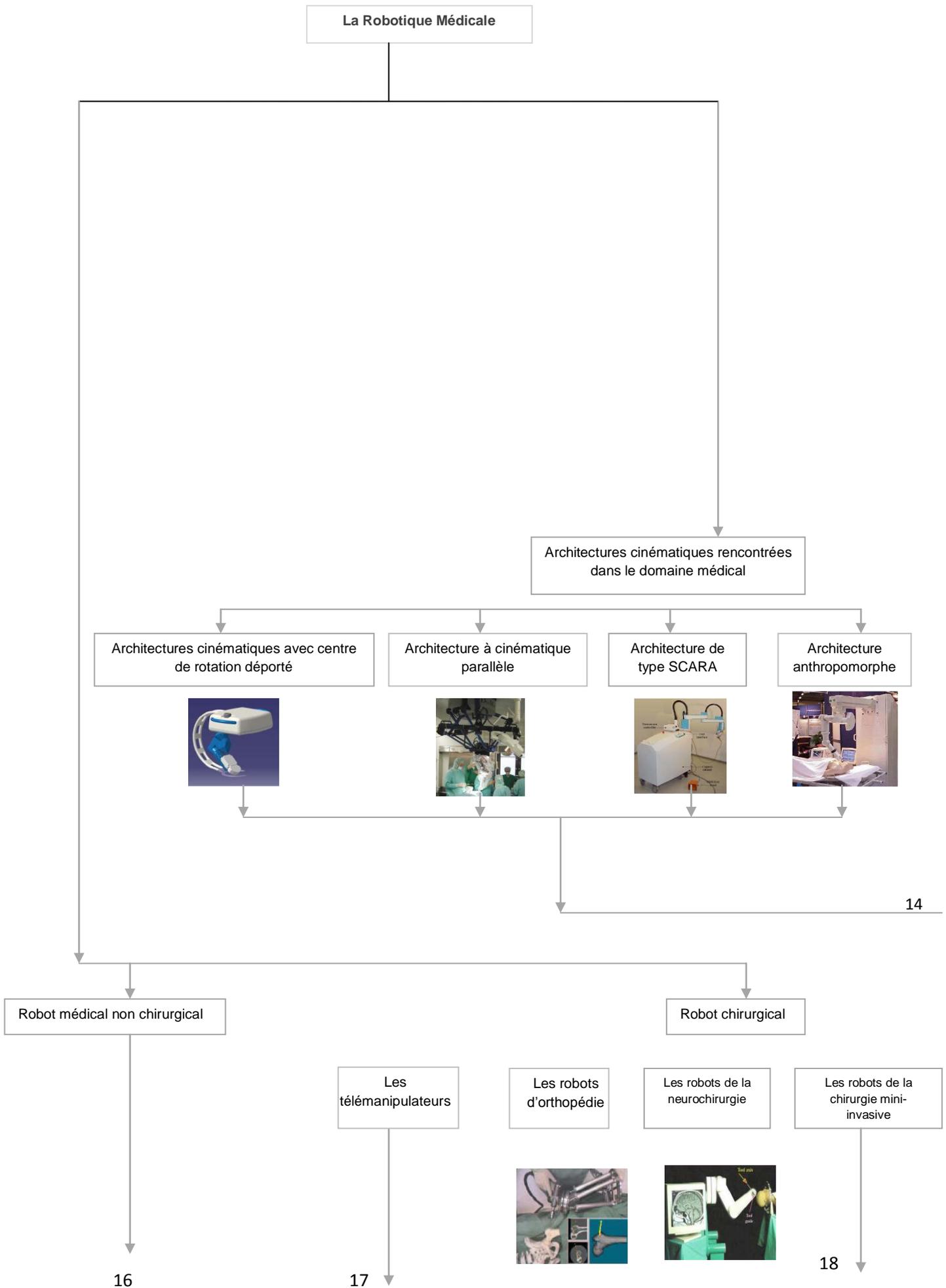
La vérification des résultats obtenus par deux logiciels CATIA V5 et MatlabR2009a nous a permis de valoriser qualitativement et mettre en relief la pertinence du modèle étudié.

