

Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de la Recherche Scientifique

Université de Ghardaïa

Faculté des Sciences Et de la Technologie

Département d'automatique et d'électromécanique

Mémoire du Projet de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme de

Master

En « Electromécanique » option :

« Maintenance Industrielle »



Titre de recherche :

**Les difficultés de control dans les robots
chirurgicaux médicaux**

Soutenance publiquement le 01/10/2020

Réaliser Par : TFYECHE Smail

Membre de jury : Grade

ZERZOUR Ali P.R.R Président Université de Ghardaïa

AKERMI Faouzi M.A.A Examineur Université de Ghardaïa

FENNICHE Abd Errazak P.R.C Encadreur Université de Ghardaïa

N° d'ordre :

N° de série :

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements

Je remercie le grand Dieu de m'avoir donné la force et le courage pour réaliser ce modeste travail.

Je voudrais adresser tout d'abord, mes remerciements à mon encadreur Mr. Abd Errazak Fenniche pour m'avoir encadré, et encouragé tout au long de la réalisation du mémoire.

J'exprime mes gratitudes à Monsieur le président de jury d'avoir accepté et examiné ce mémoire.

Je remercie Messieurs les membres de jury, d'avoir accepté de prendre part à ce jury ainsi que pour l'intérêt qu'ils l'ont porté à ce travail.

Mes sincères sentiments vont à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire, en particulier mes parents.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À ma très chère mère Chacha qui représente pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

À mon père pour l'amour du travail inculqué, ses encouragements et son soutien permanent.

À mon frère Mohammed et ma sœur Aicha, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.

À toute mes familles Ifyeche et Daoud.

À toute mes amis.

À tous les étudiants de maintenance 2020

À tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer ...

Sommaire

<i>Remerciements</i>	II
<i>Dédicace</i>	III
Liste des figures	IX
Liste des abréviations.....	XII
L'avant-propos	XIV
Résumé.....	XV
ملخص.....	XVI
Introduction général	1
Chapitre 1 Les Robots.....	3
1.1 Introduction	4
1.2 Notions de base	4
1.2.1 Origine de terme	4
1.2.2 Définition de la robotique	5
1.2.3 Définition d'un robot	5
1.3 Historique.....	6
1.4 Composition d'un robot	7
1.5 Types des robots.....	8
1.5.1 Les robots fixes (manipulateurs).....	8
1.5.1.1 La classification des robots manipulateurs	8
1.5.1.2 L'architecteur d'un robot manipulateur	9
1.5.2 Les robots mobiles	10
1.5.2.1 Classification.....	11
1.5.2.2 Les moyens de perception en robotique mobile.....	11
1.5.2.3 Architectures des robots mobiles	12
1.5.2.3.1 La structure mécanique et la motricité.....	12
1.5.2.3.2 Les organes de sécurité.....	14
1.5.2.3.3 Les systèmes de traitement des informations et gestion des tâches :	15
1.5.2.3.4 Le système de localisation	16
1.6 Caractéristiques d'un robot.....	17
1.7 Domaines d'applications	17

1.7.1	Domaine industriel.....	17
1.7.2	Domaine agriculture	18
1.7.3	Domaine militaire	18
1.7.4	Domaine de service.....	19
1.7.5	Domaine d'exploration	20
1.7.6	Domain anthropomorphique	20
1.8	L'influence de robot dans la vie quotidienne	21
1.9	Conclusion.....	21
Chapitre 2 Les robots médicales		22
2.1	Introduction	23
2.2	Historique	23
2.3	Définition de robot médical	24
2.4	Spécificités de la robotique médicale.....	24
2.4.1	La sécurité.....	25
2.4.2	La stérilité	26
2.4.3	La salle d'opération	27
2.5	Avantages potentiels du robot dans une procédure médicale	28
2.6	Les domaines d'application principales de la robotique médicale	30
2.7	La classification des robots médicaux.....	30
2.8	Comparaison Homme / Machine	31
2.9	Intérêt de la collaboration Homme / Machine.....	32
2.10	Analyse statistique des structures cinématiques des robots médicaux.....	32
2.10.1	Domaine médical	32
2.10.2	Structure mécanique global	33
2.10.3	Les degrés de liberté	34
2.10.4	La configuration cinématique	35
2.11	Exemple d'utilisation de robot dans le domaine médical	35
2.11.1	La télé échographie :	35
2.11.1.1	Définition.....	35
2.11.1.2	La Télé-Echographie robotisée.....	36
2.11.1.3	Les robots de la télé échographie	36
2.11.2	La ponction	39

2.11.2.1	Définition.....	39
2.11.2.2	La ponction robotisée	39
2.11.2.3	Les robots de ponction.....	40
2.12	Conclusion.....	42
Chapitre 3	Les robots Chirurgicales	43
3.1	Introduction	44
3.2	Historique.....	44
3.3	Définition	44
3.4	Les objectifs de chirurgie robotique.....	44
3.5	Les principes généraux d’opération robotisé	44
3.6	Les avantages de chirurgie robotique.....	46
3.7	Les inconvénients de la chirurgie robotique	47
3.8	Les domaines d’application principales des robots en chirurgie	47
3.8.1	La neurochirurgie :.....	47
3.8.1.1	Définition	47
3.8.1.2	Les robots de la neurochirurgie.....	48
3.8.2	L’orthopédie.....	50
3.8.2.1	Définition	50
3.8.2.2	Les robots de la chirurgie orthopédique.....	50
3.8.3	L’urologie	52
3.8.3.1	Définition	52
3.8.3.2	Les robots de la chirurgie urologique.....	53
3.8.4	La chirurgie dentaire	54
3.8.4.1	Définition	54
3.8.4.2	Les robots de la chirurgie dentaire	55
3.8.5	La chirurgie des yeux.....	56
3.8.5.1	Définition	56
3.8.5.2	Les robots de chirurgie des yeux.....	56
3.9	Les démarches de conception d’un robot chirurgical	57
3.10	Les étapes de formation en chirurgie robotique.....	58
3.10.1	Formation aux habiletés de base.....	59
3.10.2	Formation avancée	60

3.10.3	Formation aux compétences non techniques	60
3.11	L'évaluation des compétences	61
3.12	Conclusion.....	61
Chapitre 4	les difficultés de control dans le robot Da Vinci.....	62
4.1	Introduction	63
4.2	Historique sur le robot Da Vinci	63
4.3	Définitions.....	64
4.3.1	La chirurgie mini-invasive.....	64
4.3.2	Le robot Da Vinci	65
4.4	La famille de robot Da Vinci	65
4.4.1	Le robot Da Vinci de base	65
4.4.2	Le robot Da Vinci S	65
4.4.3	Le robot Da Vinci Si.....	66
4.4.4	Le robot Da Vinci Xi	67
4.4.5	Le robot Da Vinci X	68
4.4.6	Le robot Da Vinci Sp.....	69
4.5	Les composants de robot Da Vinci	70
4.5.1	Console de chirurgien	70
4.5.2	Chariot de patient.....	71
4.5.3	Chariot de vision.....	72
4.6	Les domaines d'usages du robot Da Vinci.....	73
4.7	Le fonctionnement de robot Da Vinci.....	74
4.7.1	Fonctionnement des instruments EndoWrist	75
4.7.2	La connexion entre les composants	76
4.7.2.1	Les connexions d'alimentation	76
4.7.2.2	Les connexions de système	76
4.8	Analyse médico-économique	78
4.9	La compatibilité cinématique.....	78
4.9.1	Etude du brase maitre	82
4.9.1.1	Paramétrage et hypothèses	83
4.9.1.2	Justification de la structure.....	84
4.10	Les erreurs de robot leur cause et leur effet	86

4.10.1 Erreurs de contrôle et Les erreurs de coordination cinétique	88
4.11 La simulation.....	88
4.11.1 Définition.....	88
4.11.2 Les avantages du simulateur chirurgie robotique	88
4.11.3 La simulation par robot Da Vinci	89
4.11.3.1 La méthode	89
4.11.3.2 Les objectifs.....	89
4.11.3.3 Les scénarii	90
4.11.3.4 Les résultats	90
4.11.3.5 Discussion.....	91
4.12 La maintenance	91
4.13 Le futur de robot Da Vinci	92
4.14 Conclusion.....	93
Conclusion général	94
Bibliographie	XVII
Annexe A	XX
Annexe B	XXI
Annexe C	XXII

Liste des figures

- Figure 1.1** Historique de certains robots
- Figure 1.2** Robots manipulateurs
- Figure 1.3** Schématisation des parties principales du robot manipulateur
- Figure 1.4** Architecture d'un robot mobile
- Figure 1.5** Robots mobile à roues
- Figure 1.6** Robots mobiles à chenilles
- Figure 1.7** Robots mobiles marcheurs
- Figure 1.8** Robots utilisent autres moyens de locomotion
- Figure 1.9** Organigramme de la sécurité de robot
- Figure 1.10** Navigation de robot mobile en environnement
- Figure 1.11** Robot manipulateur dans un environnement pharmaceutique sensible
- Figure 1.12** Robots agricole
- Figure 1.13** Robot militaire
- Figure 1.14** Robots humanoïde
- Figure 1.15** Robots d'explorations
- Figure 1.16** Robots anthropomorphiques
- Figure 2.1** Robot chirurgical Da Vinci et son emballage stérilise
- Figure 2.2** Robot porte-endoscope stérilisable en autoclave
- Figure 2.3** Répartition par domaine médical sur une population de 70 robots
- Figure 2.4.** Robot Hippocrate (série), Robot Surgi scope (parallèle), Robot Ter (hybride)
- Figure 2.5** Répartition des structures globales des robots sur 33 robots étudiées
- Figure 2.6.** Répartition du nombre de degrés de liberté sur 29 robots étudiés.
- Figure 2.7** Répartition des configurations cinématiques des 21 robots séries étudiés.
- Figure 2.8** Le robot Teresa
- Figure 2.9** Le robot Otelo 2
- Figure 2.10** Le robot RUDS
- Figure 2.11** Le robot de Masuda
- Figure 2.12** Poignet porte sonde de Najafi
- Figure 2.13** Le robot Medirob
- Figure 2.14** Le robot Paky et son schéma
- Figure 2.15** Le robot LPR
- Figure 2.16** Le robot CT-Bot et son schéma

Figure 3.1 Utilisation de l'IRM pour créer une image de patient

Figure 3.2 Modélisation des organes de patient pour extraire des informations

Figure 3.3 Simulation de la chirurgie

Figure 3.4 NeuroArm spécialisé en Neurochirurgie

Figure 3.5 Le robot Neuromate

Figure 3.6 Le robot PathFinder

Figure 3.7 Le robot Surgiscope

Figure 3.8 Le robot Roboscope

Figure 3.9 Le robot Robodoc

Figure 3.10 Le robot Caspar

Figure 3.11 Le robot Acrobat

Figure 3.12 Le robot Crigos

Figure 3.13 Le robot PUMA 560

Figure 3.14 Le robot LER

Figure 3.15 Le robot Yomi

Figure 3.16 Le robot R2D2

Figure 3.17 Processus de conception d'un robot

Figure 4.1 Le robot Da Vinci S

Figure 4.2 Le robot Da Vinci Si

Figure 4.3 Le robot Da Vinci Xi

Figure 4.4 Le robot Da Vinci X

Figure 4.5 Le robot Da Vinci Sp

Figure 4.6 La console de chirurgien

Figure 4.7 Le chariot de patient

Figure 4.8 Le chariot de vision

Figure 4.9 Les pinces EndoWrist

Figure 4.10 l'Endoscopes 3D

Figure 4.11 Plan d'implantation des câbles système et des câbles d'alimentation.

Figure 4.12 La méthode correcte de brancher les câbles.

Figure 4.13 Robot Da Vinci lors de la phase de vie (en opération)

Figure 4.14 Interactions induites par le système

Figure 4.15 Modèle multi-physique du robot chirurgical

Figure 4.16 Schéma cinématique simplifié du bras maître et du bras esclave

Figure 4.17 Schéma bloc fonctionnel d'asservissement simplifié du déplacement du point terminal du bras esclave sur le point d'accroche de la main du chirurgien

Figure 4.18 Schéma cinématique partiel modélisant le bras maitre et photographie du bras maitre

Tableau 4.19 Caractéristiques et situation géométriques des parties de bras esclave

Figure 4.20 la simulation par mannequin

Liste des abréviations

R.U.R	Rossum's Universal Robots
A.F.N.O.R	Association Française de Normalisation
S.M.A	Système Mécanique Articulé
OT	Organe Terminale
UBC	Université de la Colombie-Britannique
VGH	Hôpital Général de Vancouver
ISS	International Service Solution
CE	Conformité Européenne
FDA	Food and Drug Administration
SCARA	Selective Compliance Arm for Robot Arm
GPS	Global Positioning System
IRM	Imagerie par Résonance Magnétique
RCM	Remote Center of Motion
LPR	Light Puncture Robot
TIMC	Techniques de l'Ingénierie Médicale et de la Complexité
CT-scanner	Computed Tomography scanner
TER	Télé Échographie Robotique
LER	Light Endoscope Robot
CT-Bot	Computed Tomography roBot
J.C	Jésus Christ
ISS	Integrated Surgical Systems
URS	Universal Robot Systems

SPS	Sphérique Prismatique Sphérique
IBM	International Business Machines
PRK	Photo Refractive Keratectomy
SRI	Scientific Research Institute
CEO	Chief Executive Officer
DDL	Degré De Liberté
CADTH	Canadian Agency for Drugs and Technologies in Health
URC-éco	Unité de la Recherche Clinique en économie de la santé
AP-HP	L'Assistance Publique - Hôpitaux de Paris

L'avant-propos

Il est clair que les interventions chirurgicales utilisant de nouvelles techniques et systèmes éprouvés sont souvent bien accueillies par les patients et les chirurgiens, et cela pour de meilleurs résultats que la chirurgie traditionnelle. Nous nous sommes concentrés dans ce travail sur la coordination des mouvements entre les parties du robot qui est contrôlé par le chirurgien dans le processus pour éviter des erreurs pouvant être fatales pour les patients.

Le robot Da Vinci comme un exemple des robots majeur dans la chirurgie robotique n'est pas infallible et il peut provoquer des erreurs pour cela la simulation des robots en utilisant les mêmes conditions opératoires formelles peut être une solution appropriée pour former intensivement les utilisateurs de l'appareil et s'y habituer tout ça pour éviter les erreurs , et aussi face à de nouvelles situations de simulation auxquelles les chirurgiens peuvent être confrontés lors d'opérations formelles.

Résumé

L'utilisation de robots dans la vie quotidienne des personnes est très importante et est considérée comme un facteur clé pour faciliter la vie dans tous les domaines. L'utilisation de robots dans un domaine important comme la médecine contribuera certainement à améliorer les services aux patients et aux médecins. La chirurgie robotique est un domaine très important sur lequel les pays développés dans le domaine de la médecine comptent beaucoup dans certains domaines tels que la chirurgie orthopédique la neurochirurgie et la chirurgie de prostate, qui l'a fait évoluer depuis les années 90 du siècle dernier, des robots et des systèmes d'assistance pour le chirurgien et confortables pour le patient.

La chirurgie robotique est basée sur des facteurs tels que la précision, la stérilisation et la sécurité qui doivent être pris en compte avant, pendant et après l'opération. Le robot Da Vinci spécialisé en chirurgie mini-invasive a révolutionné le domaine chirurgie robotisée avec ses avantages et son architecture approprier dans tous ses modèles. Malgré ca il a confronté des difficultés dans son control.

Alors. Les chercheurs et les développeurs doivent donc respecter les facteurs de chirurgie robotisée lors du développement ou de la création d'un nouveau robot en parallèle avec l'amélioration et le développement de méthodes de formation des utilisateurs de dispositifs pour assurer le bon fonctionnement et la fiabilité des opérations, ceci est principalement dû à une utilisation intensive des systèmes de simulation.

La simulation est une solution appropriée dans de nombreux cas en évitant le chirurgien et le patient des scénarios dangereux, notamment dans un domaine sensible comme la chirurgie, car elle forme les utilisateurs de l'appareil à maîtriser le contrôle pour éviter les erreurs pouvant être la cause du décès des patients.

ملخص

يعد استخدام الروبوتات في الحياة اليومية للناس أمراً مهماً للغاية ويُنظر إليه على أنه عامل رئيسي في جعل الحياة أسهل في جميع المجالات. إن استخدام الروبوتات في مجال مهم مثل الطب سيساعد بالتأكيد في تحسين الخدمات للمرضى والأطباء. تعد الجراحة الروبوتية مجالاً مهماً للغاية تعتمد عليه الدول المتقدمة في مجال الطب كثيراً في بعض المجالات مثل جراحة العظام وجراحة الأعصاب وجراحة البروستاتا ، مما جعلها تطور منذ التسعينيات من القرن الماضي روبوتات وأنظمة مساعدة للجراح ومريحة للمريض.

تعتمد الجراحة الروبوتية على عوامل مثل الدقة والتعقيم والسلامة التي يجب مراعاتها قبل و أثناء وبعد العملية. أحدثت روبوت دافنشي المتخصص في الجراحة طفيفة التوغل ثورة في مجال الجراحة الروبوتية بمزاياها وبنيتها المناسبة في جميع نماذجها على الرغم من ذلك توجد صعوبات في التحكم به.

لذلك يجب على الباحثين والمطورين احترام عوامل الجراحة الروبوتية عند تطوير أو إنشاء روبوت جديد بالتوازي مع تحسين وتطوير طرق تدريب مستخدمي الأجهزة لضمان التشغيل السليم وموثوقية العمليات ، ويرجع ذلك أساساً إلى الاستخدام المكثف لأنظمة المحاكاة.

المحاكاة من الحلول المناسبة في عدة مجالات لأنه تتجنب الجراح و المريض سيناريوهات خطيرة، خاصة في مجال حساس مثل الجراحة، بسبب أنها تدرّب مستخدمي الجهاز على إتقان التحكم لتجنب الأخطاء التي قد تكون سبباً في وفاة المرضى.

Introduction général

Le domaine médico-chirurgical est l'un des domaines développés au fil du temps en raison du développement de la technologie, en particulier au XXe siècle. Les chercheurs en médecine souhaitent développer des systèmes chirurgicaux dans le but d'obtenir de meilleurs résultats pour les patients. Avec le développement du robot dans plusieurs domaines, dont le plus important est industriel. Les ingénieurs dans le domaine de la robotique et les chercheurs dans les domaines médical et chirurgical pensaient qu'un partenariat entre les deux domaines améliorerait les services chirurgicaux et donnerait au robot une grande impulsion pour l'insérer positivement dans la vie quotidienne des gens.

Un partenariat entre deux domaines, l'un d'eux est sensible car il affecte directement la vie des gens, et un autre nouveau qui n'a pas rencontré beaucoup d'expériences et une approbation complète sera forcément difficile et rencontrera des nombreux obstacles et problèmes jusqu'à ce qu'il prouve son existence dans les deux domaines.

La preuve d'existence sera avec de bons résultats et une bonne utilisation de la technologie avec un impact positif sur la santé des patients et ne les exposant pas à des risques. Pour cela, les développeurs ont cherché à développer des systèmes et à mettre en œuvre de nouvelles idées au cours des quatre dernières décennies afin d'atteindre un système sans faille et un assistant aux chirurgiens pour des meilleures performances et tous les avantages pour le patient.

Nous consacrerons le premier chapitre à la présentation des robots en général, à leur histoire, à leurs types, à leur structure, à leurs principales caractéristiques et aux nombreux domaines dans lesquels les gens ont utilisé des robots en raison de ses multiples caractéristiques et de l'impact des robots sur le cours de la vie des gens.

Le deuxième chapitre portera sur le domaine médical robotique, son histoire, les premiers robots médicaux utilisés, les caractéristiques des robots médicaux, les avantages de leur utilisation et les bénéfices du partenariat homme / robot, et nous chercherons à analyser la structure cinématique du robot et donnerons également des exemples de deux domaines médicaux dans lesquels le robot a été utilisé.

Nous approfondirons le troisième chapitre et parlerons de l'un des domaines de la médecine, qui est la chirurgie robotique, son histoire et ses principes, ses caractéristiques, ses avantages

et ses inconvénients, les domaines chirurgicaux les plus importants utilisés pour les robots et les étapes de construction d'un robot chirurgical, et enfin un point important sur l'importance de former les utilisateurs de robots chirurgicaux.

Le quatrième et dernier chapitre portera sur le domaine de la chirurgie mini-invasive et la compatibilité cinématique, nous utiliserons le robot Da Vinci comme exemple dans lequel nous parlerons de son histoire et de son importance en tant que percée dans le domaine de la robotique chirurgicale, de ses types, de sa composition et de sa principe de fonctionnement en plus des erreurs de contrôle et l'une de ses solutions est la simulation et ses points positifs et nous le scellons avec la maintenance de ce robot et ses perspectives d'avenir.

Chapitre 1

Les Robots

1.1 Introduction

Aujourd'hui, des robots vivent parmi nous. Les récents progrès technologiques ont fait sortir la robotique du roman de science-fiction à nos salons. Bien que cela puisse sembler effrayant pour certains, les robots sont là pour nous aider. Les inventeurs et les hommes d'affaires créent des solutions innovantes aux problèmes depuis des générations. De l'ampoule à l'email, nous avons résolu nos problèmes quelque les soient. Comme nos vies et nos problèmes augmentent en complexité, nos solutions évoluent également. L'introduction de la robotique dans la vie quotidienne marque une période passionnante de l'histoire humaine. Nous avons atteint des objectifs que nous n'aurions jamais imaginés possibles.

Les robots d'aujourd'hui résolvent les problèmes quotidiens et servent d'aide aux humains. Ces robots ne sont pas la substance sensible des films d'horreur de science-fiction, mais plutôt des machines simples conçues pour effectuer un ensemble de fonctions. Ces fonctions peuvent être simples - comme me réveiller le matin ou complexes - me verser le cocktail parfait. Ce qui est étonnant avec les robots et les gens qui les fabriquent, c'est qu'ils ont été conçus pour maîtriser une ou deux tâches. Les robots sont bien équipés pour effectuer des compétences répétitives, telles que ramasser un tuyau et le placer dans une autre machine. De cette façon, les robots sont devenus des outils précieux sur les lignes de production. Les robots ne sont pas destinés à remplacer les travailleurs, mais servent de dispositifs d'assistance. Les sociétés de production passent à la mise en place de robots pour protéger la sécurité et le confort de leurs travailleurs en les épargnant de tâches répétitives. Avant la robotique, les entreprises ont implémenté d'autres machines pour compléter ces processus. Les robots en production effectuent les tâches faciles afin que les travailleurs humains puissent concentrer leur temps et leur énergie sur des tâches plus complexes [1].

1.2 Notions de base

Dans cette partie nous allons définir quelques notions concernons notre sujet, on peut citer les suivants :

1.2.1 Origine de terme

Robot a été utilisé pour la première fois en 1921 par Karel Capek dans sa pièce R.U.R. Il provient du terme tchèque "Robota" qui signifie corvée, travail obligatoire. Le terme robotique a été employé pour la première fois par Asimov en 1941 [2].

1.2.2 Définition de la robotique

La robotique peut être définie comme l'ensemble des techniques et études tendant à concevoir des systèmes mécaniques, informatiques ou mixtes, capables de se substituer à l'homme dans ses fonctions motrices, sensorielles et intellectuelles [3].

1.2.3 Définition d'un robot

Selon l'institut américain du robot, un robot est un opérateur reprogrammable et multifonctionnel, conçu pour mouvoir des pièces, des outils ou appareils spécialisés, suivant la séquence de mouvement variable et programmés en vue de l'exécution d'une variété de tâches [4].

L'Association Française de Normalisation (A.F.N.O.R.) définit un robot comme étant un système mécanique de type manipulateur commandé en position, reprogrammable, polyvalent, à plusieurs degrés de liberté, capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils et des dispositifs spécialisés, pour l'exécution d'une variété de tâches. Il a souvent l'apparence d'un, ou plusieurs bras se terminant par un poignet. Son unité de commande utilise, notamment, un dispositif de mémoire et éventuellement de perception et d'adaptation à l'environnement et aux circonstances. Ces machines polyvalentes sont généralement étudiées pour effectuer la même fonction de façon cyclique et peuvent être adaptées à d'autres fonctions sans modification permanente du matériel.

Dans cette définition, on retrouve les différentes composantes d'une cellule robotisée :

- **Le mécanisme** : ayant une structure plus ou moins proche de celle du bras humain, il permet de remplacer ou de prolonger son action. Sa motorisation est réalisée par des actionneurs électriques, pneumatiques ou hydrauliques qui transmettent leurs mouvements aux articulations par des systèmes appropriés.
- **La perception** : qui permet de gérer les relations entre le robot et son environnement. Les organes de perception sont des capteurs dits proprioceptifs lorsqu'ils mesurent l'état interne du robot (positions et vitesses des articulations) et extéroceptifs lorsqu'ils recueillent des informations sur l'environnement (détection de présence, mesure de distance, vision artificielle).
- **La commande**: qui synthétise les consignes des asservissements pilotant les actionneurs. A partir de la fonction de perception et des ordres de l'utilisateur, elle permet d'engendrer les actions de robot.
- **L'interface homme-machine** : à travers laquelle l'utilisateur programme les tâches que le robot doit exécuter.

- **Le poste de travail et les dispositifs** : qui constituent l'environnement dans lequel évolue le robot [3].

1.3 Historique

Le philosophe grec Aristote a fait cette célèbre citation:

«Si chaque outil, quand il était commandé, ou même de son propre accord, pouvait faire le travail qui lui convenait ... alors il n'y aurait plus besoin d'apprentis pour les maîtres ouvriers ni d'esclaves pour les seigneurs» [5].

Au cours de l'histoire on peut distinguer 3 types de robots correspondant en quelques sortes à l'évolution de cette "espèce" créée par l'Homme.

Le premier type de machine que l'on peut appeler robot correspond aux "Automates". Ceux-ci sont généralement programmés à l'avance et permettent d'effectuer des actions répétitives.

Le second type de robot correspond à ceux qui sont équipés de capteurs (en fait les sens du robot). On trouve des capteurs de température, photoélectrique, à ultrasons pour par exemple éviter les obstacles et/ou suivre une trajectoire. Ces capteurs vont permettre au robot une relative adaptation à son environnement afin de prendre en compte des paramètres aléatoires qui n'aurait pu être envisagés lors de leur programmation initiale. Ces robots sont donc bien plus autonomes que les automates mais nécessitent un investissement en temps de conception et en argent plus conséquent.

Enfin le dernier type de robot existant correspond à ceux disposant d'une intelligence dite "artificielle" et reposant sur des modèles mathématiques complexes tels que les réseaux de neurones. En plus de capteurs physiques comme leurs prédécesseurs, ces robots peuvent prendre des décisions beaucoup plus complexes et s'appuient également sur un apprentissage de leurs erreurs comme peut le faire l'être humain. Bien sûr il faudra attendre encore longtemps avant que le plus "intelligent" des robots ne soit égal, tant par sa faculté d'adaptation que par sa prise de décisions, à l'Homme [6].

Dans cette chronologie, nous présentons un certain nombre d'événements historiques du passé, ainsi que des développements récents qui ont contribué à façonner le monde des robots.

1941 : Le légendaire écrivain de science-fiction Isaac Asimov écrit la nouvelle «Liar!» Dans laquelle il décrit les Trois lois de la robotique :

1. Un robot ne peut pas blesser un être humain.
2. Un robot doit obéir aux ordres donnés par des êtres humains, sauf si de tels ordres sont contraires à la Première Loi.

3. Un robot doit protéger sa propre existence tant que cette protection n'entre pas en conflit avec la première ou la deuxième loi.

1954 : George Devol et Joe Engleberger conçoivent le premier «bras» de robot programmable. Ce dernier est devenu plus tard le premier robot industriel chez General Motors (1962).

1994 : Le robot marcheur à huit jambes des universités Carnegie, Dante II, descend avec succès dans Mt Spur pour collecter des échantillons de gaz volcanique.

1999 : Sony lance la première version d'AIBO, un chien robotique capable d'apprendre, de divertir et de communiquer avec son propriétaire.

2004 : Epsom lance le plus petit robot connu, mesurant 7 cm de haut et pesant 10 grammes. L'hélicoptère robot est conçu pour être utilisé comme une «caméra volante» lors de catastrophes naturelles.

2008 : Après avoir été introduit pour la première fois en 2002, le populaire aspirateur robotique ROOMBA a été vendu à plus de 2,5 millions d'unités, ce qui prouve qu'il existe une forte demande pour ce type de technologie robotique domestique [5].



a) le premier «bras» de robot de George Devol & Joe Engleberger 1954



b) Sony AIBO 2004



c) ROOMBA 2008

Figure 1.1 Historique de certains robots

1.4 Composition d'un robot

Généralement un robot est composé de quatre parties principales. En voici la description:

Une structure mécanique qui sera le squelette du robot. Une attention particulière doit être portée aux articulations car celles-ci doivent permettre un débattement assez important relatif à l'utilisation voulue.

Le second élément correspond aux **actionneurs** (servomoteurs) qui vont permettre au robot d'effectuer réellement ses actions. Ces servomoteurs seront commandés par la partie commande en interaction avec les informations transmises par les capteurs. Le terme "Servo"

induit en effet un asservissement effectué en fonction d'une comparaison avec le résultat souhaité et la réalité extérieure.

La troisième partie composante d'un robot correspond aux différents **capteurs** sensoriels équipant le robot pour une application particulière.

Enfin le cerveau **la partie commande**. C'est cette partie qui va permettre au robot d'analyser les données provenant des capteurs et d'envoyer les ordres relatifs aux servomoteurs. La partie commande est matérialisée physiquement par le microcontrôleur [6].

1.5 Types des robots

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

1.5.1 Les robots fixes (manipulateurs)

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

1.5.1.1 La classification des robots manipulateurs

On peut classer les robots fixes selon 2 groupes principaux :

Les robots sériels : La plupart des robots industriels construits à ce jour est de type sériel, c'est-à-dire que leur structure mobile est une seule chaîne ouverte formée d'une succession de segments reliés entre eux par des liaisons à un degré de liberté. Chaque articulation est commandée par un actionneur situé à l'endroit de l'articulation ou sur un des segments précédents, la figure a).1.2 montre ce type de robots.

Les robots parallèles : caractérisés par le fait que plus d'une chaîne cinématique assure la liaison entre la base fixe et l'organe terminal mobile, on parle également de cinématique bouclée, ce type de robots est illustré par la figure b).1.2.

Certains robots peuvent être une combinaison de cinématiques sérielles et parallèles; on parle dans ce cas de robots hybrides (voir figure c).1.2). Vu les caractéristiques de ces cinématiques, nous classerons pour simplifier les robots hybrides avec les robots parallèles [8].



Figure 1.2 Robots manipulateurs

1.5.1.2 L'architecteur d'un robot manipulateur

Sous le terme organe terminal, on regroupe tout dispositif destiné à manipuler des objets (dispositifs de serrage, dispositifs magnétiques, à dépression, ...), ou à les transformer (outils, torche de soudage, pistolet de peinture, ...). En d'autres termes, il s'agit d'une interface permettant au robot d'interagir avec son environnement. Un organe terminal peut être multifonctionnel, au sens où il peut être équipé de plusieurs dispositifs ayant des fonctionnalités différentes. Il peut aussi être monofonctionnel, mais interchangeable. Un robot, enfin, peut-être multi-bras, chacun des bras portant un organe terminal différent. On utilisera indifféremment le terme organe terminal, préhenseur, outil ou effecteur pour nommer le dispositif d'interaction fixé à l'extrémité mobile de la structure mécanique.

✓ **Le (S.M.A.)** est un mécanisme ayant une structure plus ou moins proche de celle du bras humain. Il permet de remplacer, ou de prolonger, son action (le terme "manipulateur" exclut implicitement les robots mobiles autonomes)³. Son rôle est d'amener l'organe terminal dans une situation (position et orientation) donnée, selon des caractéristiques de vitesse et d'accélération données. Son architecture est une chaîne cinématique de corps, généralement rigides (ou supposés comme tels), assemblés par des liaisons appelées articulations. Sa motorisation est réalisée par des actionneurs électriques, pneumatiques ou hydrauliques qui transmettent leurs mouvements aux articulations par des systèmes appropriés.

✓ **Les actionneurs:** utilisent fréquemment des moteurs électriques à aimant permanent, à courant continu, à commande par l'induit (la tension n'est continue qu'en moyenne car en général l'alimentation est un hacheur de tension à fréquence élevée ; bien souvent la vitesse de régime élevée du moteur fait qu'il est suivi d'un réducteur, ce qui permet d'amplifier le couple moteur). On trouve de plus en plus de moteurs à commutation électronique (sans balais), ou, pour de petits robots, des moteurs pas à pas. Pour les robots devant manipuler de très lourdes

charges (par exemple, une pelle mécanique), les actionneurs sont le plus souvent hydrauliques, agissant en translation (vérin hydraulique) ou en rotation (moteur hydraulique). Les actionneurs pneumatiques sont d'un usage général pour les manipulateurs à cycles (robots tout ou rien). Un manipulateur à cycles est un S.M.A. avec un nombre limité de degrés de liberté permettant une succession de mouvements contrôlés uniquement par des capteurs de fin de course réglables manuellement à la course désirée (asservissement en position difficile dû à la compressibilité de l'air).

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

✓ **La partie commande** : synthétise les consignes des asservissements pilotant les actionneurs, à partir de la fonction de perception et des ordres de l'utilisateur [3].

Le schéma ci-dessous présente les parties principales du robot manipulateur voir figure 1.3

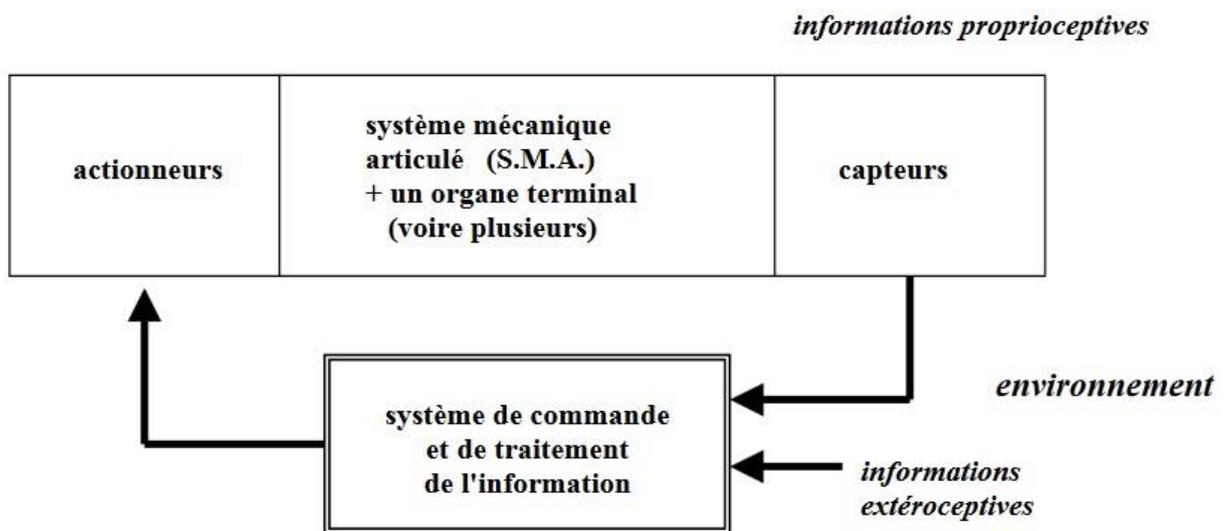


Figure 1.3 Schématisation des parties principales du robot manipulateur

1.5.2 Les robots mobiles

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

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

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

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

Les principaux problèmes particuliers liés à la conception de tels robots sont :

1. La conception mécanique liée à la mobilité
2. La détermination de la position et de l'orientation
3. La détermination du chemin optimal.

1.5.2.1 Classification

La classification des robots mobiles se fait suivant plusieurs critères (degré d'autonomie, système de locomotion, énergie utilisée, etc.). La classification la plus intéressante, et la plus utilisée est selon leur degré d'autonomie, on peut citer quelques type :

- Véhicule télécommandé par un opérateur qui lui impose chaque tâche élémentaire à réaliser.
- Véhicule télécommandé au sens de la tâche à réaliser. Le véhicule contrôle automatiquement ses actions.
- Véhicule semi-autonome réalisant sans l'aide de l'opérateur des tâches prédéfinies.
- Véhicule autonome qui réalise des tâches semi- définies [11].

1.5.2.2 Les moyens de perception en robotique mobile

La perception est un domaine crucial de la robotique. C'est autour de ce concept qui est bâtie la structure d'un robot apte à exécuter des tâches complexes ou à évoluer dans un univers inconnu ou mal connu. L'élément de base du système de perception est le capteur qui a pour objet de traduire en une information exploitable des données représentant des caractéristiques de l'environnement. Les moyens utilisés pour la perception de l'environnement sont nombreux. Nous citons :

- Les systèmes de vision globale.
- Les télémètres laser et ultrasonores.
- Les capteurs optiques et infrarouges.
- Les capteurs tactiles.

1.5.2.3 Architectures des robots mobiles

L'architecture des robots mobiles se structure en quatre éléments :

- ✓ La structure mécanique et la motricité.
- ✓ Les organes de sécurité.
- ✓ Le système de traitement des informations et gestion des tâches.
- ✓ Le système de localisation [10].

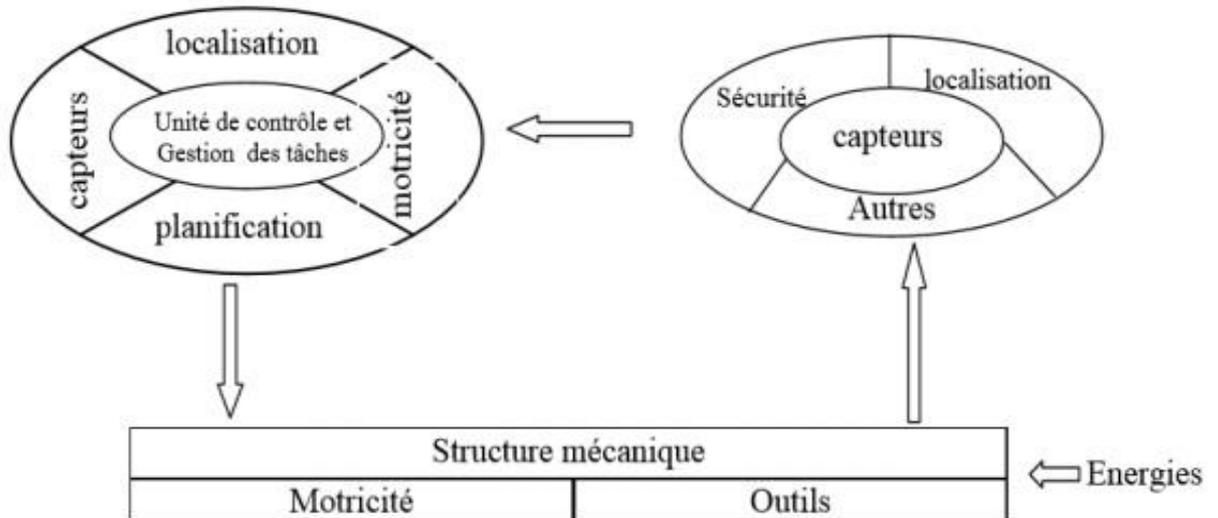


Figure 1.4 Architecture d'un robot mobile

1.5.2.3.1 La structure mécanique et la motricité

On a plus de trois types des structures mécaniques assurant la motricité.

• Les robots mobiles à roues

La mobilité par roues est la structure mécanique la plus communément appliquée.

Cette technique assure selon l'agencement et les dimensions des roues un déplacement dans toutes les directions avec une accélération et une vitesse importante. Le franchissement d'obstacles ou l'escalade de marches d'escalier est possible dans une certaine mesure.



Figure 1.5 Robots mobile à roues

• Les robots mobiles à chenilles

Lorsque le terrain est accidenté, les roues perdent leur efficacité de locomotion. Ceci limite la capacité d'évolution du robot mobile équipé de ce type de système de locomotion. Dans ces conditions, les chenilles sont plus intéressantes, car elles présentent l'avantage d'une bonne adhérence au sol et d'une faculté de franchissement d'obstacles plus importants. L'utilisation est orientée vers l'emploi sur sol accidenté ou de mauvaise qualité au niveau de l'adhérence (présence de boue, herbe...).



Figure 1.6 Robots mobiles à chenilles

• Les robots mobiles marcheurs

Les robots mobiles marcheurs sont destinés à réaliser des tâches variées dont l'accès au site est difficile, dangereux ou impossible à l'homme. Leur anatomie à nombreux degrés de liberté permet un rapprochement avec les robots manipulateurs. La locomotion est commandée en termes de coordonnées articulaires. Les méthodes de commande des articulations définissent le concept d'allure qui assure le déplacement stable de l'ensemble. Les différentes techniques étudiées se rapprochent de la marche des animaux et notamment de celle des êtres humains [11].



Figure 1.7 Robots mobiles marcheurs

• Autres moyens de locomotion

Il est d'usage de mettre dans ce groupe tous les robots mobiles qui utilisent un moyen de locomotion différent des trois précédents. Par exemple, les robots mobiles qui se déplacent par reptation, les robots sous-marins, les robots volants également appelés « drones » etc. Les applications de ce type de robots sont très spécialisées et les architectures des robots sont en général spécifiques à l'application visée [12].