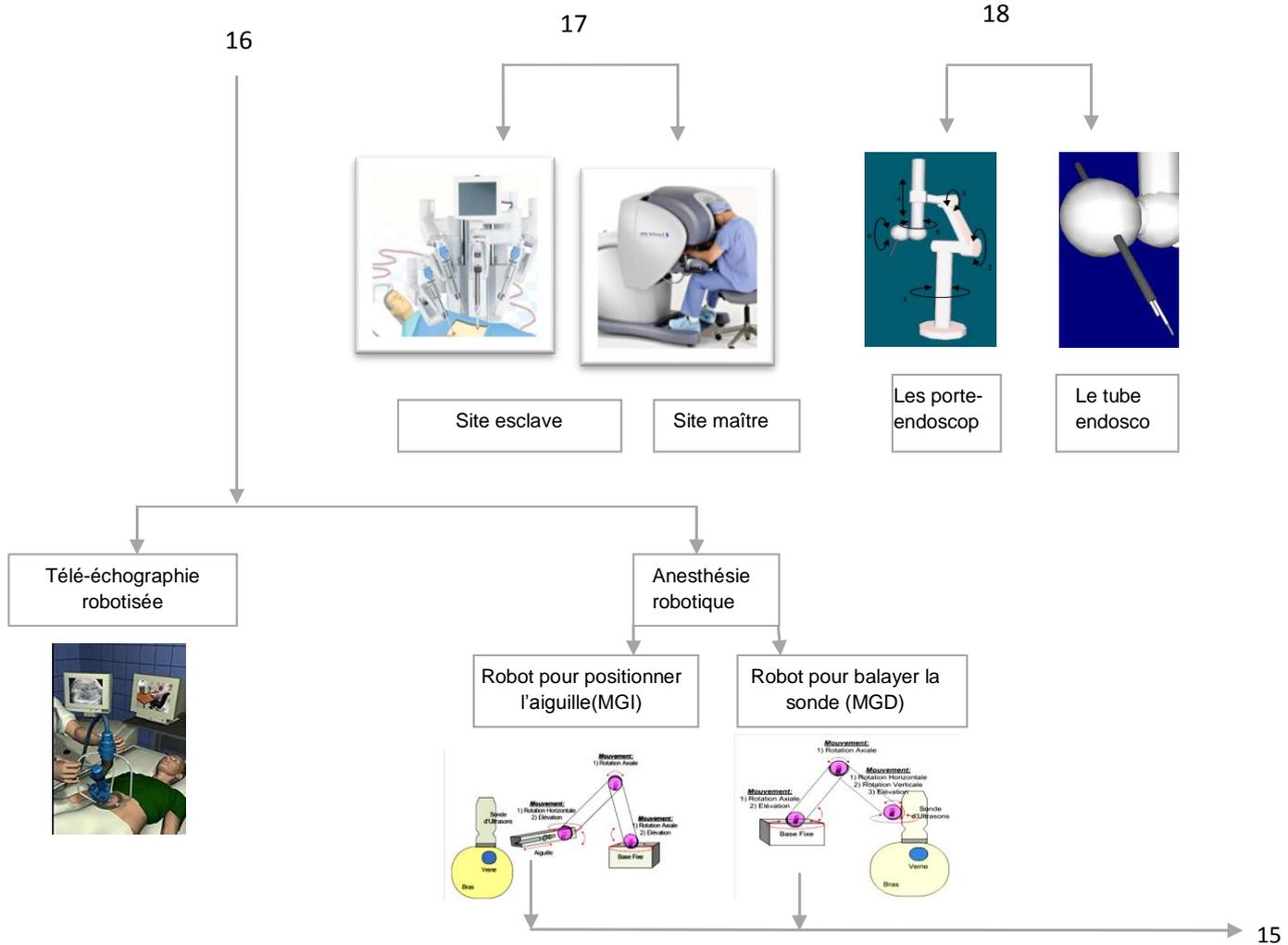
**BANQUE DES DONNEES PROPOSEES A L'ETUDE DES ROBOTS INDUSTRIELS.** [ C.N.P.R.U. :Code J0901/03/03/99. Code J0901/03/04/03. Code J 0901/03/51/05. Code J 030042008001. Etude constructive et remèdes des erreurs des robots manipulateurs. **Janv. 2012.**].











## CONCLUSION GENERALE

Afin d'aborder un sujet de recherche dans le domaine de la robotique, il est nécessaire de résumer toutes les notions de base nécessaires à la compréhension de ce domaine.

L'idée de l'utilisation de robots pour prolonger la main du chirurgien est vieille de près de 30 ans. En médecine, comme dans beaucoup d'autres applications, les avantages potentiels d'un robot sont : sa précision, sa capacité à reproduire la même tâche indéfiniment, la possibilité de récupérer des données ou des informations d'un capteur, la capacité à opérer dans des environnements hostiles, etc.

C'est pourquoi, naturellement les tâches nécessitant de la précision géométrique, comme dans le cas de la neurochirurgie stéréotaxique ou de l'orthopédie, ont été les premières pour lesquelles le concept industriel d'automatisation robotisée a été appliqué.

Après avoir défini la robotique médicale, tout en détaillant son historique, ses classifications, et les différents domaines où les robots ont pris leurs places, de plus ils sont devenus de plus en plus indispensables pour le chirurgien afin de l'aider pour effectuer des tâches fastidieuses, qui ont été quasiment impossibles à accomplir dans le passé.

On a commencé par adapter les bras manipulateurs industriels pour effectuer des tâches simples de point de vue manipulation, comme les tâches qui nécessitent une bonne précision quand il s'agit du positionnement. Ou bien pour effectuer des mouvements répétitifs, qui ne nécessitent pas la présence d'un spécialiste.

Jusqu'à ce qu'on a développé des robots qui peuvent réaliser des tâches de plus en plus complexes et dédiées au domaine médical, ainsi que la téléopération, qui permet aux chirurgiens d'effectuer des interventions à distance grâce à un système de transmission de mouvement.

Citant aussi la chirurgie mini-invasive, qui permet de réaliser des interventions chirurgicales sans avoir besoin d'effectuer des ouvertures, à l'aide des mécanismes d'insertion à plusieurs degrés de liberté à l'extérieur comme à l'intérieur du corps humain grâce à l'insertion des bras articulés gouvernés par les chirurgiens ou par des robots programmés ou télémanipulés.

Il est impossible de citer toutes les applications possibles. On a essayé d'en citer le maximum pour simplifier le domaine de la robotique médicale ou chirurgicale. Le but des applications citées dans notre travail de recherche est pour comprendre la contribution des robots dans la médecine.

Afin de simplifier le domaine qui paraît vague et compliqué. On a choisi une application, où l'on a utilisé le robot récemment pour remplacer certaines tâches d'un spécialiste anesthésiste qui doit, à chaque fois, faire balayer une sonde

ultrason afin de détecter la position de la veine où l'on effectue l'anesthésie. Il procède par la suite à une injection dans la position déterminée. Tout ce travail peut être remplacé par deux robots, un pour faire balayer la sonde ultrason et l'autre robot positionne l'aiguille précisément sur le point défini par la sonde attachée au premier robot.

Pour modéliser un système, c'est-à-dire gouverner ses sorties, il faut prévoir le comportement du système, sa 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.

Après avoir étudié les mouvements utilisés par un médecin ou un chirurgien, on opte pour un robot solution qui peut effectuer les mouvements planifiés après l'étude.