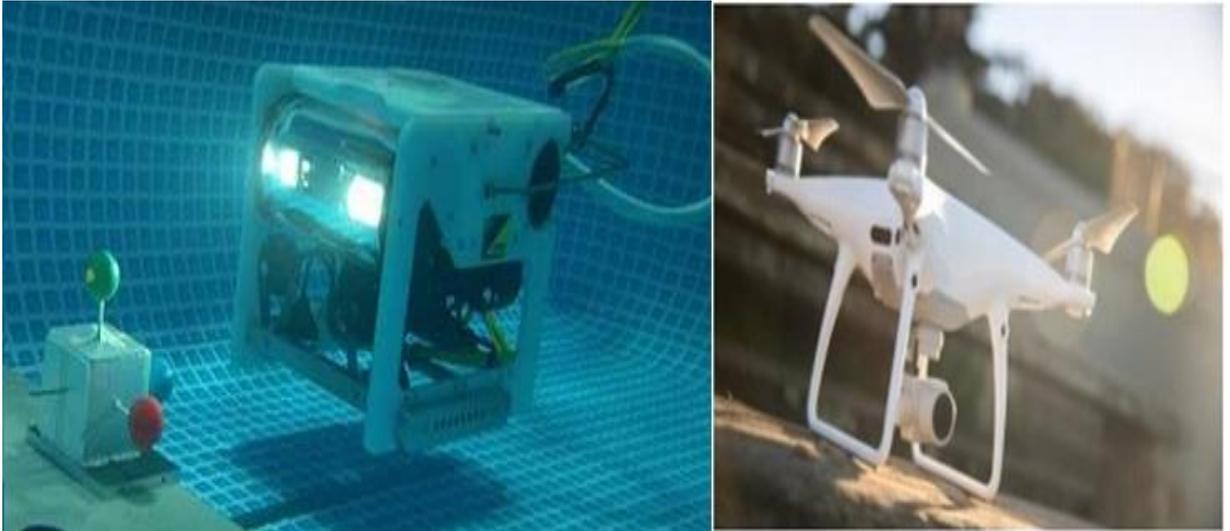


Figure 1.8 Robots utilisent autres moyens de locomotion

La motricité et l'énergie

Les déplacements des robots mobiles sont réalisés par des moteurs de types électrique, thermique ou hydraulique. L'énergie électrique la plus fréquemment employée offre l'avantage d'une commande aisée, par contre le transport et la génération présentent des difficultés. Plusieurs méthodes sont employées :

- Par batteries qui sont soit rechargées périodiquement de manière automatique ou manuelle.
- Par groupe électrogène embarqué dont l'inconvénient constitue la masse élevée.
- Par cordon ombilical qui réduit l'autonomie du robot.

1.5.2.3.2 Les organes de sécurité

Un robot, selon la tâche qui lui est confiée, peut être amené à travailler au voisinage du personnel. A ce titre, il est obligatoire qu'il soit doté d'organe garantissant la sécurité de ce dernier. Deux types de capteurs sont disponible tout autour de mobile a fin de détecté un obstacle dans un domaine le plus étendu possible :

Les capteurs proximétriques : assurant la détection avant collision (ultra-son, hyper fréquence, infrarouge...).

Les capteurs de contact : détectant une collision ou un choc avec l'environnement (contact électrique sur pare-chocs, résistance variable...). Ce sont des dispositifs redondants par rapport aux capteurs précédents.

L'organisation de la sécurité est représentée sur le schéma de la figure 1.9 :

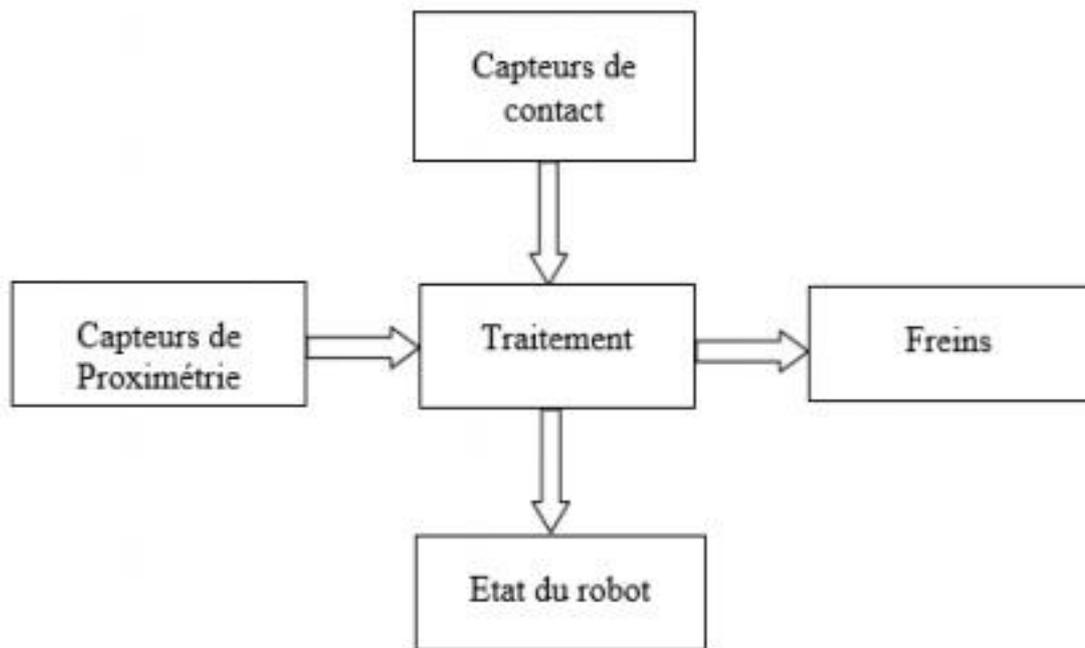


Figure 1.9 Organigramme de la sécurité de robot

1.5.2.3.3 Les systèmes de traitement des informations et gestion des tâches :

L'ensemble de traitement des informations établissent les commandes permettant au mobile de réaliser un déplacement et d'activer les divers organes en accord avec l'objectif.

Le problème de génération de plan consiste à établir la manière dont le robot se déplace par rapport à des connaissances statique ou dynamique. La génération repose sur trois concepts :

- **La stratégie de navigation** : La navigation est une étape très importante en robotique mobile, elle permet de donner une large autonomie. Le système de navigation comporte plusieurs modules parmi ces modules on distingue celui de la localisation et celui de l'évitement d'obstacles. On utilise en général un capteur à ultrasons qui permet de renseigner sur la présence d'un obstacle sur le chemin d'évolution (figure 1.10).

- **La modélisation de l'espace** : La connaissance du milieu dans lequel évolue le robot mobile n'est établie en général qu'après avoir effectué une campagne de mesure de l'ensemble des éléments constituant l'environnement. Cette procédure fastidieuse peut être évitée si le robot construit lui-même son modèle d'environnement de manière dynamique.

- **La planification** : la planification de trajectoire n'est pas utilisable tant que le robot ne dispose pas d'un modèle de l'espace d'évolution ce qui handicape très fortement l'utilisation du

robot. Différentes approches sont envisageables selon que le robot évolue en milieu connu ou inconnu :

- L'évolution en territoire cartographié simplifie évidemment la tâche des concepteurs, une fois la carte de la zone d'évolution rentrée dans la mémoire d'un ordinateur communiquant avec le robot ou bien dans une mémoire intégrée au robot lui-même, des algorithmes de routage permettent de diriger le robot.

- Il en va tout autrement dans le cas de l'évolution en territoire inconnu, Le robot doit alors analyser son environnement au moyen de différents capteurs, détecter sa position par rapport à son but, et décider de sa trajectoire [10].

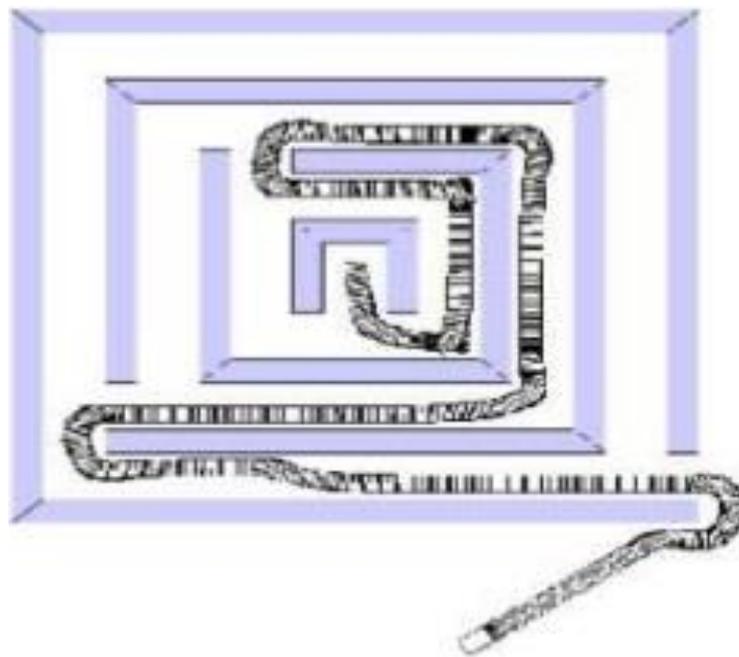


Figure 1.10 Navigation de robot mobile en environnement

1.5.2.3.4 Le système de localisation

La localisation instantanée est un des points les plus importants et les plus délicats des robots mobiles. Les techniques employées sont de deux types :

- **La localisation relative** : La localisation relative ou localisation à l'estime consiste à évaluer la position, l'orientation, et éventuellement la vitesse du robot mobile par intégration des informations fournies par des capteurs dits proprioceptifs. L'intégration se fait par rapport au point de départ du robot. Ces données peuvent être des informations de déplacement (odomètre), de vitesse (vélocimétrie) ou d'accélération (accéléromètre).
- **La localisation absolue** : La localisation absolue est une technique qui permet à un robot de se repérer directement dans son milieu d'évolution, que ce soit en environnement extérieur (mer, terre, espace), ou en environnement intérieur (ateliers, immeubles, centrales

nucléaires....). Cette méthode de localisation est basée sur l'utilisation de capteurs extéroceptifs. Elle assure la mesure de la position et de l'orientation du mobile à tout instant [13].

1.6 Caractéristiques d'un robot

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

- La charge maximale transportable (de quelques kilos à quelques tonnes).
- L'architecture du système mécanique articulé, le choix est guidé par la tâche à réaliser.
- Le volume de travail, définit comme l'ensemble des points atteignables par OT.
- Le type du robot et la mission à effectuer.
- La vitesse de déplacement.
- La masse du robot.
- Le coût du robot [11].

1.7 Domaines d'applications

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

1.7.1 Domaine industriel

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

- ✓ Les manipulations de produits à haute cadence.
- ✓ Les opérations de packaging avec des manipulations de produits et d'emballage.
- ✓ L'assemblage de produits (secteurs automobile, pharmaceutique, cosmétique...etc.). Voir la figure ci-dessous (figure 1.11).



Figure 1.11 Robot manipulateur dans un environnement pharmaceutique sensible

1.7.2 Domaine agriculture

Après des décennies d'expérimentation, les robots ont enfin fait leur entrée à la ferme. Cette machine totalement autonome fonctionne grâce à l'énergie solaire et circule dans les rangées de plantations pour surveiller et analyser les plantes (voir figure 1.12). Ce robot a déjà passé avec succès de nombreux tests réalisés dans des champs de légumes mais se contente de surveiller la « bonne santé » et plantations. Grâce à ces nombreux capteurs, senseurs et caméras, il détecte rapidement d'éventuelles anomalies (présence de mauvaises herbes, animaux nuisibles, croissance trop faible) et avertit l'exploitant agricole qui peut ainsi prendre immédiatement les mesures appropriées.



Figure 1.12 Robots agricole

1.7.3 Domaine militaire

Les robots sont de plus en plus utilisés dans le domaine militaire. En effet, la miniaturisation permet aujourd'hui de créer des robots discrets mais dotés de nombreux capteurs, ce qui est idéal pour des missions d'espionnage ou d'éclairage. De plus, certains robots sont équipés

d'un armement pour évoluer en milieu hostile, dans le but de remplacer les soldats pour limiter les pertes humaines comme le montre la figure 1.13.



Figure 1.13 Robot militaire

1.7.4 Domaine de service

La révolution de la robotique a conduit ces dernières années à voir de nombreux robots s'installer chez les particuliers pour effectuer des tâches à la place de leur possesseur, la figure 1.13 illustre le robot de service ASIMO. En effet, ceux-ci sont capables de faire le ménage, tondre la pelouse, nettoyer la piscine etc. La robotique autre fois réservée à des applications précises ou coûteuses, est aujourd'hui de plus en plus utilisée à titre ludique. En effet, les robots compagnons par exemple sont des objets de plus en plus convoités, les applications de jouet pour enfant, jusqu'à l'humanoïde destiné à remplacer une présence humaine [11].



Figure 1.14 Robots humanoïde

1.7.5 Domaine d'exploration

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

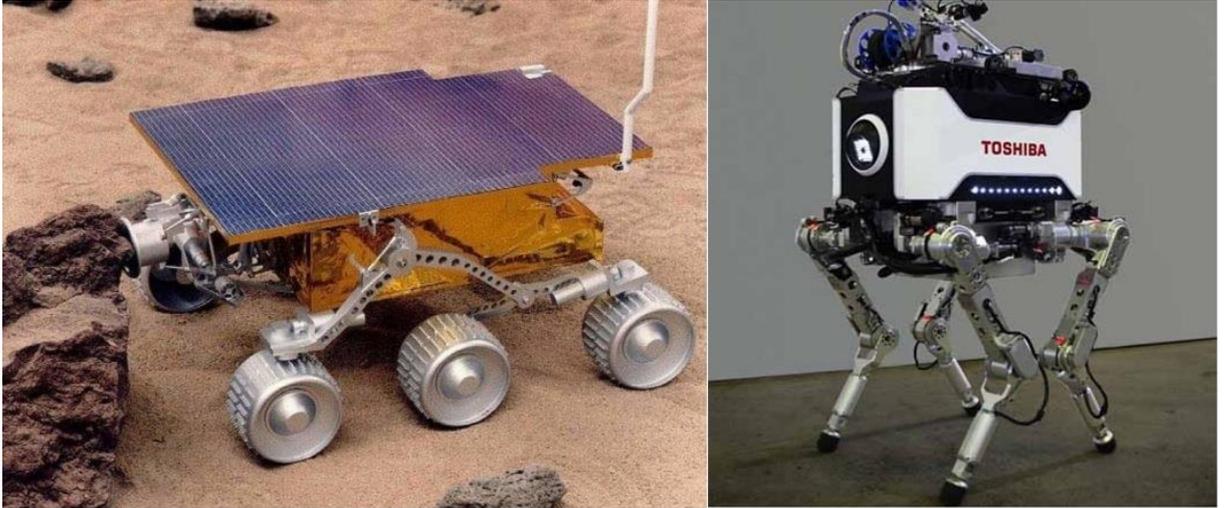


Figure 1.15 Robots d'explorations

1.7.6 Domain anthropomorphique

Les robots anthropomorphiques ont l'apparence humaine, ils sont dotés de la bipédie et sont capables de faire des choses que seul l'humain pouvait faire jusqu'à aujourd'hui. La plus récente version de robot anthropomorphique peut courir à 6 Km/h et peut aussi remplir la tâche de réceptionniste ou de guide d'information. C'est un robot de recherche et il devrait, rendu à terme, être capable de venir en aide aux personnes handicapées, âgées ou malades [14].

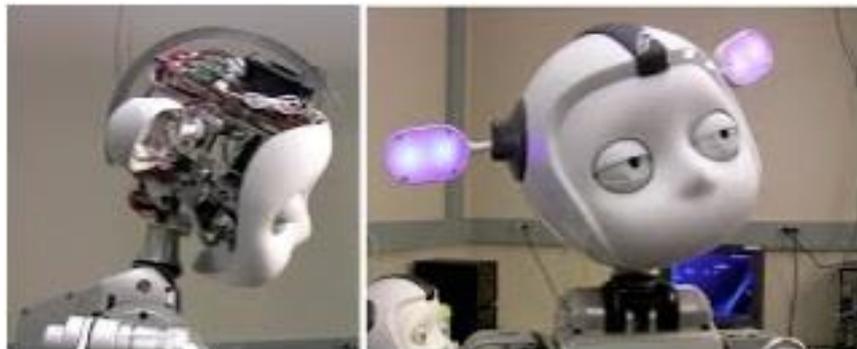


Figure 1.16 Robots anthropomorphiques

1.8 L'influence de robot dans la vie quotidienne

Les robots sont déjà rentrés chez nous. Ils sont avant tout conçus pour apporter une aide aux tâches quotidiennes. Cette introduction dans notre vie relève de la robotique personnelle, qui se distingue de la robotique industrielle.

Les premiers robots ont été les robots ménagers : du mixeur au multi cuiseur, ils permettent de gagner du temps et de l'énergie. Quant aux voitures, elles sont déjà dotées de systèmes automatisés destinés à aider l'homme dans sa conduite : régulateurs de vitesse ou systèmes de guidage. Les Google cars, véhicules entièrement autonomes, sont déjà en circuit et autorisés au Nevada. Les robots d'entretien autonomes sont devenus des produits communs, notamment les aspirateurs [15]:

1.9 Conclusion

On a vu que les robots ont pris des places majeurs dans la vie quotidienne de l'homme à cause de leur influence qui se développe petit à petit au cours de temps et au cours de technologie.

Dans le cadre de ce développement important des robots dans tous les domaines, les chercheurs ont aussi intégré cette technologie exceptionnelle et essayez de la développer dans un domaine très sensible tel que le médical. Ils ont modifiée et changer des structures robotique pour répondre au besoin médical.

Ce domaine nécessite une perfection et une fiabilité exceptionnelle de la part de robot à cause des grands risques au corps humain.

Chapitre 2

Les robots

médicales

2.1 Introduction

La robotique médicale a une histoire récente puisque les premières expériences remontent aux années 1980. Les premiers systèmes étaient directement adaptés de la robotique industrielle. Depuis lors, la robotique médicale a profité du développement de nouveaux matériaux, de nouveaux capteurs et actionneurs pour la robotique, ainsi que de l'augmentation de la puissance de calcul en temps réel. Des facteurs importants de progrès ont été l'évolution très rapide des technologies d'imagerie médicale, mais également un intérêt croissant du monde médical pour la robotique qui apparaît aujourd'hui comme une technologie mature et capable d'améliorer la pratique médicale. Un signe évident de cette maturité est l'utilisation aujourd'hui de robots médicaux en routine clinique [16].

2.2 Historique

Dans le passé, les chirurgiens ont dû faire de grandes incisions pour atteindre les organes à réparer. Cela signifiait souvent de grandes cicatrices et des longs délais de récupération [17]. Des chercheurs de Vancouver de l'Université de la Colombie-Britannique UBC et de l'hôpital général de Vancouver VGH ont développé et testé cliniquement ce qu'ils croyaient être le premier robot médical (chirurgical) au monde en 1984.

Développé sous la direction du Dr. James McEwen. Chef du département de génie biomédical chez VGH. Le prototype du système de robot avancé manipule et positionne le membre du patient pendant la chirurgie orthopédique sur recommandation vocale du chirurgien. À ce jour « 12 novembre 1985 », plus de 60 arthroscopies chirurgicales assistées par robot ont été préformées par le chirurgien orthopédiste de l'UBC, le Dr Brian Day et ses collègues.

Le Dr. McEwen a déclaré au poste médical que l'utilisation d'une assistance robotique pendant une intervention chirurgicale orthopédique pouvait rendre l'opération plus sûre et améliorer la qualité du résultat. "Le chirurgien non plus doit effectuer deux travaux à la fois, c'est-à-dire manipuler l'articulation et effectuer la procédure". Ou bien, le chirurgien n'a plus besoin d'un assistant humain pour positionner et maintenir le membre pendant l'opération. Maintenir un membre en place pendant de longues périodes peut être très fatigant. L'idée derrière le robot est de réduire l'intensité de travail de certaines procédures chirurgicales "[18].

- En 1985, le PUMA 260 a été utilisé sur une vingtaine des patients à l'hôpital Long Beach a Californie.
- En 1985 un robot, le PUMA 560, a été utilisé pour placer une aiguille pour une biopsie de cerveau en utilisant un scanner.

- En 1988, le PROBOT, développé à Université impériale Londres, a été employé pour exécuter la chirurgie de la prostate.
- En 1992, le ROBODOC des systèmes chirurgicaux intégrés a été présenté pour réaliser une prothèse de hanche.
- En 1997, une reconnexion de l'opération de trompes utérines a été effectuée avec succès à Cleveland en utilisant ZEUS.
- En mai 1998, le robot chirurgical Da Vinci a exécuté le premier pontage coronarien en Allemagne.
- En octobre 1999, la première opération robotique chirurgicale du monde à cœur ouvert: la greffe d'artère coronaire a été effectuée au Canada à l'aide du robot chirurgical de ZEUS.
- La première chirurgie robotique non-pilotée a eu lieu en mai 2006 en Italie pour une intervention cardiaque [19].

L'apparition d'un robot chirurgical (Da Vinci Intuitive) a révolutionné la manière de procéder. Nous étions que dans des chirurgies minimalement invasives, mais grâce au développement de la technologie robotique, le chirurgien retrouvait une vision tridimensionnelle par l'existence de deux canaux optiques, et il retrouvait une mobilité en sept dimensions, grâce aux instruments articulés, qui s'avérait supérieure à celle de la main et du poignet du chirurgien [20].

2.3 Définition de robot médical

Les robots médicaux sont un type de robot de service professionnel utilisé dans et hors des hôpitaux pour améliorer le niveau global de soins aux patients. Ils allègent la charge de travail du personnel médical, ce qui leur permet de passer plus de temps à s'occuper directement des patients,

Chaque année le monde médical et ces développeurs en robotique multipliant leurs efforts pour essayer d'implanter des nouveaux appareils dans le milieu médical, qu'il s'agisse d'hôpitaux, des cliniques ou des salles d'opération, à cause de leurs efficacité surtout dans le domaine chirurgical

2.4 Spécificités de la robotique médicale

La robotique médicale se distingue principalement de la robotique classique par un cahier des charges spécifique que nous pouvons résumer par la prise en compte de trois contraintes principales (que nous nommerons les 3S par la suite) [16]. :

2.4.1 La sécurité

Modification de la norme ISO 9000 → Directive 93/42/CEE Certification EN 4600 permet le marquage CE et classe les robots suivant:

Classe 1 : faible degré de risque.

Classe 2 : degré moyen de risque.

Classe 3 : potentiel élevé de risque.

Classe 4 : potentiel très sérieux de risque.