Notre but est d'adapter un robot industriel à une tâche médicale composée de deux actions : balayage d'une sonde, et positionnement d'une aiguille d'où l'étude de la cinématique directe et inverse.

On a commencé par une solution simple et facile en choisissant un robot à deux degrés de liberté pour faire le balayage de la sonde, on a supposé que ce mouvement se fait dans le plan. Cependant un robot R.R est incapable d'atteindre n'importe quel point dans l'espace. C'est la raison pour laquelle on a étudié par la suite un robot anthropomorphique de type R.R.R dont l'espace de travail est une sphère.

On a étudié aussi des exemples sur le cas d'un changement des longueurs des bras, le cas d'un obstacle, et aussi les deux configurations (Elbow up et Elbow down).

Le but 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, avant qu'il soit opérationnel sur le site.

Le résultat analytique peut être vérifié par des logiciels de la C.A.O. ainsi que CATIA V5. Une simulation a été élaborée afin de déterminer les paramètres cinématiques adéquats et d'arriver à élaborer une future banque des données des robots médicaux avec une géométrie et une cinématique optimales.

La vérification des résultats obtenus par deux logiciels CATIA V5 et Matlab nous a permis de valoriser qualitativement et mettre en relief la pertinence du modèle

étudié. Cette application nous a permis de constater qu'il existe une similitude entre la théorie et la pratique relative à la conception de ce logiciel.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] A.A Kobrinski « Bras manipulateurs des robots, Architecture et théorie » Editions Mir Moscou - 1979
- [2] Sylvie Charentus. « Modélisation et commande d'un robot manipulateur redondant composé de plusieurs plateformes de Stewart » Thèse de Doctorat. Au laboratoire d'Automatique et d'Analyse des systèmes du CNRS, 13Avril 1990.
- [3] ȘTEFAN STAIKU. « Modèle matriciel en dynamique du robot parallèle stewart-Gouch ». Université "Politehnica" de Bucharest /Rev. Roum. Sci. Techn. – Méc. Appl., Tome 54, No 3, P. 187–200, Bucarest, 2009.
- [4] Diane Borojéni, « Modélisation cinématique et dynamique des systèmes poly-articulés à chaîne ouverte ou fermées ». Cas des robots parallèles ; Thèse de Doctorat de l'université Paris XII VAL DE MARNE. Juillet 2006.
- [5] Robots manipulateurs industriels. Présentation des caractéristiques (identique à ISO 9946). NF EN 29409-1 11.92. (Technique d'ingénieur)
- [6] Guillaume thoman , « Etat de l'art \_l'endoscopie industrielle\_la robotique chérurgicale \_la coloscopie » Thèse en robotique chérurgical ,Institut national des sciences appliquées de Lyon 2003.
- [7] J.P. Merlet, « les robots parallèles », Paris, Hermes Science Publishing, 367 p. (ISBN 978-2866015992) , 21 février 1997.
- [8] ECCAMI.SPÉCIALITÉ TECHNOLOGIQUE : Robotique médicale, Université Joseph Fourie 2004.
- [9] Brennan, T.A., Leape, L.L., Laird, N.M., Incidence of adverse events and negligence in hospitalized patients, N Engl J Med;324:370–6,1991.
- [10] Kohn, L.T., Corrigan, J.M., Donaldson, M.S., To err is human: building a safer health system, Washington, DC: National Academy Press, 1999.
- [11] (J. Hubert/ La chirurgie robotique en urologie / Progrès en urologie 19, 244—247 / (2009) [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [12] ELIAN CARRILLO / Robots reconfigurables : « Étude de la convergence dans le problème du déplacement vers un but »École doctorale / Thèse Doctorat en sciences de l'informatique. Septembre 2010.
- [13] I.Artobolevski. « Théorie des mécanismes et des machines ». Technique Soviétique. Edition Mir Moscou,1977.
- [14] BENMISRA Abdelkader « PROGRAMMATION DES ROBOTS INDUSTRIELS ET APPLICATION SUR LE ROBOT ANIPULATEUR » Mémoire de Magister, Université de Blida, 2007.