Les critères de ce classement selon les normes européens :

- Durée d'utilisation du dispositif : de quelques minutes (temporaire) à plusieurs années (implantable),
- Le caractère invasif ou non du dispositif,
- Le type chirurgical ou non du dispositif,
- Le caractère actif ou non du dispositif,
- La partie vitale ou non du corps concernée par le dispositif (systèmes circulatoires et nerveux centraux) [21].

La problématique de la sécurité est primordiale en robotique médicale. Il s'agit non seulement de la sécurité envers le patient, mais également de la sécurité vis-à-vis du personnel médical qui va mettre en place et utiliser le système robotique, en se trouvant bien souvent à proximité. En effet, en robotique médicale le système robotique est en contact avec le patient ou le personnel médical à la grande différence de la robotique industrielle. En outre, dans le domaine de la santé, tout accident a un retentissement négatif énorme pour le praticien, comme pour l'entreprise commercialisant le dispositif. Même si en théorie le risque zéro n'existe pas et qu'il y a également toujours des aléas thérapeutiques, il est clairement attendu qu'un geste assisté par un système robotique soit plus sûr et plus précis que le même geste sans assistance [16].

Les ingénieurs ont ici une responsabilité envers le médecin qui va piloter le système robotique. Même si le robot ou ses concepteurs ne prêtent pas le serment d'Hippocrate, il faut tout au moins avoir en tête la première loi d'Asimov pour les robots. Le système robotique Robodoc (initialement distribué par la société ISS) d'assistance à la chirurgie orthopédique a ainsi dû cesser son activité en Europe suite à des cas de prothèses mal posées rapportés dans la presse allemande. En conséquence, plusieurs principes généraux s'imposent dans le domaine de la robotique médicale en matière de sécurité :

- des protocoles précis d'utilisation bien documentés avec une formation adéquate du personnel médical:

- des interfaces homme-machine intuitives, ergonomiques et sans ambiguïtés;
 - des procédures d'initialisation automatique;
 - des procédures de débrayage et de reprise en main manuelle de l'intervention:
 - un médecin dans la boucle, si possible ;
 - des architectures robotiques intrinsèquement sécurisées;
 - des fusibles mécaniques si les efforts peuvent être importants:
 - une redondance de capteurs;
 - des fusibles électriques:
 - une limitation de l'espace de travail, de la vitesse et des efforts;
 - des procédures de test logiciel du bon fonctionnement de tous les composants:
 - des procédures de validation pas à pas de la bonne exécution de toutes les étapes du traitement médical;
 - un allongement de la procédure médicale qui n'ait pas d'impact sur la santé du patient, etc.
- La mise en place et la description précise de toutes ces procédures et de ces composants sont nécessaires à l'obtention d'un marquage CE ou d'un FDA Approval requis pour une mise sur le marché [16].

2.4.2 La stérilité

Une autre contrainte particulière que l'on rencontre en robotique médicale est la contrainte d'asepsie, en particulier pour les procédures chirurgicales. Ainsi, les parties directement en contact avec le patient ou manipulées par le chirurgien et les instrumentistes devront être complètement stérilisées et les parties qui pourraient être en contact et ne peuvent être stérilisées seront sous emballage stérile (figure 2.1). Parmi les robots récents plus compacts, certains ont été conçus pour être totalement stérilisables; c'est le cas du robot LER-VIKY (figure 2.2) qui est autoclavable [16].



Figure 2.1 Robot chirurgical Da Vinci et son emballage stérilisé

Les contraintes habituelles que l'on peut rencontrer en termes d'asepsie pour un robot chirurgical sont les suivantes:

- les parties en contact avec le patient, le chirurgien et les instrumentistes passeront à l'autoclave ou bien seront jetables et avec un conditionnement stérile;
- les parties non jetables qui ne peuvent passer à l'autoclave seront recouvertes d'un emballage stérile en suivant un protocole très précis de manière à ne pas le souiller;
- le personnel du bloc devra être formé [16].

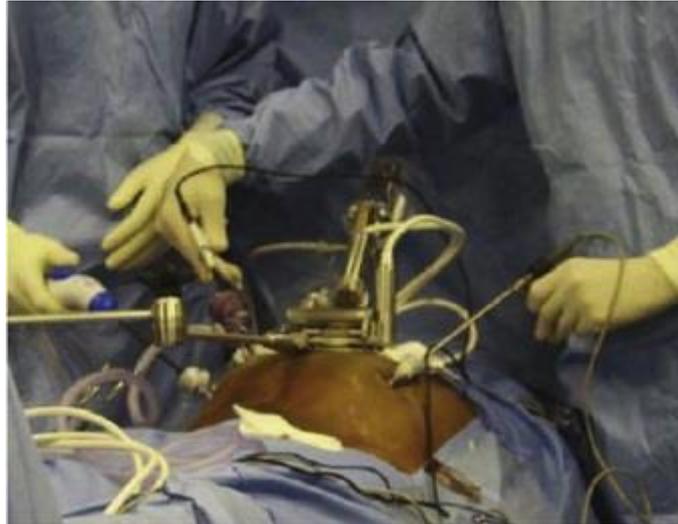


Figure 2.2 Robot porte-endoscope stérilisable en autoclave

2.4.3 La salle d'opération

Contrairement à la robotique industrielle où le système robotique fonctionne dans une cage protectrice conçue spécialement à cet effet, le robot médical va devoir s'adapter à l'environnement particulier de la salle d'opération. A l'exception de la radiothérapie robotisée, il existe encore très peu de salles d'hôpital spécialement conçues pour accueillir un système robotique. En plus des aspects de certification en tant que matériel médical (marquage CE, approbation par la FDA, etc.), les contraintes spécifiques à la salle d'opération sont principalement dimensionnelles, ergonomiques et de disponibilité, en particulier il est souhaitable de :

- réduire l'encombrement au maximum;
- rendre autant que possible « perceptible » l'espace de travail (par exemple en utilisant une architecture de type SCARA);
- pouvoir déplacer facilement le système robotique et son contrôleur, de préférence par une seule personne ;

- pouvoir facilement faire entrer et sortir du bloc opératoire le système robotique, sauf si une salle lui est entièrement dédiée comme en radiothérapie;
- définir des procédures précises de rangement et d'entretien des accessoires;
- assurer une maintenance préventive;
- prévoir une gestion efficace des pannes;
- assurer une compatibilité électrique et magnétique avec les autres équipements;
- éviter de devoir faire appel à un personnel spécialisé supplémentaire, etc... [16].

2.5 Avantages potentiels du robot dans une procédure médicale

Etant donné les contraintes particulières de la robotique médicale en termes de certification, de sécurité, d'asepsie (stérilité) et de salle d'opération, le passage du concept de laboratoire au système robotique utilisé en routine clinique est particulièrement long et difficile et les exemples de réussite sont à ce jour relativement peu nombreux. Il faut également s'interroger sur ce que l'on entend par réussite. Il y a la réussite scientifique et technique quand une prouesse technologique a été réalisée : celle-ci se mesurera à l'aune des publications scientifiques et des brevets dans le domaine de la robotique. Il y a le succès médical pour le chirurgien qui a réalisé une première avec un robot, mais il y a surtout le succès clinique quand le système robotique améliore la qualité des soins pour le patient.

Enfin, il y a le succès commercial quand une entreprise réussit à mettre sur le marché un système de robotique médicale en faisant des bénéfices. Clairement le succès technique ne fait pas le succès clinique et le succès clinique ne fait pas non plus le succès commercial. L'ingénieur ou le chercheur en robotique, même s'il maîtrise son art, n'en détient pas tous les éléments. Néanmoins, avant de se lancer dans un projet de recherche et développement potentiellement passionnant, mais souvent long et coûteux, il est utile de se demander si :

1. une expertise médicale de qualité dans le domaine du projet est disponible afin d'éviter de partir sur de fausses pistes par méconnaissance des bonnes pratiques médicales existantes;
2. le prototype de laboratoire, moyennant des développements supplémentaires, a des chances raisonnables de devenir un système utilisable sur un patient, c'est-à-dire certifié et respectant les 3S;
3. le système robotique va objectivement permettre l'amélioration du geste pratiqué par le médecin;
4. cette amélioration est potentiellement significative pour le patient ou pour le personnel médical.

Alors qu'il est difficile de répondre à la dernière question sans avoir fait des essais cliniques comparatifs entre des procédures robotisées et des procédures manuelles, il est possible de répondre aux autres interrogations au démarrage du projet ou pendant celui-ci.

Une réponse positive à la deuxième question est nécessaire si l'on veut pouvoir faire des validations cliniques. Une réponse positive à la troisième question suppose que l'on ait identifié des avantages pratiques à l'utilisation d'un robot par rapport à la procédure manuelle. Les avantages possibles du robot sur l'homme sont ceux que l'on rencontre déjà dans d'autres domaines d'application de la robotique et il est souhaitable que plusieurs de ces avantages soient avérés, comme

- la rapidité;
- la précision;
- la répétabilité ;
- le suivi de trajectoire automatique;
- la capacité à satisfaire des contraintes de position, vitesse et effort.
- la compensation d'efforts importants:
- la fusion en temps réel d'informations multimodales :
- l'enregistrement automatique des gestes effectués.

Et, dans le cas d'un système robotique télé-opéré :

- la démultiplication des mouvements et des efforts;
- l'augmentation du retour sensoriel:
- l'action à distance ou en milieu hostile;
- l'augmentation des degrés de liberté (ddl) et de la dextérité;
- le filtrage automatique des mouvements physiologiques et des tremblements.

On peut également ajouter à ces supériorités du robot sur l'homme, la possibilité de simuler un geste opératoire avec une interface robotique dédiée. Mais, pour être juste, il faudrait également tenir compte des supériorités de l'homme sur le robot, à savoir:

- la capacité d'analyse d'une situation et de prise de décision;
- la faculté d'adaptation, voire d'« improvisation »,
- la capacité d'entraînement et de formation;
- l'intégration d'informations complexes de sources multiples.

Indépendamment des aspects juridiques, ces supériorités plaident pour conserver au maximum la présence du médecin dans la boucle quand un robot est utilisé. Celui-ci doit rester avant tout un instrument médical au service du médecin. Par ailleurs, il faut garder à l'esprit que certaines des fonctions listées ci-dessus peuvent également être assurées par des

systèmes dits « de navigation ». Ces systèmes fonctionnent sur le principe du GPS: dans ces systèmes un localisateur permet de suivre la position et l'orientation des objets (instruments, capteurs et structures anatomiques) en temps réel et le système délivre au clinicien en continu l'information sur le geste qu'il réalise, éventuellement relativement à un planning préenregistré ou à des données préopératoires. Ces systèmes, déjà diffusés largement, se posent en véritables concurrents des robots médicaux. Afin de maximiser les chances de succès de ces derniers, il faut donc utiliser les robots là où ils ont une réelle valeur ajoutée par rapport à d'autres solutions, telles que les navigateurs.

2.6 Les domaines d'application principales de la robotique médicale

Ces domaines sont :

- la chirurgie de la tête et du cou (neurochirurgie, chirurgie maxillo-faciale, chirurgie dentaire);
- la chirurgie orthopédique ;
- la chirurgie mini-invasive du thorax et de l'abdomen (cardiaque, cardio- vasculaire, générale, urologique, gynécologique, etc.);
- la radiologie interventionnelle et les procédures percutanées;
- la télé-échographie;
- la radiothérapie et la radiologie de diagnostic.

Il existe également d'autres applications, mais on peut affirmer que la robotique médicale a acquis une certaine maturité dans les domaines précités. En effet, des systèmes robotiques y sont utilisés en routine clinique et un retour d'expérience est disponible.

2.7 La classification des robots médicaux

Il y a plusieurs classifications des robots médicaux selon différents chercheurs. On cite :

[Lavallée]: selon le degré d'autonomie de robots

- Systèmes passifs, ni moteurs, ni autonomie
- Systèmes semi-actifs, positionneurs et guides d'outils (la puissance est coupée lors de l'intervention proprement)
- Systèmes actifs, une partie de l'intervention est autonome (les axes de ces derniers étant motorisés)

[Troccaz] : elle a ajouté les notions

- Systèmes synergiques systèmes mus par l'actionnement du chirurgien, mais limitant et contraignant (dynamiquement) les gestes de celui-ci, par construction mécanique ou logicielle

- Systèmes de télé chirurgie + microsystèmes robotisés (redondant avec systèmes actifs ou synergiques)

[Dario] : par les notions

- Macro-robotique (robots de réhabilitation, d'intervention chirurgicale, stimulation fonctionnelle)
- Micro-robotique (endoscopes et robots pour la chirurgie minimalement invasive)
- Bio-robotique (implants électroniques, bionique, robionique)

[Dohi] : selon l'utilisation

- Robots de diagnostic et de biopsie,
- Robots thérapeutiques,
- Robots de réhabilitation,
- Robots aides-soignants,
- Robots de transport d'échantillons,
- Robots de recherche,
- Robots d'entraînement

[Théron] : coopération entre le système mécanique et les acteurs médicaux

- Coopération chirurgien/robot (le robot apporte précision et répétabilité),
- Coopération patient/robot (le robot apporte autonomie au patient handicapé)
- Coopération personnel hospitalier/robot (le robot assiste le personnel médical en le soulageant de tâches répétitives ou physiquement éprouvantes) [21].

2.8 Comparaison Homme / Machine

L'homme :

- ++ Capteurs naturels performants
- ++ Dextérité
- ++ Coordination
- ++ Capacité de raisonnement et de pensée
- ++ Adaptation des compétences
- la fatigue
- Tremblements
- Imprécision
- Incapacité de voir au travers des tissus
- Sensible aux radiations

La machine :

- ++ Précision géométrique
- ++ Précision dans le contrôle des efforts
- ++ Capacité à travailler en environnement hostile
- ++ Répétabilité
- ++ Pas de fatigue Inconvénients
- Peu de capacités à décider, apprendre et s'adapter
- Modèles incomplets
- Fiabilité limitée [21].

2.9 Intérêt de la collaboration Homme / Machine

- Meilleure précision
- Sécurité accrue
- Traumatismes diminués
- Diminution du nombre d'interventions
- Temps d'hospitalisation réduit

2.10 Analyse statistique des structures cinématiques des robots médicaux

L'analyse statistique des structures cinématiques est menée à partir des critères établis dans le catalogue de robots : le domaine médical, le type de structure globale,, le nombre de ddl puis la configuration cinématique. Cette analyse a pour but de mettre en évidence des caractéristiques communes et des caractéristiques plus spécifiques aux robots médicaux [22].

2.10.1 Domaine médical

Une étude en 2009 classe les robots médicaux selon les domaines les plus utilisé au monde et prendre 70 robots donne :

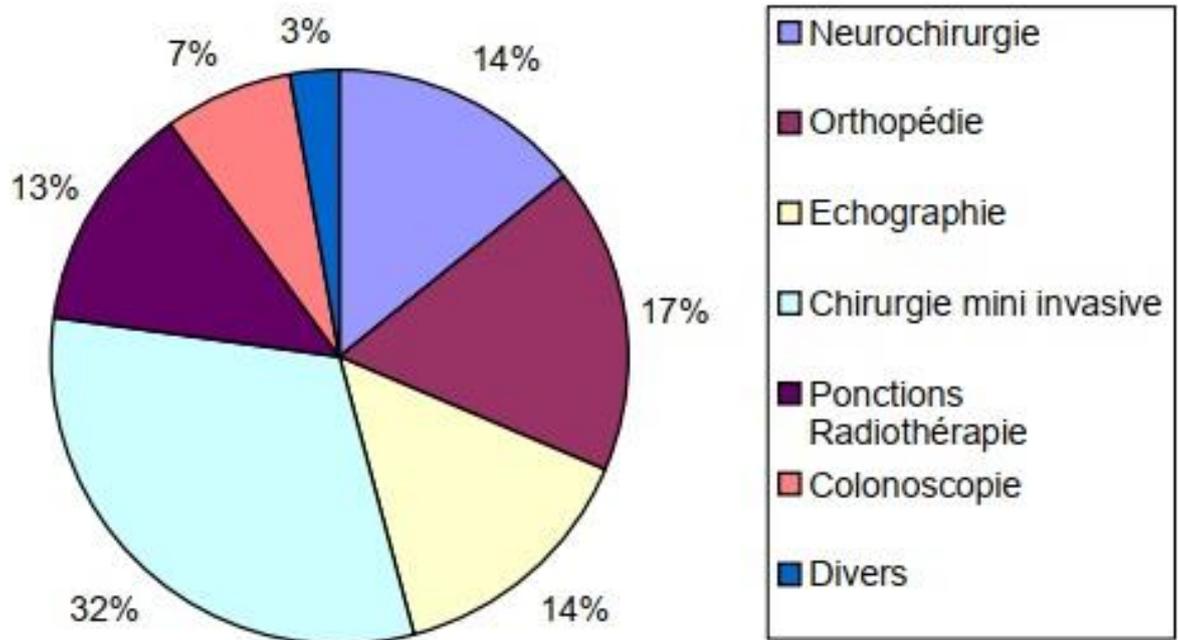


Figure 2.3 Répartition par domaine médical sur une population de 70 robots

Remarque : Les cas plus particuliers sont regroupés dans la catégorie « divers » [22].

Nous constatons que les robots de chirurgie mini-invasive représentent environ 30 % de la population étudiée. Ce domaine est très développé car l'apport de la robotisation en termes de précision du geste médical, d'amélioration des conditions de travail du chirurgien et donc de qualité de soin au patient sont les plus flagrants. La neurochirurgie, l'orthopédie, l'échographie et les ponctions et radiothérapie sont dans la même proportion : autour de 15% pour chaque application. Le domaine de la ponction devrait être plus représenté dans les prochaines années, car la recherche médicale et robotique débute avec des projets comme le projet CT-Bot, initié par le programme IRASIS, qui porte sur l'assistance robotique aux interventions percutanées sous scanner à rayons X. Notre analyse ne portera pas non plus sur la classification « divers » qui représente une faible population de robots appartenant aux domaines de l'ophtalmologie et de l'urologie [22].

2.10.2 Structure mécanique global

Ils ont analysé la répartition des structures globales sérielles, parallèles ou encore hybrides (qui est l'association des deux structures précédentes).

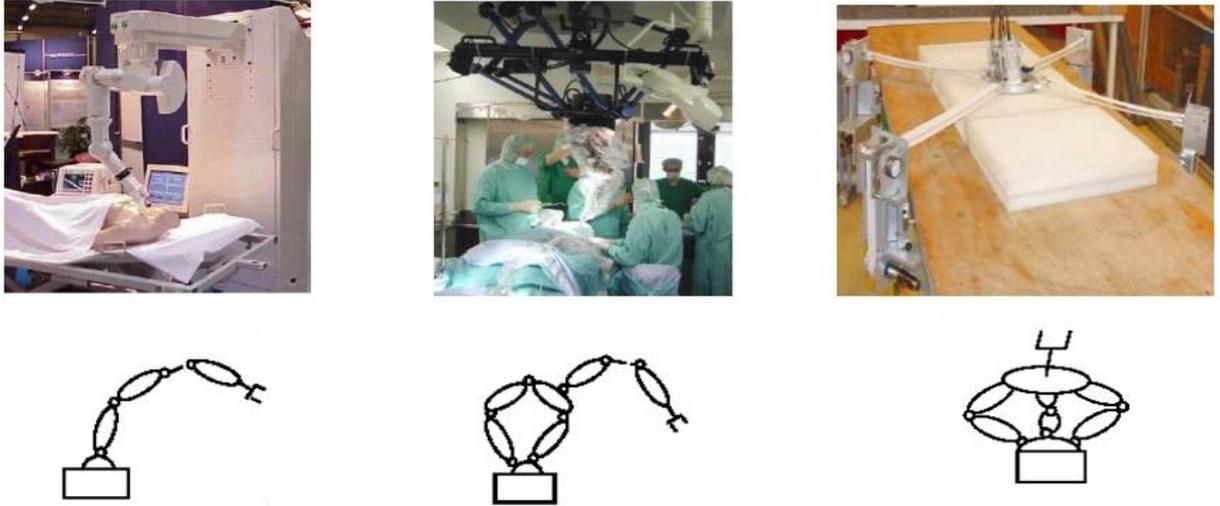


Figure 2.4. Robot Hippocrate (série), Robot Surgi scope (parallèle), Robot Ter (hybride)

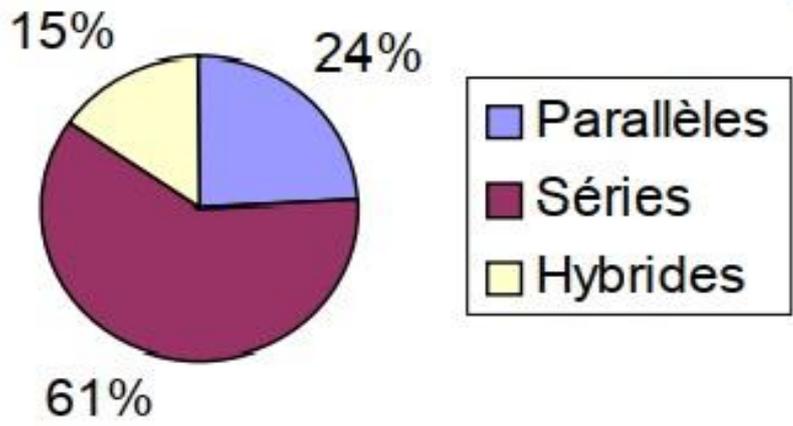


Figure 2.5 Répartition des structures globales des robots sur 33 robots étudiées

Nous remarquons que malgré sa rigidité, sa compacité et sa bonne précision, les inconvénients de la structure parallèle dans le domaine médical (difficile à mettre en œuvre, faible débattement angulaire, mauvaise empreinte sol/espace) qui sont très importants dans le bloc opératoire, poussent donc les concepteurs de robots médicaux à retenir la solution la plus simple : la structure série [22].

2.10.3 Les degrés de liberté

Ils ont étudié le nombre de degrés de liberté de 29 robots médicaux [22].

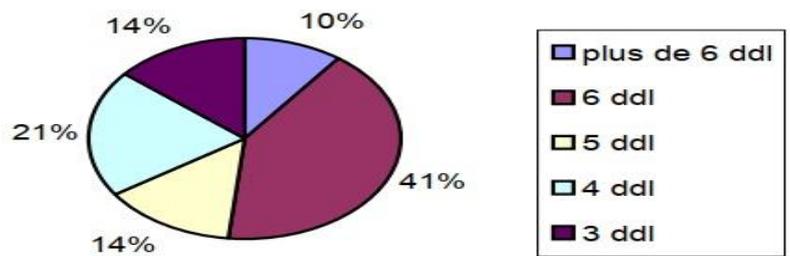


Figure 2.6. Répartition du nombre de degrés de liberté sur 29 robots étudiés.

Nous remarquons que plus de la moitié de ces robots ont 6 ddl ou plus

2.10.4 La configuration cinématique

Sur une population de 21 robots, nous notons 9 configurations différentes dans les mêmes proportions, autour de 10 %.

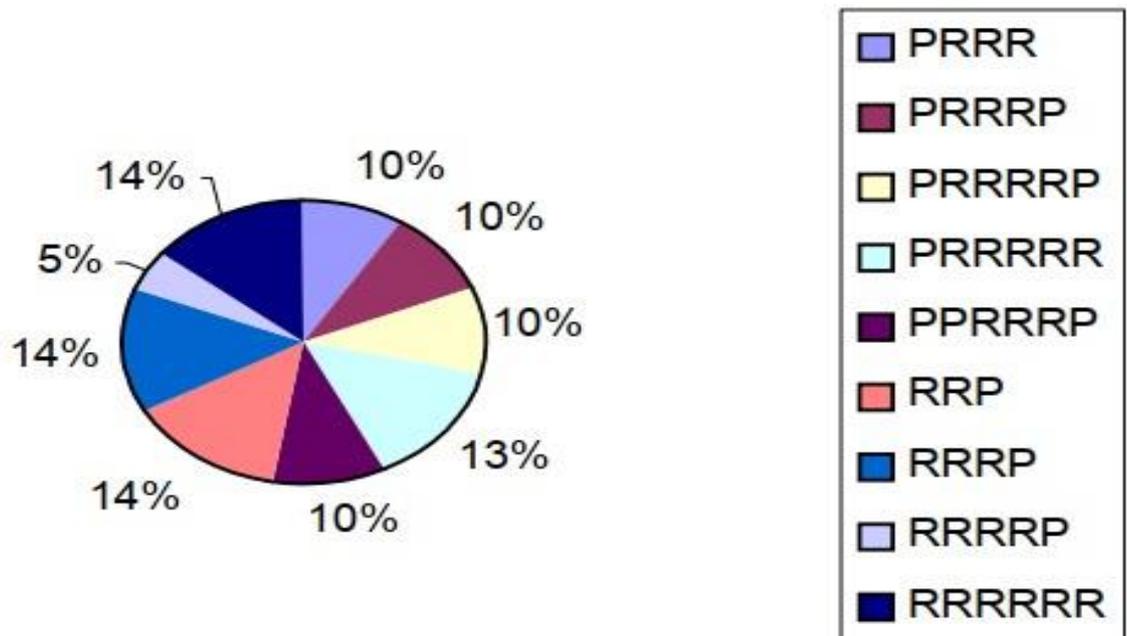


Figure 2.7 Répartition des configurations cinématiques des 21 robots séries étudiés.

R c'est correspond à une rotation propre et P est une translation de l'instrument.

On remarque que la partie qui sert au positionnement est pour près de la moitié des robots de type PRR et pour un tiers en RRR. En ce qui concerne les dernières articulations, la moitié des robots étudiés sont de type RRP, un quart RRR, et 20 % RP.

Nous observons la diversité des robots dans le domaine médicale dans tous ces caractéristiques et on peut ajouter aussi la conception de poignet et de porteur comme des critère secondaire [22].

2.11 Exemple d'utilisation de robot dans le domaine médical

2.11.1 La télé échographie :

2.11.1.1 Définition

Parmi les différentes techniques d'imagerie médicale les plus couramment employées en routine hospitalière, on retrouve l'imagerie par rayons X, l'imagerie par résonance magnétique (IRM) et l'imagerie ultrasonore (US). L'échographie est une technique d'imagerie médicale, basée sur l'analyse de la propagation des ultrasons, qui permet la

visualisation interne en 2 dimensions (2D) ou 3 dimensions (3D) de nombreux organes du corps humain. L'examen médical réalisé par un spécialiste en échographie est rapide, non invasif reproductible et peu onéreux. Cette méthode d'imagerie temps-réel apporte donc un réel avantage dans le cadre d'applications telle que celui de la chirurgie mini-invasive. D'un point de vue technique, pour réaliser une coupe 2D d'un organe, la sonde ultrasonore doit être en contact continu avec la peau du patient, et l'image 2D obtenue est représentée en niveaux de gris [23].

2.11.1.2 La Télé-Echographie robotisée

Grâce au développement des nouvelles technologies de l'information et de la communication, la télé médecine se développe de plus en plus, offrant ainsi un formidable outil pour lutter contre la désertification médicale. La télé-échographie s'inscrit entièrement dans ces nouvelles pratiques (télé consultation et télé-expertise). Cette nouvelle technologie a principalement été développée pour répondre à des problématiques de patients dits "isolés". Quelle que soit l'heure, un patient pourra bénéficier d'une échographie fiable pratiquée par un imageur reconnu même s'il se situe à 1 000 km de celui-ci.

Cette solution high Tech peut répondre à de nombreux besoins comme :

- faciliter la permanence des soins
- limiter les transferts de patients
- rationaliser ou mutualiser les gardes
- lutter contre la désertification médicale
- apporter une technique d'imagerie diagnostique performante là où il était impossible d'en disposer jusqu'alors (îles, bateaux, terrains militaires, espace, lieux de catastrophe.....) [24].

2.11.1.3 Les robots de la télé échographie

Dès 1998, le laboratoire Vision et Robotique de Bourges valide le concept de télé échographie robotisée avec le prototype Syrtech Il en résulte par la suite, la réalisation du prototype Teresa. Il possède un poignet sphérique, trois rotations à axes concourants et une translation suivant l'axe de la sonde. En 2001, le projet européen Otelo aboutit à la conception et à la réalisation de deux prototypes préindustriels : Otelo 1 et Otelo 2. Ils sont composés de deux articulations prismatiques et d'un poignet à 4 ddl (RRRP non SCARA) [22].



Figure 2.8 Le robot Teresa

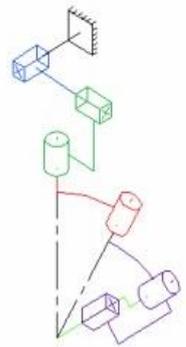


Figure 2.9 Le robot Otelo 2

Des robots de structures plus complexes ont été réalisés ; les robots japonais RUDS de Mitsubishi, et de Masuda, en sont les exemples. Le robot RUDS pour la télé-échographie de l'épaule est un robot série à 7 ddl. Il possède un porteur cartésien 3P et un poignet constitué de guides circulaires 3RP [22].



Figure 2.10 Le robot RUDS

Le robot de Masuda permet de réaliser une échographie de l'abdomen. C'est un robot hybride. Le positionnement est obtenu par des éléments parallèles, l'orientation par des engrenages. Le poignet sphérique de type série est à structure cardan [22].

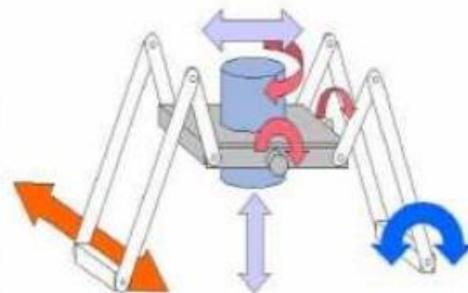
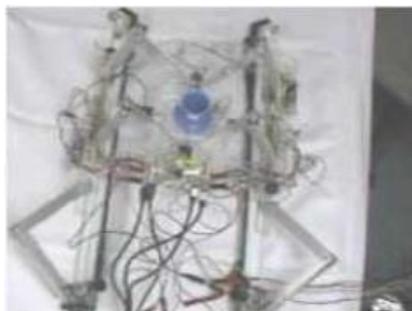


Figure 2.11 Le robot de Masuda

En 2004, Najafi de l'université de Manitoba conçoit un poignet porte-sonde échographique à 3 ddl . C'est une architecture hybride. L'orientation de la sonde est réalisée avec une structure parallèle à 2 ddl. Un troisième bras réalise la rotation propre de la sonde. Un nouveau prototype à 4 ddl est réalisé en 2007 avec une architecture proche. La structure parallèle qui oriente la sonde est un pantographe à six barres. Un mécanisme série utilisant un système de transmission par câbles permet l'orientation et la translation de la sonde suivant son axe propre [22].

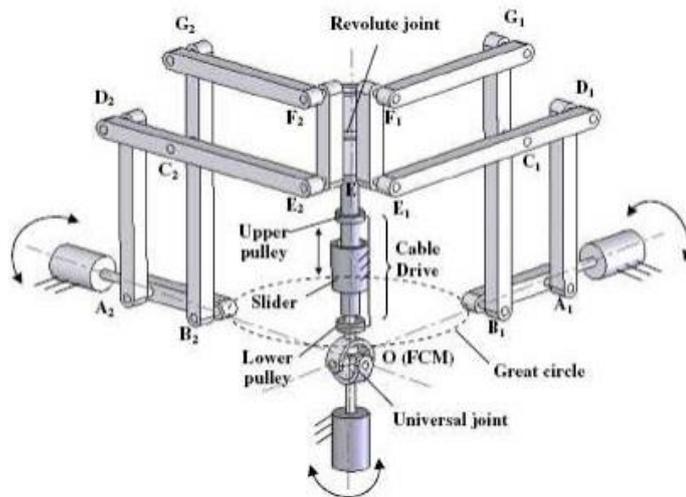


Figure 2.12 Poignet porte sonde de Najafi

la compagnie suédoise Medirob a commercialisé le robot Medirob. C'est un robot série classique à 6 ddl porté par une plateforme mobile,. Ce robot est spécialement utilisé pour réaliser des échographies cardiaques [22].



Figure 2.13 Le robot Medirob

Remarque : la structure cinématique des robots de télé échographie sont variée et différentes.

2.11.2 La ponction

2.11.2.1 Définition

Une ponction est un acte médical consistant à introduire une partie d'une aiguille creuse, d'un cathéter ou d'un trocart dans le corps afin de recueillir un liquide biologique ou des cellules. Ce geste peut avoir pour objectif une aide au diagnostic grâce aux examens complémentaires ou une aide au traitement par évacuation d'un liquide néfaste. Ce type de geste est effectué par un infirmier ou un médecin. On peut citer :

- la ponction veineuse (ou prise de sang dans le langage courant),
- la ponction artérielle,
- la ponction de moelle osseuse,
- la ponction articulaire, voir liquide synovial.
- la ponction lombaire,
- la ponction pleurale,
- l'amniocentèse,
- la paracentèse tympanique.

Le prélèvement obtenu est ensuite analysé en biologie médicale par des techniques de biochimie ou de cytologie. Cet acte médical est à distinguer d'autres gestes comme le sondage ou encore la biopsie [25].

2.11.2.2 La ponction robotisée

Comme un exemple on prend le robot de prélèvement veineux ce robot utilise plusieurs techniques pour choisir la veine à ponctionner. Celles-ci sont tout d'abord mises en évidence par un système infrarouge, et la comparaison du réseau veineux avec une base de données. Le vaisseau sélectionné est ensuite analysé par ultrasons, afin de déterminer la qualité du flux sanguin.

Vient ensuite la ponction, qui nécessite encore la présence d'un humain, réduit à introduire les tubes dans le corps de pompe...et probablement à rassurer les patients, peut-être pas tout à fait à leur aise.. [26].

2.11.2.3 Les robots de ponction

Un des premiers robots conçu dans ce domaine est le robot Paky, Percutaneous Access of the Kidney, qui réalise des ponctions du rein. C'est un système actif à 1 ddl de descente d'aiguille, par entraînement par frottement où deux roues en opposition génèrent une translation. Il est couplé au bras passif à 5 ddl Grey-Arm de Taylor qui permet un positionnement grossier et au centre de rotation instantané RCM, qui confère deux degrés de liberté supplémentaires au dispositif d'insertion.

Le RCM est réalisé par un système poulie courroie. L'aiguille est positionnée, la position est verrouillée avec la manette. Pour l'insertion d'aiguille il reste 3 ddl contrôlés par les joysticks: deux rotations et une translation [22].

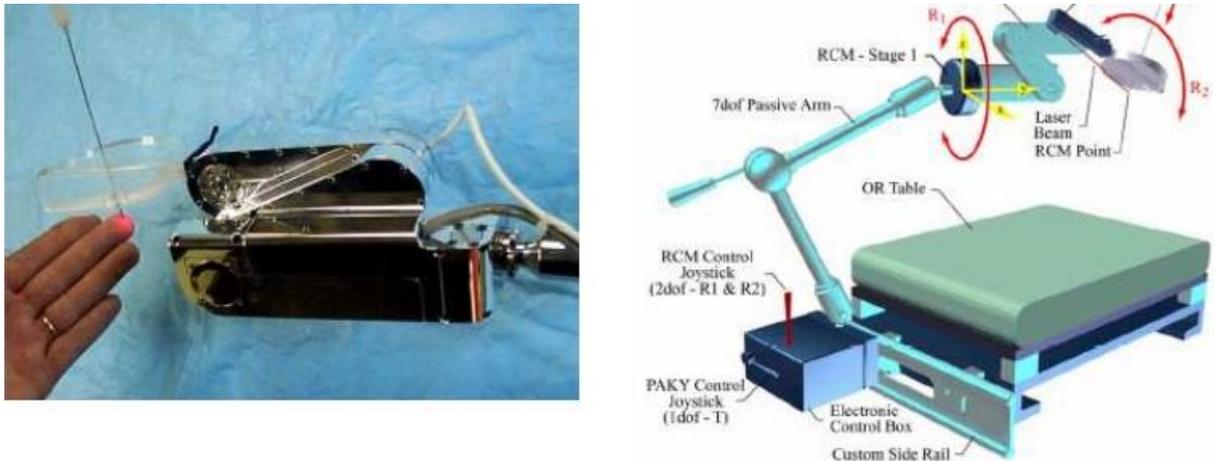


Figure 2.14 Le robot Paky et son schéma

On trouve également dans ce domaine des robots dédiés. Le robot LPR, robot de ponctions léger du laboratoire TIMC en est un exemple. Il permet de réaliser des biopsies sous IRM ou CT-Scanner. Sa masse est de 1 kg. Il est en matériaux plastiques compatibles avec la Résonance Magnétique, il est transparent, sans artefact sous CT-Scanner. Il est conçu comme les robots TER et LER avec une structure hybride. Il possède 5 ddl de type PPRRP [22].



Figure 2.15 Le robot LPR

Le robot CT-BOT possède une structure très différente. Il permet de positionner et d'insérer une aiguille de façon précise sur l'abdomen, sous imageur IRM ou scanner. Il présente une structure parallèle constituée de deux branches symétriques comportant cinq articulations rotoïdes chacune. Cet ensemble permet d'effectuer le positionnement du manipulateur avec cinq composantes de mobilité (trois rotations et deux translations). Une troisième branche sert à l'insertion de l'aiguille par un dispositif d'enfoncement passif. Elle laisse deux degrés de liberté à la structure globale (une translation et une rotation) pour l'insertion de l'aiguille. Il est fabriqué en poudre de polyamide et équipé de moteurs à ultrasons. Sa masse est de 1,9 kg. Le système est fixé sur le corps du patient pour compenser les mouvements de respiration. Récemment, un système d'insertion d'aiguille compatible avec le retour d'effort a été étudié [22].

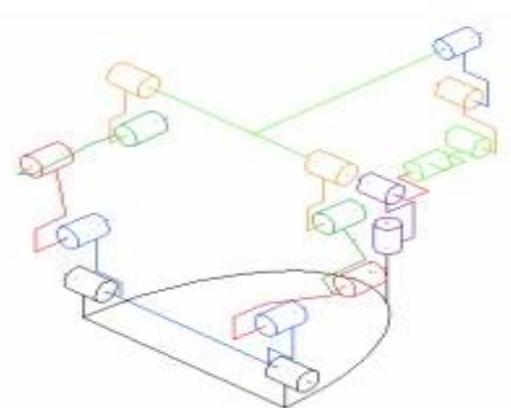
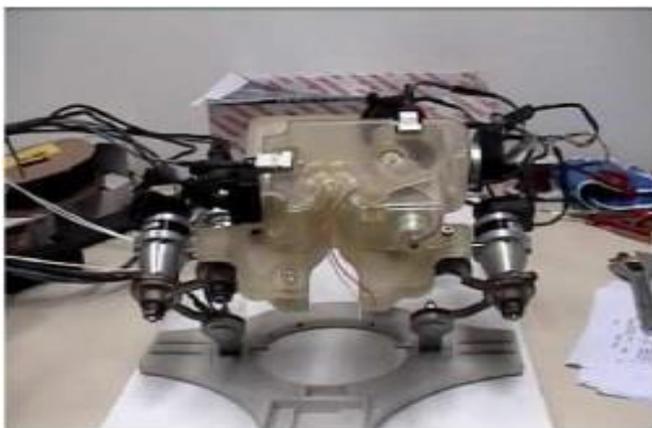


Figure 2.16 Le robot CT-Bot et son schéma

Remarque : dans le domaine de ponction les robots ont des structures spécifiques avec de matériaux compatibles avec l'IRM et CT-scanner

On a citée dans ces exemples les robots majeurs dans différents domaines médicales sauf le chirurgical qu'a un chapitre spécifique.

2.12 Conclusion

Les robots médicaux ont des utilisations vastes et différentes à cause les résultats de ca collaboration avec l'homme, le robot donne des avantages important dans le domaine médical (la grand précision par exemple). L'analyse statistique permet au chercheurs d'essayé d'intégrer des structures plus confortables aux chirurgiens dans ca utilisation pour répondre le besoin médical et améliore la qualité de soin (le succès clinique) .

Les domaines médicales comme la télé échographie et la ponction connu avec le temps des changements dans la structure de ces robots et des configurations cinématique divers pour une utilisation plus simple mais les grands études sont fait dans le domaine chirurgical qu'est le domaine majeur dominant presque deux tiers de la population des robots médicales,

Chapitre 3

Les robots

Chirurgicales

3.1 Introduction

La chirurgie robotique, ou chirurgie assistée par robot, permet aux médecins d'effectuer des nombreux types des procédures complexes avec plus de précision, de flexibilité et de contrôle que ce qui est possible avec les techniques conventionnelles. La chirurgie robotique est généralement associée à des interventions chirurgicales mini-invasives réalisées à travers des petites incisions. Il est également parfois utilisé dans certaines procédures chirurgicales comme les opérations ouvertes traditionnelles [27].

3.2 Historique

Certains actes chirurgicaux étaient pratiqués dès la préhistoire, comme le montre la découverte de cranes portant des marques de trépanation (opération qui consiste à pratiquer un trou dans un os). Mais c'est aux Grecs que l'on doit la création d'une véritable chirurgie rationnelle, et le document essentiel de l'histoire de cette discipline est la collection d'Hippocrate, aux V-IVème siècle avant J.C. Enormément d'opérations y sont décrites [28].

Comme on a vu dans le chapitre précédent, presque toutes les premières robots médicales sont des robots chirurgicales depuis 1984 qui aident les chirurgiens à faire l'opération dans des conditions mieux que la chirurgie traditionnelle, avec ces avantages primordial la robotique chirurgicale a connu un grand développement à partir des années 2000 pour dépasser des techniques opératoires comme la laparoscopie classique.

Des robots comme PUMA 260, PUMA 560, Robodoc, Zeus, Da Vincietc, ont fait une très grande révolution dans le domaine chirurgical médical

3.3 Définition

Les robots chirurgicaux médicaux c'est des systèmes autonomes, semi-autonomes ou passifs aidés le praticien à réaliser des gestes de diagnostic ou/et d'opération plus précis et répétitifs.

3.4 Les objectifs de chirurgie robotique

- Rendre plus précis et plus efficaces les gestes du chirurgien
- Rester le moins invasif possible [19].

3.5 Les principes généraux d'opération robotisée

Les quatre principes de base pour effectuer une opération chirurgicale assistée par un robot sont les suivants :

3.5.1 Création d'une image virtuelle du patient

- Scanner: Reconstruction des images 2D ou 3D des structures anatomiques.
- Imagerie par résonance magnétique (IRM).
- Rayons X.
- Ultrasons : Obtention d'une coupe de l'organe étudiée [19].