- [15] SAYD MAMDOUH « Solution du problème géométrique direct des manipulateurs de Topologie star » Mémoire de Maitrise des sciences / Université de Montreal.2000.
- [16] Goudali A., Lallemand J-P., et Zegloul S. Espace de travail de la nouvelle structure 2-Delta. *Revue d'Automatique et de Productique Appliquée*, 8(2-):205-210, 1995.
- [17] AKLI Isma « mouvements pour un manipulateur mobile redondant » MEMOIRE de MAGISTER . Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene ,2007.
- [18] Wisama Khalil « Modélisation identification et commande des robots » 2ème édition revue et augmentée,1999.
- [19] Xavier BAGUENARD « Propagation de contraintes sur les intervalles Application à l'étalonnage des robots » .Thèse de doctorat /ECOLE DOCTORALE D'ANGERS, 2005.
- [20] Abdelhakim Cherfia « ANALYSE CINÉMATIQUE DES ROBOTS PARALLÈLES »THÈSE Doctorat, Université Mentouri Constantine, 2007.
- [20] T. Postiau « Génération et Parallélisation des Équations du Mouvement de systèmes Multicorps par l'Approche Symbolique ». Thèse de doctorat Louvain-la-Neuve. Septembre 2004.
- [21] T. Postiau « Génération et Parallélisation des Équations du Mouvement de systèmes Multicorps par l'Approche Symbolique ». Thèse de doctorat Louvain-la-Neuve. Septembre 2004.
- [22] Lorenzo 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).
- [23] André PREUMONT « Théorie Générale des Systèmes Articulés », Introduction à la Robotique /Laboratoire des Structures Actives Service des Constructions Mécaniques et Robotique/ 2nde Edition – 2001.
- [24] B.Gorla, M.Renauld «Modèles des robots manipulateurs : application à leurs Commandes », Editions Cepadues, 1984.
- [25] Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique.. Aspects mécaniques en robotique par Michel FAYOLLE ... B 7 190 – 1. B 7 190. 5 – 1988.
- [26] Joseph F Engelberger « Robot industriel, Gestion et pratique »Hermès publishing(France)1981.
- [27] Yoram Koren « La robotique pour les ingénieurs » Laboratoire de Robotique, Université Technion, Institut Israélien de Technologie , Haifi . Éditeur : McGraw-Hill, 1986.