Figure 3.1 Utilisation de l'IRM pour créer une image de patient

3.5.2 Analyse et traitement de l'image

- Manipulation du modèle des patients 3D par modélisation pour extraire l'information appropriée à partir des données.
- Utilisation de niveaux différents de contraste des tissus (squelette, système artériel, exploration des vaisseaux...) [19].



Figure 3.2 Modélisation des organes de patient pour extraire des informations

3.5.3 Planification et simulation

- Meilleure évaluation du cas et établissement d'un diagnostic plus précis.
- Projection et simulation de la chirurgie
- Programmation des actions pré planifiées pendant l'intervention chirurgicale réelle [19].



Figure 3.3 Simulation de la chirurgie

3.5.4 Navigation chirurgicale

- Robots autonomes: exécution seulement par le robot qui effectuera les actions préprogrammées.
- Robots semi actifs : exige du chirurgien de manœuvrer les bras robotiques pendant le procédé.
- Système de navigation passive: contrainte des mouvements du chirurgien par le robot pour éviter les problèmes rencontrés en phase pré opératoire. [19].



Figure 3.4 NeuroArm spécialisé en Neurochirurgie

3.6 Les avantages de chirurgie robotique

- Réduction des complications opératoires et postopératoires:
 - Réduction des infections et des douleurs ;
 - Diminution des besoins en transfusions sanguines ;

- Réduction de la durée d'hospitalisation ;
- Renforcement de la qualité des soins;
- Confort et conditions optimales pour des interventions chirurgicales parfois longues et délicates ;
- Limitation du traumatisme opératoire (réduction de la taille des incisions, des délabrements tissulaires...);
- Facilitation d'interventions complexes;
- Précision du geste: aucun tremblement;
- Grossissement jusque 20 fois en 3D;
- Système anti-tremblements...[19].

3.7 Les inconvénients de la chirurgie robotique

- le cout trop cher du robot (2 Million de dollars pour le robot Da Vinci).
- Formation du personnel.
- Panne d'électricité.
- Frais annuels importants de maintenance de la machine (430 000 €), notamment celui des instruments [19].

3.8 Les domaines d'application principales des robots en chirurgie

3.8.1 La neurochirurgie :

3.8.1.1 Définition

La neurochirurgie est la spécialité chirurgicale dont le domaine d'expertise est le diagnostic et la prise en charge chirurgicale des troubles du système nerveux. Le système nerveux se divise en trois grands segments :

- le système nerveux central (cerveau, moëlle épinière)
- le système nerveux périphérique (nerfs qui vont du système nerveux central vers le reste du corps)
- les systèmes nerveux végétatifs ou « autonomes », assurant le fonctionnement d'organes de manière automatique (innervation de l'intestin, du muscle cardiaque...)

Le champ d'intervention est particulièrement large et les neurochirurgiens sont fréquemment spécialisés dans un type particulier de neurochirurgie :

- neurochirurgie crânienne
- neurochirurgie du rachis

- neurochirurgie pédiatrique... [29].

3.8.1.2 Les robots de la neurochirurgie

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

Les structures séries

Un des premiers robots utilisé en neurochirurgie est le robot Neuromate. Il a été conçu en 1989 par le laboratoire TIMC et commercialisé par la société ISS. Il est de type anthropomorphe à 5 articulations rotoïdes (5R). Il a été développé pour le traitement des tumeurs cérébrales. Il permet de positionner très précisément l'instrument chirurgical qui est actionné par le chirurgien. 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. [22].

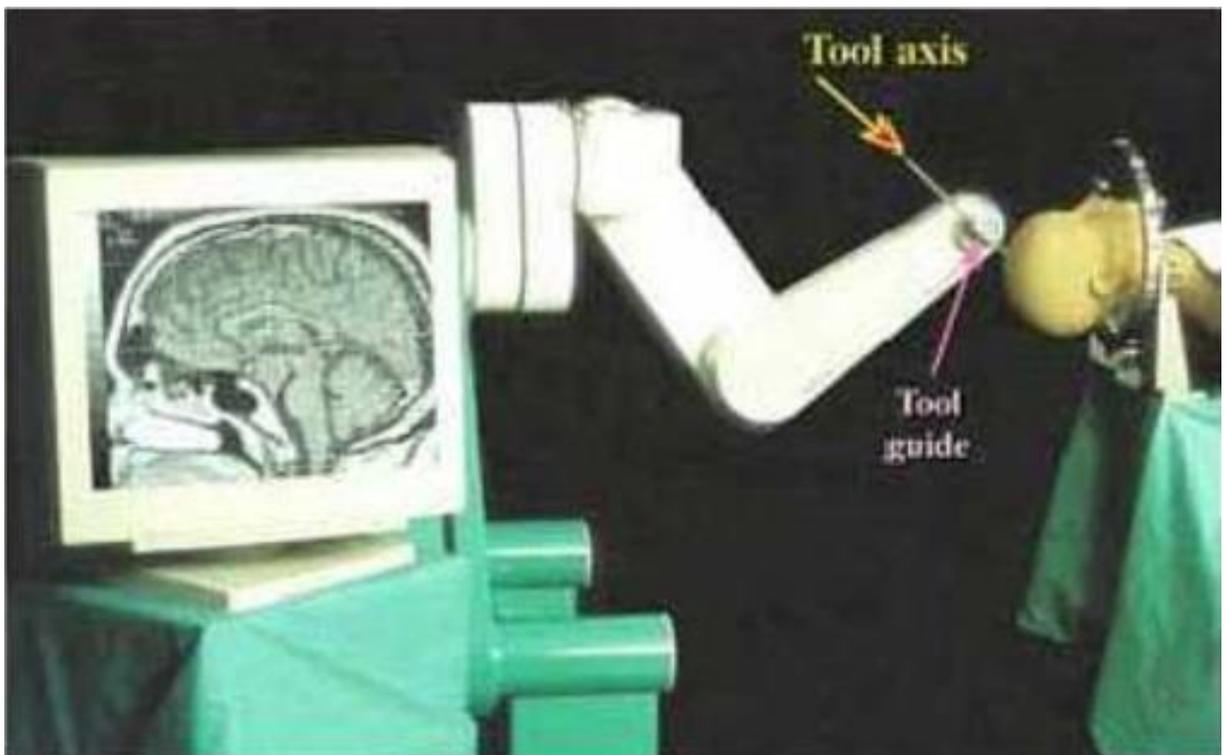


Figure 3.5 Le robot Neuromate

Le robot PathFinder de la société Armstrong Healthcare, devenue Prosurrgics,, a été conçu avec la même structure cinématique de bras passif anthropomorphe [22].



Figure 3.6 Le robot PathFinder

Les structures parallèles

La robotique parallèle est apparue en robotique médicale avec le robot Surgiscope. Il permet la manipulation d'un microscope opératoire lors d'interventions destinées principalement à la neurochirurgie. Il superpose sur un patient sa propre image par résonance magnétique afin de localiser en 3D les zones à traiter et positionne l'instrument chirurgical. Il est composé de deux modules : un porte-microscope et un système de neuro-navigation basé sur des IRM ou des images de tomodensimètre (CT). C'est un robot parallèle, application du robot delta développé par Elekta qui lui donne une mobilité de 3 degrés de liberté en translations. L'originalité de ce robot est qu'il est suspendu au plafond afin de ne pas encombrer la salle d'opération [22].

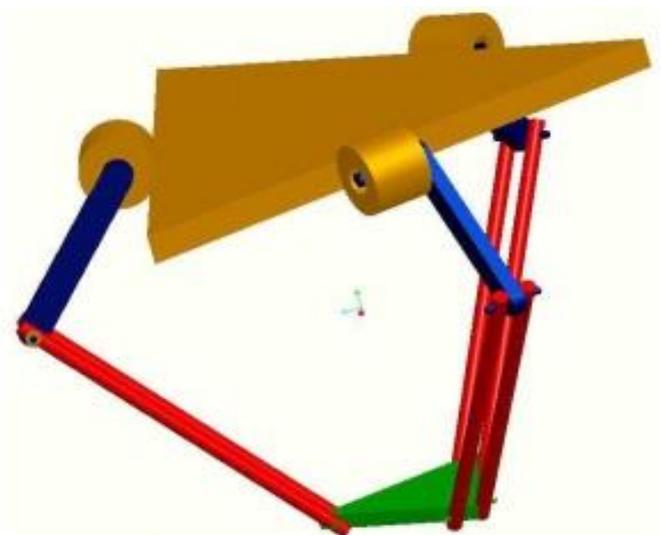


Figure 3.7 Le robot Surgiscope

Le robot URS Evolution 1 est un autre robot parallèle hexapode de type M-850. Chaque bras est constitué d'une chaîne cinématique de type SPS [22].



Figure 3.8 Le robot Roboscope

Remarque : pour la neurochirurgie on remarque une variété dans les modèles de structure mais à cause de sa précision la structure parallèle est la plus souvent utilisée.

3.8.2 L'orthopédie

3.8.2.1 Définition

La chirurgie orthopédique porte sur le traitement chirurgical des déformations (orthopédie) et des accidents de l'appareil locomoteur : squelette, muscles et ce qui les relie (tendons et ligaments). On y distingue des spécialités telles que :

- la chirurgie restauratrice osseuse, articulaire, ligamentaire et musculo-tendineuse,
- la chirurgie prothétique de la hanche, du genou et des autres articulations,
- la chirurgie arthroscopique,
- la chirurgie réparatrice des fractures ostéo-articulaires, [30].

3.8.2.2 Les robots de la chirurgie orthopédique

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 IBM 7576 de type SCARA, à 3 articulations rotatives d'axes parallèles et une

articulation prismatique (RRRP). 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. Le chirurgien contrôle le bon déroulement de l'opération, il peut intervenir à tout moment à l'aide d'un bouton d'arrêt d'urgence. Pour le même type d'opération, a été développé Caspar de la société Maquet, robot industriel Staübli RX présentant une architecture série anthropomorphe à 6 ddl [22].



Figure 3.9 Le robot Robodoc

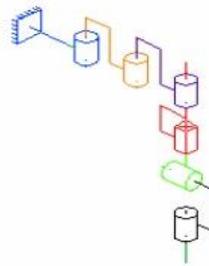
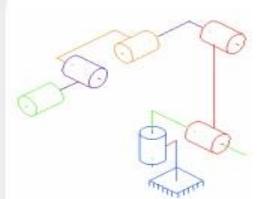


Figure 3.10 Le robot Caspar



Le robot Acrobot de l'Impérial College de Londres, également anthropomorphe, est conçu pour assister le chirurgien dans la pratique de son geste médical. Il a été développé pour la pose de prothèse de genou. C'est un robot synergique qui limite les mouvements du chirurgien à partir d'une pression déterminée pour éviter les zones à risque. Pour cela, il est équipé d'un capteur d'effort à son extrémité [22].



Figure 3.11 Le robot Acrobot

Le robot Crigos avec une structure parallèle. Il possède une structure à 6 ddl de type plateforme de Stewart surmontée de porte-outils spécifiques. Il permet d'adapter l'espace de travail à la région réduite d'intervention [22].



Figure 3.12 Le robot Crigos

Remarque : la structure sérielle est la plus utilisée dans ce domaine de chirurgie

3.8.3 L'urologie

3.8.3.1 Définition

Est une discipline médicale et chirurgicale qui porte sur l'étude, le diagnostic et les traitements des affections touchant l'appareil urinaire, chez l'homme comme chez la femme. Elle concerne donc un vaste domaine de la médecine. Pour cette raison, cette discipline est souvent séparée en sous-spécialités.

L'appareil urinaire comprend:

- les reins, filtres du corps humain
- les uretères, qui transportent l'urine des reins à la vessie
- la vessie, qui sert de stockage et de vidange de l'urine via l'urètre. Ce canal traverse la prostate, puis parcourt la verge pour s'ouvrir à l'extérieur du corps.

L'urologie s'occupe aussi des affections de l'appareil génital masculin, constitué par les testicules - responsables de la production des spermatozoïdes et de la testostérone -, les canaux déférents, la prostate, les vésicules séminales et le pénis [31].

3.8.3.2 Les robots de la chirurgie urologique

Dans ce cadre général d'évolution des gestes médico-chirurgicaux vers moins d'invasité, plus d'efficacité et une traçabilité meilleure, le robot a une place potentielle importante. Historiquement, l'urologie fut un des premiers domaines cliniques où un robot fut expérimenté. En collaboration avec la London Clinic, l'Imperial College of Science, Technology and Medicine de Londres mit au point à partir de 1989 un robot d'assistance à la résection endo-urétrale de prostate appelé PROBOT. Le premier test sur patient eut lieu en avril 1991. Une faisabilité fut établie à partir de 5 patients puis une étude préclinique fut faite sur une série de 40 patients. Différentes versions de ce système furent réalisées car le premier prototype à base de robot industriel (Puma 560 connecté à un cadre limiteur de mouvement) n'était pas propre à un usage clinique. Le système actuel est constitué d'un porteur passif permettant de placer un cadre circulaire supportant 3 degrés de liberté (2 rotations et une translation pour positionner l'outil). Une des limitations de ce système concerne la difficulté à piloter ce robot automatiquement à partir des données ultrasonores dans le but de monitorer la progression de la résection [32].

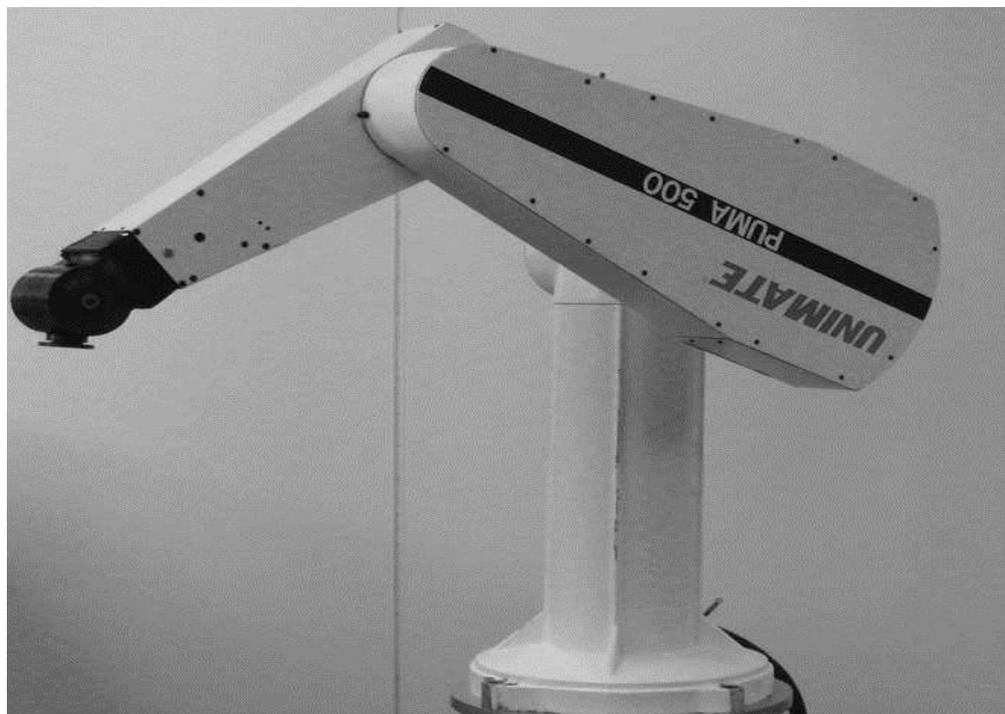


Figure 3.13 Le robot PUMA 560

Le LER a 3 ddl (les deux rotations de l'outil autour du point d'incision et la translation dans le corps du patient), est complètement stérilisable et pèse 625g. Il est commandé à la voix par le chirurgien. Son évaluation sur cadavre et sur cochon a permis l'évolution des différents prototypes. La validation clinique en est prévue en 2006 en chirurgie digestive et urologie [33].



Figure 3.14 Le robot LER

Remarque : les robots utilisés en chirurgie urologique ont à la plupart des structures sérielles

3.8.4 La chirurgie dentaire

3.8.4.1 Définition

La chirurgie dentaire ou odontologie est la spécialité médicale qui étudie et traite les affections des dents et de la mâchoire. Elle comporte plusieurs disciplines, dont l'implantologie – pose de prothèses et implants –, l'orthodontie – correction de l'alignement des dents – et la médecine bucco-dentaire intervenant spécifiquement sur des patients dont la prise en charge est délicate pour raisons médicales ou techniques [34].

L'utilisation des robots dans la chirurgie dentaire présente plusieurs avantages :

- Elle permettrait tout d'abord de faire face à la pénurie de chirurgiens-dentistes dans certaines régions, en particulier à la campagne et dans les déserts médicaux
- Elle diminuerait également le risque d'erreur, le robot travaillant avec plus de précision et de rapidité qu'un humain

- Les robots dentistes offrirait par ailleurs des soins plus précis et plus adaptés aux besoins des patients grâce à ses différents capteurs et caméras ainsi qu'à ses instruments miniatures et ses bras articulés

En bref, pour de nombreux observateurs, l'utilisation des robots permettrait de combiner l'expertise des dentistes et les avancées de la technologie [35].

3.8.4.2 Les robots de la chirurgie dentaire

(Exemple d'un seul robot par ce que c'est une nouvelle technologie). C'est le samedi 23 septembre 2017, dans la ville de Xian, dans la province du Shanxi en Chine qu'a eu lieu la première pose d'implants dentaires par un robot-dentiste. En une heure, Yomi, le robot-dentiste a en effet réussi l'exploit de poser deux implants qui avaient été préalablement créés par une imprimante 3D dans la mâchoire d'une patiente.

Développé par l'Université Beihang à Pékin et l'hôpital stomatologique de la quatrième université médicale militaire, ce robot a travaillé seul, sous le regard attentif de plusieurs chirurgiens-dentistes qui ne sont intervenus que pour le changement de certains accessoires, et notamment des fraises. Les chercheurs avaient également programmé les angles, la profondeur et l'orientation des gestes à effectuer avant l'opération.

Le bilan de l'opération dit que les implants ont été posés en respectant une marge d'erreur de 0,2 à 0,3 millimètre ce qui correspond à la norme en vigueur [35].



Figure 3.15 Le robot Yomi

3.8.5 La chirurgie des yeux

3.8.5.1 Définition

La chirurgie des yeux, encore appelée chirurgie réfractive ou chirurgie oculaire, se pratique à l'aide d'un laser Excimer, soit lors d'un lasik, soit lors d'un laser de surface (PRK, Lasek ou épi-lasik). Elle a pour objectif de corriger la myopie, l'hypermétropie et l'astigmatisme.

L'opération des yeux au laser Excimer peut être pratiquée simplement pour corriger le chiffre de l'affection pour que le patient n'ait pas à porter de lunettes. Cette chirurgie oculaire peut être optimisée pour aller au-delà de la simple correction du chiffre de myopie, d'hypermétropie ou d'astigmatisme. Ainsi, dans ce cas, on visera à atteindre une meilleure qualité de vision en éliminant les effets indésirables d'une vision floue, dédoublée, les voiles et les éblouissements. Naturellement, plus la correction apportée par chirurgie réfractive est importante, plus la technologie utilisée est pointue et coûteuse [36].

3.8.5.2 Les robots de chirurgie des yeux

(Exemple d'un seul robot par ce que c'est une nouvelle technologie). Des chirurgiens britanniques de l'Université d'Oxford ont réalisé la première opération robotique à l'intérieur de l'œil. Menée à l'hôpital John Radcliffe (Oxford), la procédure pourrait révolutionner la prise en charge de troubles oculaires et de la chirurgie en général, estime le Pr Robert MacLaren qui a supervisé la procédure.

L'opération a été menée sur William Beaver, un révérend âgé de 70 ans. Une membrane épirétinienne idiopathique de quelques micromètres d'épaisseur (100 fois plus petit qu'un millimètre) s'était développée sur sa rétine, troublant le centre de sa vision et nécessitant une prise en charge. Un problème qui arrive fréquemment avec l'âge.

Le Robotic Retinal Dissection Device (R2D2) permet d'opérer à l'intérieur de l'œil en passant par un trou de moins d'un millimètre de diamètre, explique un communiqué de l'Université d'Oxford. Le robot n'agit pas seul: le chirurgien guide l'opération à l'aide d'une manette mais l'ampleur de ses mouvements est très fortement atténuée par le robot, lui assurant une précision sans pareil. Ce mécanisme permet d'éviter un éventuel tremblement ou mouvement brusque de la part du chirurgien qui pourrait perforer la rétine [37].



Figure 3.16 Le robot R2D2

3.9 Les démarches de conception d'un robot chirurgical



Figure 3.17 Processus de conception d'un robot

Ces 5 étapes détaillées ci-dessous :

– La synthèse topologique correspond à la détermination de la topologie de l'architecture du robot, sa structure cinématique : le concepteur choisit une structure parallèle, sérielle ou hybride, ainsi que le nombre et les types de liaison, puis choisit leur agencement dans l'espace.

- La synthèse dimensionnelle : il s’agit dans cette étape de déterminer les dimensions géométriques des corps ainsi que leurs orientations relatives.
- La synthèse de forme des corps : dans cette étape, il s’agit de dimensionner la forme des corps de la structure et des articulations pour répondre aux exigences de charge statique et aux exigences dynamiques.
- Le dimensionnement élasto-dynamique de la structure, par analyse fréquentielle
- L’intégration et le choix des actionneurs : choix du type d’actionneur (électrique, pneumatique...), choix des éléments de guidage et de transmission (roulements, paliers lisses, guide linéaire... et courroie, engrenages...) et intégration physique des actionneurs (position des éléments des supports moteurs).