- [28] Boumediène Bouanane « Etude, Réalisation et commande d'un actionneur électrohydraulique de puissance » Thèse de doctorat, université Paul Sabatier de Toulouse , juillet 1991 .
- [29] Laurence Nouaille, Natalie Smith-Guérin, Gérard Poisson « Vers une méthodologie de conception de robots médico-chirurgicaux ».Laboratoire Vision et Robotique, 2007.
- [30] Philippe Poignet, Gérard Poisson « La conception de robots pour l'assistance aux gestes médicaux et chirurgicaux » Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier 2004.
- [31] Saïd Mohamed Megahed « Contribution à la modélisation géométrique et dynamique des robots manipulateurs a structure de chaîne cinématique simple ou complexe » Thèse de doctorat d'état présenté à L'Université Paul SABATIER de Toulouse , 1984.
- [32] T. Yoshikawa. « Foundation of robotics: Analysis and control». The MIT Press, 1990.
- [33] Laurence NOUAILLE, « Démarche de conception de robots médicaux Application à un robot de télé-échographie », Thèse Doctorat, ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET TECHNOLOGIES LABORATOIRE INSTITUT PRISME 2009.
- [34] Anthony R.Lanfranco, BAS, Andres E.Castellanos, MD, Jaydev P. Desai, PhD et William C.Meyers, MD « Chirurgie Robotique Une perspective actuelle »Du ministère de génie mécanique, Université Drexel à Philadelphie 2004
- [35] Jacques GANGLOF « Mémoire Asservissements visuels et chirurgie robotisée » Mémoire pour l'obtention de l'Habilitation à diriger des recherches (Spécialité Robotique) Université Louis Pasteur de Strasbourg Ecole doctorale Sciences Pour l'Ingénieur. décembre 2000.
- [36] Nabil ZEMIT, « Commande en Effort des Systèmes Robotiques pour la Chirurgie Mini-Invasive » THESE de DOCTORAT, UNIVERSITE PARIS, 2005.
- [37] Guillaume Morel & Jacques Gangloff. « Commande référencée capteurs en robotique médicale et chirurgicale ». In 5e Journées Nationales de la Recherche en Robotique, pages 131–142, France, octobre 2005.
- [38] Michel de Mathelin, « Gestes Médico-Chirurgicaux Assistés par Ordinateur (GMCAO) », Master ISTI – spécialité PARI – parcours IRMC, Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg.année 2006.
- [39] Benjamin Maurin, « Conception et réalisation d'un robot d'insertion d'aiguille pour les procédures percutanées sous imageur scanner »Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg. 2005.
- [40] Bernard BAYLE, « Contributions à la Commande et à la Conception des Systèmes de Manipulation » Applications en Robotique Médicale /Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université de Strasbourg Spécialité : Robotique. 2009.

- [41] Pierre JANNIN « De la neurochirurgie guidée par l'image, au processus neurochirurgical assisté par la connaissance et l'information » Faculté de Médecine Université de Rennes 1,2005.
- [42] NAILI Mokhtar « MODÉLISATION GÉOMÉTRIQUE D'UNE PROTHÈSE TOTALE DE HANCHE » mémoire de Magister. Université de Batna, Faculté des sciences de l'ingénieur, 2009.
- [43] Stéphane LITRICO « ASSISTANCE ROBOTIQUE A LA CHIRURGIE HYPOPHYSAIRE » DEA SIC Image Vision/Septembre 2001.
- [44] FLORENT NAGEOTTE, « Contribution à la structure assisté par Ordinateur en chirurgie Mini-invasive »Thèse de Doctorat . Université Louis Pasteur Strasbourg, 2005.
- [45] Damien SALLÉ, Philippe BIDAUD « Conception optimale de systèmes robotiques redondants pour la chirurgie mini-invasive » Laboratoire de Robotique de Paris (LRP) ; 17ème Congrès Français de Mécanique,2004.
- [46] R.Ginhoux, «Compensation des mouvements physiologiques en chirurgie robotisée par commande prédictive »Thèse de Doctorat, université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 2003.
- [47] M.Michelin, «Contribution à la commande de robots pour la chirurgie mini-invasive », Thèse de doctorat, LIRMM, Université Montpellier II, Montpellier, France, 2004.
- [48] S.Otman, «Télétravail Robotisé et Réalité Augmentée : Application à la Téléopération via Internet » Thèse de Doctorat, Laboratoire des Systèmes Complexes du CEMIF (Centre d'Etude de Mécanique d'Ile de France), Université d'Evry-Val-d'Essonne, France, 2000.
- [49] Germain Aoun « ANESTHÉSIE ROBOTIQUE : INSERTION AUTOMATIQUE D'UN CATHÉTER VEINEUX GUIDÉE PAR ULTRASON » Mémoire de maîtrise en science appliquées (GÉNIE BIOMÉDICAL) Université de MONTRÉAL. 2010.
- [50] Andy Kar Wah YEN « ASSERVISSEMENT EN POSITION D'UN MANIPULATEUR ROBOTIQUE POUR L'ÉCHOGRAPHIE 3D DES ARTÈRES DES MEMBRES INFÉRIEURS » Mémoire de Maîtrise en génie de la production automatisée/ École de technologie supérieure université du Québec. MONTRÉAL, Avril 2011.
- [51] Lama AL BASSIT « STRUCTURES MECANIKES A MODULES SPHERIQUES OPTIMISEES POUR UN ROBOT MEDICAL DE TELE-ECHOGRAPHIE MOBILE » Thèse de doctorat Université d'orleans / UNIVERSITE D'ORLEANS, 2005.
- [52] Cirac, T., A project report on medical robotics, Istanbul Technical University, 2006.
- [53] Jean-Louis Boimond « Cour de Robotique» ISTIA, Université Angers , 2009.