Ces 5 étapes sont généralement suivies de manière séquentielle. Lorsque cela est possible, chaque étape est résolue au moyen d’un programme d’optimisation ou de manière manuelle. Les optimisations pour chaque étape sont effectuées en fonction des contraintes et des critères de performance qui ont été définis avec les spécifications fonctionnelles. Aussi on peut Remarquer que l’étape 2 et l’étape 5 sont fortement liées les unes aux autres, car leurs optimisations ont en commun le critère de compacité.

On voit donc ici que la conception séquentielle du robot peut conduire à une solution sous-optimale, indiquant la nécessité d’une optimisation simultanée de toutes les étapes. Par exemple, à notre connaissance, la synthèse topologique n’est pas effectuée à l’aide de critères de poids ou d’encombrement ; mais le nombre de liaisons établi dans cette étape, a un impact sur le nombre d’actionneurs et donc du poids, critère pris en compte dans l’étape d’intégration des actionneurs. Une topologie a priori optimale pour les critères cinétostatiques serait sous-optimale pour l’étape d’intégration, indiquant un compromis entre chaque étape, ce qui indique la nécessité d’une optimisation simultanée. Ce qui éviterait cette séquentialité serait de poser un problème d’optimisation pour chaque étape, permettant par la suite d’effectuer une optimisation simultanée entre chacune [38].

3.10 Les étapes de formation en chirurgie robotique

Elles peuvent être catégorisées en trois étapes :

3.10.1 Formation aux habiletés de base

Indispensable quel que soit la spécialité, elle vise à une maîtrise technique de la console du robot et à l'acquisition d'automatismes indispensables pour pouvoir ensuite concentrer son attention à la conduite de l'intervention. De la même manière qu'en conduite automobile il ne faut plus avoir à réfléchir quelle séquence de mouvements faire pour changer de vitesse, mettre ses essuie-glaces en route ou allumer ses codes et ainsi pouvoir se concentrer sur la route : au robot il ne faut plus avoir à réfléchir pour utiliser les manettes de commandes, le débrayage des instruments, la coagulation mono / bipolaire, déplacer la caméra ou mettre en route le 4^e bras par exemple.

Cette formation a beaucoup bénéficié du développement des simulateurs de chirurgie robotique; elle doit être progressive, basée sur la simulation qui a prouvé son efficacité dans l'acquisition de ces habiletés de base. Elle doit également inclure des enseignements théoriques qui peuvent être effectués en e-learning, puis des exercices sur la vraie console robotique. Ces exercices sur modèles inanimés ont une haute validité et peuvent faire appel à différents modèles pour simuler des temps opératoires particuliers. Des exercices en microchirurgie où le chirurgien a une activité très similaire à celle du robot ont été proposés. L'entraînement sur des modèles animaux a longtemps été la méthode la plus répandue mais doit être limitée au maximum, tant pour des raisons de coût que d'éthique et effectué uniquement en fin de formation, dernière étape avant la chirurgie sur l'humain. Cette formation aboutit à acquérir une compétence à la console permettant de réaliser des interventions simples sans risques pour le patient : un équivalent de « permis de conduire ». La durée nécessaire pour cette formation est sujette à discussion. Un temps minimum doit cependant y être consacré, très vraisemblablement supérieur la journée proposée le plus souvent par la société commercialisant le robot.

Si l'on se réfère à des formations pour d'autres technologies, non médicales, on constate par exemple que l'apprentissage de la conduite automobile nécessite une vingtaine d'heures, que le brevet de pilote privé d'avion est passé après 45 heures, et que les durées sont similaires pour le permis bateau, le planeur ... etc. En chirurgie robotique, certains préconisent plus de 100 heures de formation. Le diplôme interuniversitaire de chirurgie robotique développé à Nancy propose 5 jours de formation intensive, après validation d'un enseignement en ligne. Certains incluent dans cette étape la formation auprès du patient (son installation sur la table d'opération, la création du

pneumopéritoine, la mise en place des trocars); cependant celle-ci fait déjà partie des habiletés connues du chirurgien de laparoscopie. S'y ajoutent simplement la gestion de la bonne position des trocars et leur arrimage aux bras du robot. Le rôle de l'assistant qui reste présent près du patient apparaît de plus en plus comme essentiel en chirurgie robotique, et une étape utile voire indispensable pour tout chirurgien avant de passer comme opérateur à la console de commande [39].

3.10.2 Formation avancée

Il s'agit de l'apprentissage des procédures chirurgicales, spécifique de chaque spécialité et de chaque intervention. Cette étape de la formation n'est profitable qu'à un chirurgien qui a préalablement une maîtrise technique de la console du robot. Un chirurgien expérimenté en chirurgie ouverte ou laparoscopique, qui connaît l'anatomie et les différents temps opératoires, progressera alors beaucoup plus vite sur cette étape que le jeune chirurgien qui, plus ouvert aux nouvelles technologies, a peut-être acquis la maîtrise de la console plus rapidement, mais a tout à apprendre des différentes procédures chirurgicales. La formation avancée fait appel également à la simulation, avec des exercices simulant des actes techniques particuliers de chaque procédure, et de plus en plus des interventions virtuelles. L'entraînement sur modèles inanimés est également proposé, ainsi que de la chirurgie sur animal ou sur cadavre. Elle comporte également des observations de cas puis des interventions encadrées par un expert. L'utilisation d'une double console permet un apprentissage en double commande, mais impose un coût substantiel [39].

3.10.3 Formation aux compétences non techniques

À la console, le chirurgien est assis, sa tête placée contre les lunettes binoculaires de la console, isolant complètement sa vision de tout élément extérieur. De ce fait, la communication visuelle qui représente 80 % des transferts d'information en temps normal se trouve inopérante, ce qui nécessite de développer de nouveaux modes de communication, outre les autres compétences non techniques indispensables au travail d'équipe que sont : la cognition (prise de décision et conscience de la situation), les interactions sociales (communication, coopération) et les facteurs personnels (leadership). L'importance de ces compétences non techniques est de plus en plus prise en compte au bloc opératoire, car elles sont une des principales causes d'erreurs et de façon récente en chirurgie

robotique.

Leur enseignement fait classiquement appel à des cours et à de la simulation avec immersion de l'équipe. Un nouveau type de simulateur, le Xperience Team Trainer (XTT) comporte deux simulateurs, l'un de la console du robot et l'autre de coëliochirurgie classique qui sont connectés entre eux et permettent au chirurgien et à son aide de travailler sur des exercices communs [39].

3.11 L'évaluation des compétences

Formation et évaluation sont liées comme les deux faces d'une pièce de monnaie et l'absence de validation des compétences pose le problème, aux Etats-Unis, des hôpitaux sont poursuivis en justice pour avoir autorisé à opérer des chirurgiens insuffisamment formés. Les simulateurs amenés à une utilisation large permettent une évaluation simplifiée, automatique et objective des habiletés de base, et ont prouvé leur valeur prédictive. L'évaluation des compétences peropératoires est plus complexe, basée sur l'observation, le visionnage de vidéos par des experts, voire l'évaluation par analyse participative, et l'établissement de spécialisé pour les compétences non techniques. Il est du rôle des sociétés savantes, collèges d'enseignants et universités d'évaluer ces méthodes et d'établir des recommandations sur la façon et les moments de les utiliser dans la carrière des chirurgiens, en s'inspirant peut-être de l'aéronautique où la simulation est largement employée lors de la formation initiale, mais également lors des certifications complémentaires, ainsi qu'après de longues périodes d'inactivité [39].

3.12 Conclusion

Malgré le coût élevé soit d'achat ou de maintenance, la robotique chirurgicale facilite les opérations complexes et donne un confort et des conditions optimales au chirurgien pour des interventions longues duré. Pour le patient elle diminue le temps d'hospitalisation et renforcer la qualité de soin, tout ça dans des spécialités chirurgicales nécessite une grand précision comme la neurochirurgie et la chirurgie oculaire et d'autres nécessite des langues duré tell que l'orthopédie. Avec le développement technologique dans ce domaine les chercheurs essayé d'intégrer la robotique dans tous les domaines médicaux et chirurgicaux possible (par exemple le robot Yomi de la chirurgie dentaire) et aussi développe des nouveaux systèmes de simulations pour former le personnel chirurgical d'être capables de gérer les opérations avec perfection.

Chapitre 4

les difficultés de control dans le robot Da Vinci

4.1 Introduction

Le robot Da Vinci est l'un des robots majeur dans le secteur robotique chirurgical, spécialisé en chirurgie mini-invasive, Da Vinci a connu des développements et des multiples générations pour essayer d'atteindre une performance maximale en chirurgie. Nombreuse clinique et hôpital autour le monde a commencé de la dernière décennie l'utilisation de ce robot magistral et former ces staffs chirurgicales pour être capables d'utiliser tous simplement et sans problème, dans un domaine délicat tel que le chirurgical les fautes de l'homme vont pas être accepté, alors que une bonne formation des personelles avec des longues durés permet d'évité ces problèmes.

4.2 Historique sur le robot Da Vinci

La recherche qui a finalement conduit au développement du système chirurgical da Vinci a été réalisée à la fin des années 1980 dans un institut de recherche à but non lucratif SRI International. En 1990, le SRI a reçu un financement des National Institutes of Health. Le SRI a développé un prototype de système chirurgical robotique qui a suscité l'intérêt de la Defense Advanced Research Projects Agency, qui s'est intéressée au système pour son potentiel à permettre aux chirurgiens d'opérer à distance des soldats blessés sur le champ de bataille.

En 1994, le Dr Frederic Moll s'est intéressé au système SRI, tel que le dispositif était connu à l'époque. À l'époque, Moll était employé par Guidant. Il a essayé d'intéresser Guidant à le soutenir, en vain. En 1995, Moll a été présenté à John Freund, qui avait récemment quitté Acuson Corporation. Freund a négocié une option pour acquérir la propriété intellectuelle de SRI et a incorporé une nouvelle société qu'il a nommée Intuitive Surgical Devices.

La société a affiné le système SRI en un prototype connu à l'origine sous le nom de "Lenny" (d'après le jeune Léonard de Vinci), qui était prêt à être testé en 1997. Au fur et à mesure que les prototypes de la société devenaient plus avancés, ils ont été nommés en utilisant des thèmes da Vinci. L'un s'appelait "Leonardo" et un autre était "Mona". La version finale du prototype a été surnommée le système chirurgical da Vinci, et le nom est resté lorsque le système a finalement été commercialisé. Après des tests supplémentaires, Intuitive Surgical a commencé à commercialiser ce système en Europe en 1999, en attendant l'approbation de la FDA aux États-Unis.

La société a levé 46 millions de dollars lors d'un premier appel public en 2000. Cette même année, la FDA a approuvé l'utilisation du système chirurgical da Vinci pour la chirurgie laparoscopique générale, qui peut être utilisée pour traiter les maladies de la vésicule biliaire et gastro-œsophagienne. En 2001, la FDA a approuvé l'utilisation du système pour la

chirurgie de la prostate. La FDA a par la suite approuvé le système pour la chirurgie thoroscopique, les procédures cardiaques effectuées avec des incisions complémentaires et les procédures gynécologiques.

Peu de temps avant son introduction en bourse, Intuitive Surgical a été poursuivi pour contrefaçon de brevet par Computer Motion, son principal rival. Computer Motion était en fait entré dans le domaine de la chirurgie robotique avant Intuitive Surgical, avec son propre système, le système chirurgical robotique ZEUS. Bien que le système ZEUS ait été approuvé en Europe, la Food and Drug Administration des États-Unis ne l'avait pas encore approuvé pour aucune procédure au moment où elle a approuvé pour la première fois le système da Vinci. L'incertitude créée par le litige entre les entreprises a freiné la croissance de chaque entreprise. En 2003, Intuitive Surgical et Computer Motion ont accepté de fusionner, mettant ainsi fin au litige entre eux. Le système ZEUS a finalement été progressivement abandonné au profit du système da Vinci. Computer Motion a été dirigé par le président Robert Duggan de 1990 à 2003, date à laquelle les deux sociétés ont fusionné.

Avant la fusion de Computer Motion, l'action d'Intuitive se vendait à environ 14 \$ par action, ajusté des fractionnements d'actions. Après la fusion, le cours de l'action a considérablement augmenté (et en 2015 il était d'environ 500 dollars), principalement en raison de la croissance des systèmes vendus et du nombre d'interventions chirurgicales effectuées (moins 1 000 en 2002 contre 540 000 en 2014) [40].

4.3 Définitions

4.3.1 La chirurgie mini-invasive

Contrairement à la chirurgie «à ciel ouvert», cette technique chirurgicale limite le traumatisme opératoire. Pour accéder aux organes et aux tissus aisément, la chirurgie traditionnelle impose de faire des incisions larges; cela a des conséquences non négligeables:

- le saignement opératoire est abondant, nécessitant un prélèvement de sang autologue préopératoire en vue d'une éventuelle transfusion sanguine.
- la douleur post-opératoire concerne tout le territoire concerné par l'intervention, et pas seulement la cible.
- les séquelles à type d'adhérences au niveau des différents tissus concernés par l'incision.
- les cicatrices, parfois inesthétiques et de mauvaise qualité (fibrose , chéloïdes).
- le risque infectieux non négligeable, augmentant avec la durée d'hospitalisation.

La chirurgie mini-invasive permet au chirurgien d'atteindre sa cible par des incisions de l'ordre du centimètre grâce à l'utilisation d'instruments longs et fins, couplés à un système d'imagerie vidéo [41].

4.3.2 Le robot Da Vinci

Da Vinci est une plate-forme chirurgicale robotisée, il est plus simplement un robot-assistant du chirurgien. En effet, cette machine n'est pas autonome, elle est dirigée par un chirurgien, spécialisé et entraîné, pour réaliser des opérations, principalement au niveau de l'abdomen. Ce robot a hérité du nom de l'illustre savant car ses créateurs le considéraient comme l'Homme le plus intelligent au monde. Le système Da-Vinci est actuellement la plateforme chirurgicale mini-invasive la plus perfectionnée au monde.

Il a été présenté comme une révolution en matière de chirurgie mini-invasive, bien qu'en 2011, environ 1 750 exemplaires fonctionnaient dans le monde, principalement aux États-Unis et en Europe [42].

En Avril 2020, il existe plus de 5500 robots da Vinci dans le monde, fabriqués par le géant de la technologie basé en Californie, intuitive surgery.

4.4 La famille de robot Da Vinci

4.4.1 Le robot Da Vinci de base

L'utilisation du robot Da Vinci dans sa version de base, commercialisée en 2003, a été le point de départ de la chirurgie robotisée par Da Vinci. Ce robot n'est plus actuellement en service. Il offrait déjà au chirurgien une bonne vision tridimensionnelle du champ opératoire, une aisance dans les mouvements, un filtrage de ses tremblements ainsi qu'un ralentissement local possible de ses gestes lui permettant une grande dextérité [43].

4.4.2 Le robot Da Vinci S

La version S du robot, commercialisée depuis 2006, représente un outil de deuxième génération, qui conserve les avantages de la version de base, tout en l'améliorant sur de nombreux plans. La précision des gestes opératoires est encore améliorée par l'adjonction d'un quatrième bras articulé permettant donc au chirurgien de contrôler en plus de la caméra 3 instruments au lieu de 2. Le chirurgien peut ainsi mieux s'exposer et l'assistant opératoire est plus efficace. Par ailleurs, les articulations des bras robotiques sont à plus grands débattement et moindre encombrement, ce qui limite les conflits possibles entre les bras par

rapport à la version de base. Il offre au chirurgien une meilleure vision du champ opératoire. La magnification de l'image est permise par un zoom puissant d'un facteur 10 et le passage en 3D Haute Définition de la vision endoscopique initiale 3D. Le système fournit à l'urologue des visualisations interactives intégrées dans son champ de vision, associées à des capacités d'affichage en vidéo multi-sources [43].



Figure 4.1 Le robot Da Vinci S

4.4.3 Le robot Da Vinci Si

La version Si est un robot de troisième génération, commercialisé depuis 2009, qui conserve les avantages des versions de base et S, tout en présentant encore de significatives améliorations. La version Si permet des observations d'une précision et d'une qualité visuelle encore meilleures des zones d'intervention et fournit une vision à haute résolution des structures anatomiques en HD et couleurs naturelles. Ceci résulte notamment de l'amélioration de sa vision endoscopique 3D Haute Définition et elle offre à l'équipe médicale 2 sources complémentaires à la vision du champ opératoire en 3D (comme, par exemple, des ultrasons ou des électrocardiogrammes), car elle est munie d'un système d'écrans multi-sources, Le chirurgien dispose d'une meilleure maîtrise des réglages de ses manipulations, de la vidéo et de l'audio grâce à l'existence d'un nouveau pavé tactile et d'un système de commandes intégrées [43].



Figure 4.2 Le robot Da Vinci Si

4.4.4 Le robot Da Vinci Xi

Le système chirurgical da Vinci Xi® est optimisé pour la chirurgie multi-quadrants avec son architecture montée sur flèche et ses articulations de configuration multi-positions qui maximisent l'espace de travail chirurgical en interne et en externe. C'est l'option mini-invasive la plus avancée pour les chirurgies complexes dans nombreuse domaines de la chirurgie.

Les améliorations du système XI comprennent:

- Instruments articulés
- Visualisation 3D-HD plus nette
- Amplitude de mouvement intuitive et plus étendue

Le Xi permet au chirurgien d'explorer une partie différente du corps à mi-opération sans repositionner l'ensemble de l'appareil. Il a quatre bras montés sur une architecture de flèche aérienne qui peut tourner et pivoter dans pratiquement n'importe quelle position. Les bras peuvent même être déconnectés et reconnectés en cours de procédure si nécessaire. De plus, l'endoscope utilisé pour voir ce qui se trouve à l'intérieur du corps fournit des images tridimensionnelles plus nettes et plus définies (10 fois plus grandes que l'œil humain). Il peut également être attaché à l'un des bras robotiques. Les bras du da Vinci XI sont plus petits, plus minces et ont une plus grande amplitude de mouvement. Même les arbres de l'instrument, les manchons insérés à l'intérieur de l'incision sont plus longs afin que les chirurgiens puissent sonder plus loin qu'auparavant [44].



Figure 4.3 Le robot Da Vinci Xi

4.4.5 Le robot Da Vinci X

Le système chirurgical da Vinci X est optimisé pour la chirurgie focalisée des quadrants. Il présente les dernières technologies de pointe dans l'agrafage, le scellage des récipients, la vision et plus encore.

Il fournit également un chemin de mise à niveau simple à mesure que les besoins du programme évoluent. Son architecture de bras maximise la plage de mouvement, rationalise la configuration et simplifie le placement des ports.

Le chariot patient comporte des bras plus petits et plus minces qui augmentent l'amplitude des mouvements, minimisent les interférences peropératoires et permettent un placement simplifié des ports.

Un chariot motorisé déplace le chariot de patient sur le sol avec facilité, tandis que le guidage laser élimine le travail de conjecture sur le placement du chariot. Les montures de canule optimisées et une fonction intuitive de saisie et de déplacement pour déplacer le bras en place simplifient l'amarrage chirurgical.

Enfin, le chariot patient a un quatrième bras mobile pour fournir une flexibilité dans la position et / ou la configuration du chariot et le saut de port est activé sur n'importe quel bras opérationnel à tout moment pendant la procédure [44].



Figure 4.4 Le robot Da Vinci X

4.4.6 Le robot Da Vinci Sp

Alors que les générations précédentes du da Vinci ont introduit des améliorations technologiques, le SP est le premier à apporter des changements significatifs dans la façon dont les procédures peuvent être effectuées. Par exemple, les hôpitaux qui utilisent déjà les modèles Xi ou X peuvent coupler ces systèmes avec le robot SP. Cela pourrait commencer la pratique de la construction d'une famille de robots compatibles qui peuvent être configurés pour différentes procédures et approches. Les chirurgiens qui développent une compétence avec le modèle Xi trouveront que le contrôle et l'utilisation du SP sont presque identiques [45].

Le système da Vinci SP fournit aux chirurgiens une technologie assistée par robot conçue pour un accès profond et étroit aux tissus du corps. La possibilité de pénétrer dans le corps par une seule petite incision ou par un orifice naturel peut fournir une expérience minimalement invasive pour des procédures complexes. et le contrôle auquel les chirurgiens font confiance grâce aux systèmes da Vinci », a déclaré Guthart le CEO de Intuitive Surgery [46].



Figure 4.5 Le robot Da Vinci Sp

4.5 Les composants de robot Da Vinci

Le robot Da Vinci se compose de trois éléments principaux :

4.5.1 Console de chirurgien

C'est l'endroit où le chirurgien s'assoit confortablement et, via des manipulateurs manuels, contrôle les mouvements des instruments sur le site chirurgical. L'opérateur de la console de chirurgien est assis à l'extérieur du champ stérile et contrôle les instruments et un endoscope 3D avec ses mains, à l'aide de deux contrôleurs principaux et avec ses pieds, à l'aide de pédales. Elle est également considérée comme l'unité de contrôle pour le reste des pièces. La console est fournie par un «visionneuse stéréo» qui traduit l'image du site opératoire acquise par l'endoscope et l'affiche devant les yeux du chirurgien. Les pointes des instruments semblent s'aligner avec les mains du chirurgien au niveau des contrôleurs principaux, comme indiqué dans la visionneuse stéréo. Cette conception simule l'alignement naturel des yeux, des mains et des instruments de la chirurgie ouverte. L'alignement naturel, à son tour, aide à optimiser la coordination œil-main. Cela signifie que la plate-forme robotique permet au chirurgien d'être aussi adroit qu'en chirurgie ouverte tout en opérant dans un environnement mini-invasif. Un contrôle supplémentaire est fourni par la mise à l'échelle du mouvement et la réduction des tremblements, ce qui minimise l'impact des tremblements naturels de la main ou des mouvements accidentels. L'opérateur de la console de chirurgien a également la possibilité de changer la vue du mode plein écran au mode multi-images, qui affiche l'image 3D du champ opératoire avec jusqu'à deux images supplémentaires fournies par les entrées

auxiliaires, pendant la chirurgie sur le même écran. La console du chirurgien comprend les éléments suivants:

- Contrôleurs principaux
- Visionneuse stéréo
- Boutons latéral gauche et droit
- Panneau de commande au pied [47].