- [54] Nacer Hamadi « Modélisation d'un véhicule en présence des forces de contact Roues/Sol » Mémoire de magister en Electronique . Université El-Hadj Lakhdar- Batna. 2009 .
- [55] OMAR 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.
- [56] Philippe Coiffet « La robotique principe et application » Editeur: Hermes Sciences Publication - Date de parution: 21 Janvier 1992.
- [57] B. Gorla et M. Renaud, « Modèle des robots manipulateurs, application à leur commande ». Cepadues Editions, Toulouse, 1984 .
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] AZOUI NAWAL ; « Commande non linéaire d'un bras manipulateur » Thèse magister. Université de Batna, Faculté des sciences de l'ingénieur, Département d'électronique, 2009.
- [62] J. Angeles, "Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods, and Algorithms," Second Edition, Springer-Verlag, USA, 2002.
- [63] Lama AL BASSIT « STRUCTURES MÉCANIQUES A MODULES SPHÉRIQUES OPTIMISÉES POUR UN ROBOT MÉDICAL DE TÉLÉ-ÉCHOGRAPHIE MOBILE » Thèse Doctorat, UNIVERSITÉ D'ORLÉANS, Soutenue le 12 Juillet 2005.
- [64] W. KHALIL, E.DOMBRE ; « Modélisation identification et commande des robots »,Hermès Sciences Publications, Paris, 1999.
- [65] [DOMBRE 1999] Wissama .KHALIL & Etienne. DOMBRE, « Modélisation identification et commande des robots, édition hermès sciences.1999
- [66] Rachid BEKHTI « Génération de trajectoire pour le pick-and-place en robotique parallèle » MASTER1 ELECTRONIQUE ELECTROTECHNIQUE AUTOMATIQUE UNIVERSITÉ MONTPELLIER II/ Le 02 Avril 2010

[67] M.H. Overmars, “*Recent developments in motion planning*”, P.Sloot, C. Kenneth Tan, J.Dongarra, A. Hoekstra (Eds.): Computational Science - ICCS 2002, Part III, Springer-Verlag, LNCS 2331, 2002, pp. 3–13.

[68]. 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.

[69]. C.BARTHLEY. D WILLIS « Conception mécanique cinématique et dynamique des robots »Revue Française de Mécanique N° 1995-4, Paris, Automne 1989.

[70] J.C. Latombe, “*Robot motion planning*”, Kluwer Academic Publishers, Boston, MA,1991.

[71] Saad, Maarouf. 2006. *SYS-824 Modélisation et commande robotique, notes de cours, Ecole de Technologie Supérieure, Département de génie électrique, automne 2006.*

[72]. J.-C. Latombe, *Robot Motion Planning*, 1991.

[73]. S. M. LaValle, *Planning Algorithms*, 2006.

[74]. khaled belghith « une nouvelle approche flexible de planification de trajectoire de robot dans un environnement complexe » mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en informatique option génie logiciel UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL /février 2005

[75] Anis SAHBANI « Planification de tâches de manipulation en robotique par des approches probabilistes » Mémoire de Doctorat. Université Paul Sabatier de Toulouse Février 2003

[76] P. Svestka« On probabilistic Completeness and Expected Complexity of probabilistic path planning . Rapport technique. Departement of computer science. Utrecht University. 1996.

---