Figure 4.6 La console de chirurgien

4.5.2 Chariot de patient

Le chariot patient est le composant opérationnel du système da Vinci. C'est l'unité esclave du système et fonctionne pour soutenir les trois bras d'instruments et le seul bras de caméra. La technologie du centre à distance est utilisée dans le système robotique, ce centre est un point fixe dans l'espace autour duquel les bras du chariot du patient se déplacent. La technologie du centre à distance permet au système de manœuvrer les instruments et les endoscopes dans le site chirurgical tout en exerçant une force minimale sur la paroi corporelle du patient.. L'opérateur du chariot patient peut visualiser le site opératoire à l'aide d'un écran tactile en option. Pour garantir la sécurité du patient, les actions du chirurgien assistant qui utilise le chariot patient ont priorité sur les actions de l'opérateur de la console du chirurgien. Cette section compose par les éléments suivants:

- Configurer les articulations
- Bras d'instruments
- Bras de caméra

- Écran tactile
- Moteur d'instrument
- Instruments robotiques EndoWrist [47].



Figure 4.7 Le chariot de patient

4.5.3 Chariot de vision

Abrite les équipements de traitement d'image du système. Il est opéré par un assistant non stérile pendant la chirurgie. Il prévoit également un écran tactile en option et un équipement chirurgical auxiliaire. Deux types de systèmes de vision sont disponibles avec le système da Vinci: le système de vision à définition standard (SD) et le système de vision haute définition (HD).

Le chariot de vision se compose des composants suivants:

- Illuminateur
- Endoscopes
- Tête de caméra stéréo
- Unités de commande de caméra
- Écran tactile du chariot de vision
- Haut-parleurs et microphones
- Transformateur d'isolement et multiprise
- Supports de réservoir [47].



Figure 4.8 Le chariot de vision

4.6 Les domaines d'usages du robot Da Vinci

Les systèmes chirurgicaux Da Vinci sont autorisés par les agences de réglementation applicables pour une utilisation dans un certain nombre de procédures différentes.

Pour les patients cardiaques

La chirurgie mini-invasive avec da Vinci peut être utilisée à la place de la chirurgie à cœur ouvert.

Pour les patients colorectaux

La partie inférieure du tube digestif, appelée gros intestin, comprend le côlon et le rectum et est également parfois appelée région colorectale. Le robot Da Vinci avec sa technologie mini-invasive pourrait être utile.

Pour les patients en chirurgie générale

La chirurgie générale couvre de nombreux types de procédures, y compris la réparation de la hernie inguinale que les chirurgiens peuvent effectuer avec da Vinci.

Pour les patients gynécologiques

Les médecins peuvent suggérer une intervention chirurgicale, telle qu'une hystérectomie bénigne avec da Vinci, si le patient et leur médecin convenant que c'est une option appropriée.

Pour les patients de la tête et du cou

La chirurgie assistée par robot Trans orale (par la bouche) peut être une option pour la chirurgie de la bouche et de la gorge.

Pour les patients thoraciques

Lorsque la chirurgie est une option pour des conditions telles que le cancer du poumon, les médecins peuvent choisir une chirurgie mini-invasive avec da Vinci.

Pour les patients en urologie

Les médecins peuvent suggérer une intervention chirurgicale avec da Vinci pour les procédures d'urologie impliquant la prostate ou le rein [48].

4.7 Le fonctionnement de robot Da Vinci

Ce robot est muni de quatre bras manipulés par le chirurgien qui possèdent sept degrés de liberté (contrairement au poignet humain qui n'en possède que trois) ce qui permet une plus grande précision, et évite les tremblements du médecin. D'autre part une opération réalisée à l'aide du Da Vinci est moins invasive que celle pratiquée directement par le chirurgien, il y a donc moins de risques de complications postopératoires avec un temps d'hospitalisation réduit.

Un bras central porte l'optique qui permet de voir la zone à opérer relié à un système en 3D de haute qualité vidéo. Elle permet une vision plus fine et plus précise de la zone d'intervention. Les 3 bras latéraux porte les instruments. Les instruments sont commandés par le chirurgien qui est assis à une console à distance, en général à quelques pas de la table d'intervention. Aux mains et pieds du chirurgien un ensemble de commande permettent de prendre le contrôle de la camera, actionner la coagulation, régler la netteté, repositionner des instruments statiques et se repositionner dans une situation plus confortable. Le robot est placé au-dessus du patient. Les mouvements du chirurgien sont reproduits après élimination de tous les éléments parasites et peuvent être réalisés avec 7° de liberté à comparer aux 4° de liberté de la cœlioscopie traditionnelle, permettant par exemple de réaliser des sutures dans des positions inaccessibles auparavant. Ainsi, grâce à la vision 3 D et aux instruments chirurgicaux extrêmement précis et d'une plus grande mobilité, on peut réaliser :

- des opérations plus complexes,
- repousser les limites techniques,
- augmenter la sécurité [49].

4.7.1 Fonctionnement des instruments EndoWrist

Ceux-ci forment la partie terminale du système de télémanipulateur et sont probablement la contribution la plus imaginative de l'ensemble du système da Vinci à la chirurgie. Ils représentent également la partie la plus importante du portefeuille de brevets d'Intuitive Surgical, avec plus de 200 brevets associés.

EndoWrist comprend une gamme d'instruments avec divers mécanismes, ces pinces ont été conçues pour permettre au système cinématique de fonctionner dans le corps. Ce concept ingénieux mais sophistiqué offre une dextérité exceptionnelle qui est irréalisable avec une instrumentation conventionnelle, les trois DDL plus l'actionnement d'ouverture-fermeture des mâchoires sont actionnés par des mécanismes à traction.

Les instruments EndoWrist sont disponibles avec des diamètres de sortie de 8 et 5 mm, une longueur totale de 57 cm et une longueur utile jusqu'à 38 cm. Les instruments de huit millimètres ont des joints de cardan tandis que ceux de 5 mm ont une structure articulée plus sophistiquée formée de quatre joints en série

Les instruments de 5 mm sont les plus couramment utilisés pour la chirurgie robotique Trans orale en raison de l'espace limité disponible dans la cavité oropharyngée [50].



Figure 4.9 Les pinces EndoWrist

Endoscopes 3D

Celles-ci sont constituées de deux endoscopes de type Hopkin juxtaposés à un canal lumineux dans un seul tube. Chaque endoscope est espacé de 6 mm l'un de l'autre, ce qui permet la véritable disparité rétinienne requise pour la vision stéréoscopique. Deux diamètres extérieurs sont disponibles: 8,5 et 12 mm [50].

Le chirurgien assistant fait fonctionner le chariot du patient, échange les instruments EndoWrist et les endoscopes, et effectue d'autres activités côté patient.



Figure 4.10 l'Endoscopes 3D

4.7.2 La connexion entre les composants

4.7.2.1 Les connexions d'alimentation

Les cordons d'alimentation CA de la console du chirurgien, du chariot patient, du chariot de vision et de l'illuminateur sont connectés aux prises murales. Des circuits CA dédiés uniques sont nécessaires pour la console du chirurgien et le chariot du patient, tandis que le chariot de vision nécessite deux circuits CA dédiés. La console du chirurgien et le chariot patient doivent toujours rester branchés même lorsqu'ils ne sont pas utilisés pour garantir que la batterie de secours reste complètement chargée. Un ventilateur de refroidissement sur le chariot patient fonctionne en continu lorsque le chariot patient est branché. Aucune rallonge ne doit être utilisée avec des composants du système [51].

4.7.2.2 Les connexions de système

Un système comme da Vinci S est livré avec trois câbles principaux. De gauche à droite, les câbles bleus, rouges et verts, classés du plus grand au plus petit diamètre. Les trois câbles peuvent être distingués par leur diamètre et leur couleur. Sinon, les trois doivent apparaître identiques aux deux extrémités. La longueur de chacun de ces câbles est de 50 pieds (15 mètres). Le câble rouge est le câble le plus important qui transfère tous les signaux de données, audio et vidéo de la console du chirurgien au chariot patient. Une fois que le système est connecté et sous tension, le câble système ne doit pas être débranché tant que le système n'est pas complètement éteint. L'agencement des câbles doit être tel qu'ils soient hors du chemin de circulation chirurgicale. Ceci est important pour éviter d'endommager les câbles ou de créer un obstacle ou un danger. L'emplacement des câbles ne doit pas interférer entre le mouvement facile du chariot patient à partir de ses emplacements préopératoire et peropératoire [51].

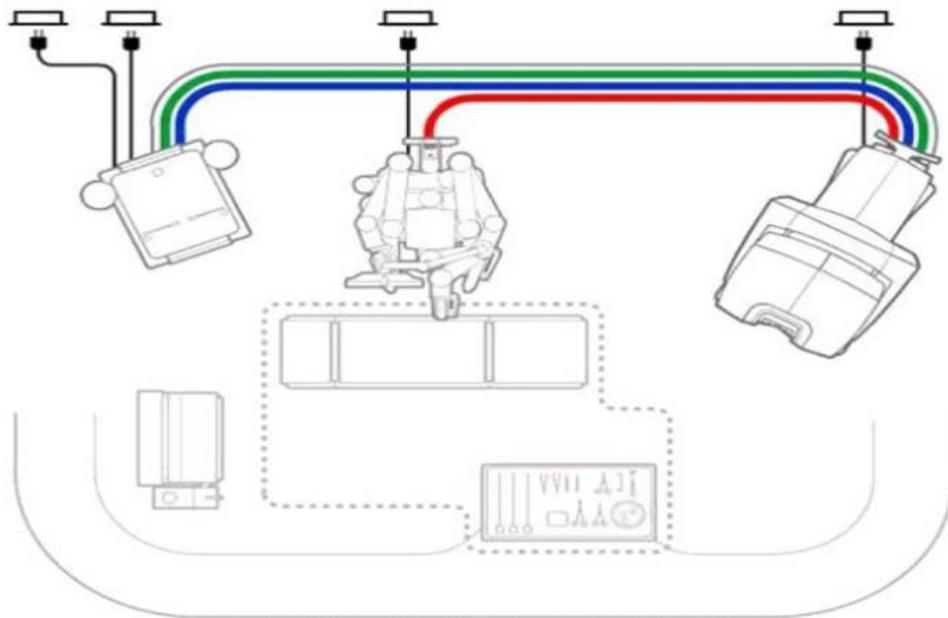


Figure 4.11 Plan d'implantation des câbles système et des câbles d'alimentation.

Pour connecter le câble, le capuchon de protection du câble est retiré. Le point rouge sur le connecteur du câble doit être associé au point rouge sur la prise correspondante, puis inséré dans la prise. Un clic audible se fait entendre lorsque le câble est correctement connecté. Tirez doucement sur le connecteur pour vérifier que le câble est bien inséré. Pour une longue durée de vie du câble, les capuchons métalliques de protection attachés à chaque câble du système doivent être installés aux extrémités du câble à tout moment lorsqu'ils ne sont pas connectés au système [51].



La console de chirurgien

Figure 4.12 La méthode correct de brancher les câbles.

4.8 Analyse médico-économique

Les avantages et les inconvénients de robot Da Vinci sont similaires à celle de robotique chirurgicale, le grand obstacle c'est le prix de système da Vinci qui est de l'ordre de 2 millions d'euros et le coût de maintenance d'environ 150 000 € par an. Le coût des consommables est de l'ordre de 1 900 euros par intervention. Selon les données disponibles, les économies attribuables à la réduction des durées de séjour et la simplification des suites opératoires sont en général surpassées par les surcoûts imputables au robot.

D'après une analyse de l'agence canadienne CADTH, une augmentation du nombre d'interventions par an permettrait de diminuer le coût marginal par patient et rendrait les interventions plus efficaces ; toutefois, l'agence estime qu'une intervention robotique a plus de trois chances sur quatre d'être plus coûteuse qu'une intervention laparoscopique.

Dans une étude réalisée par l'URC-éco fondée sur des résultats observés à l'AP-HP, la différence assez importante entre les durées d'hospitalisation (4 jours avec robot versus 6 sans robots), aboutit à un coût total de la prostatectomie assistée par robot égal à celui réalisé sans robot, pour un nombre de 450 interventions par an [52].

4.9 La compatibilité cinématique

Afin d'améliorer les conditions d'opérations chirurgicales dites mini invasives (comme la précision d'opération et le confort du chirurgien), des robots chirurgicaux ont vu le jour. Cette étude s'intéresse à l'un d'entre eux: les robots Da Vinci [53].



Figure 4.13 Robot Da Vinci lors de la phase de vie (en opération)

Chirurgien peut atteindre sa cible grâce à des outils longs et fins traversant le patient grâce à une incision de l'ordre du centimètre.

Le système étudié est composé de deux sous-systèmes principaux :

- l'ensemble (console de commande + bras maîtres) permet au chirurgien de visualiser et de commander les mouvements des outils adéquats à l'intérieur de patient via une caméra haute définition dont l'image est retransmise par l'intermédiaire d'écrans. Le chirurgien commande les mouvements des outils grâce à deux bras maîtres dont les extrémités sont maintenues dans chaque main.

- les bras esclaves reçoivent les consignes issues du chirurgien par l'intermédiaire des bras maîtres .il y a au total 3 bras esclaves: deux manipulent chacun un outil, le troisième manipule une caméra [53].

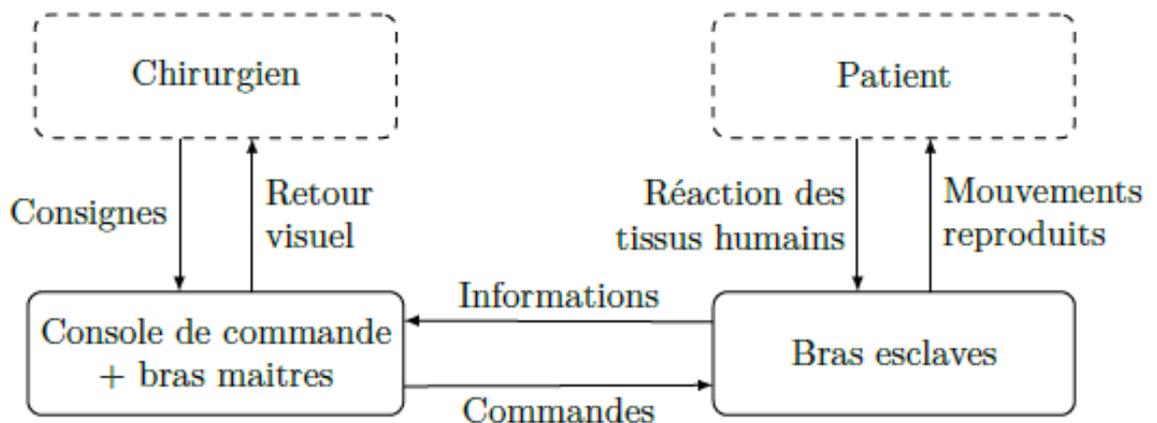


Figure 4.14 Interactions induites par le système

Cette structure assure une excellente répétabilité des mouvements retranscrits par le robot et les reproduit avec une grande précision .Cette performance de précision dépend de plusieurs facteurs dont deux principaux :

- les erreurs dues à la mauvaise retranscription de la consigne du chirurgien (incertitudes liées à la mesure des positions articulaires du bras maître);
- les erreurs dues à l'asservissement en position de l'outil.

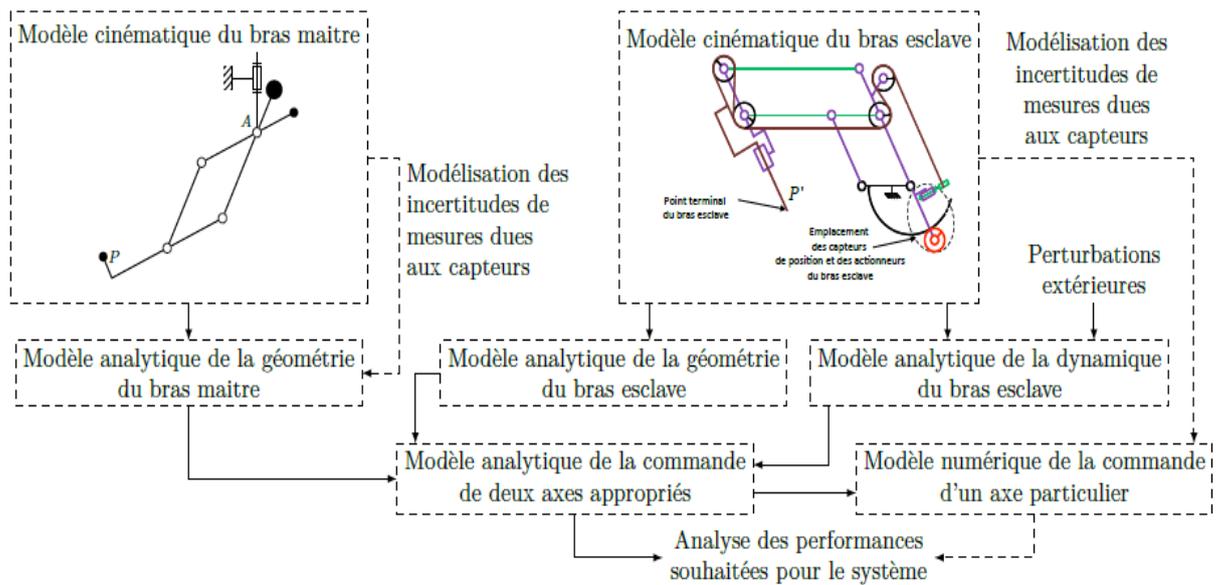


Figure 4.15 Modèle multi-physique du robot chirurgical

Pour manipuler le robot, le chirurgien utilise le bras maître en contrôlant la position du point d'accroche, noté P . Le bras esclave est asservi en position sur les consignes envoyées par le bras maître. Le point terminal du bras esclave, noté P' , représente l'outil chirurgical (hors étude). La stratégie de commande mise en place doit assurer un déplacement du point P' idéalement identique au déplacement du point P [53].

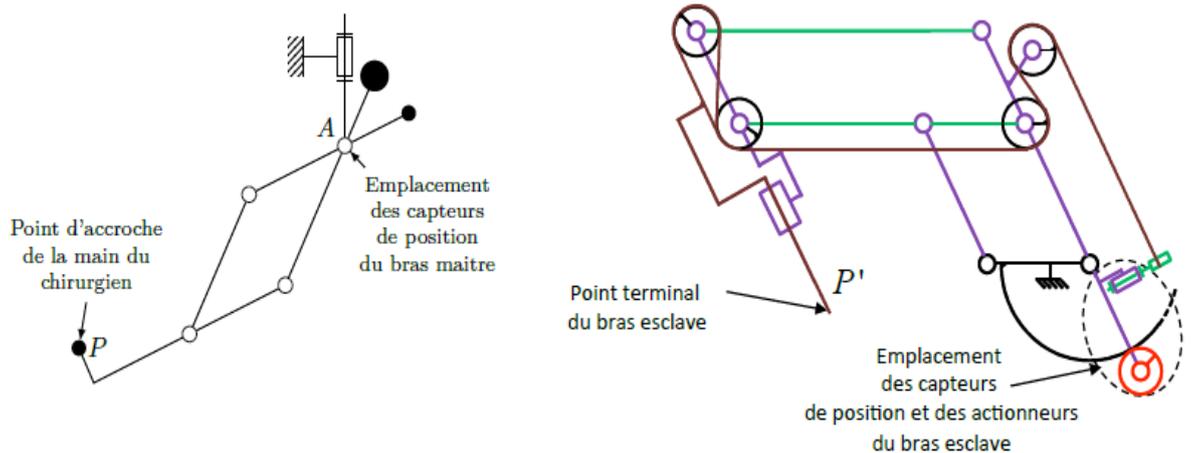


Figure 4.16 Schéma cinématique simplifié du bras maître et du bras esclave

Le bras esclave possède une structure très différente du bras maître pour des raisons d'accessibilité au corps du patient. Cette structure est fondée sur l'utilisation de deux parallélogrammes déformables. Ainsi, le bras possède trois degrés de liberté pour permettre à

l'outil de balayer un certain volume dans le corps du patient. Les trois axes sont asservis (sans compter les axes dédiés à l'outil lui-même, au nombre de quatre, ces axes sont hors étude).

Les déplacements des points P et P', situés aux extrémités des bras maitres et esclaves respectivement, sont appelés variables opérationnelles. Elles sont paramétrables suivant le système de coordonnées cartésiennes. La mesure de ces déplacements n'est pas directe car les capteurs de position ne sont pas situés sur les extrémités des bras, mais en amont sur certaines articulations de chacun des bras. Les grandeurs mesurées sont donc des angles: elles sont appelées variables articulaires [53].

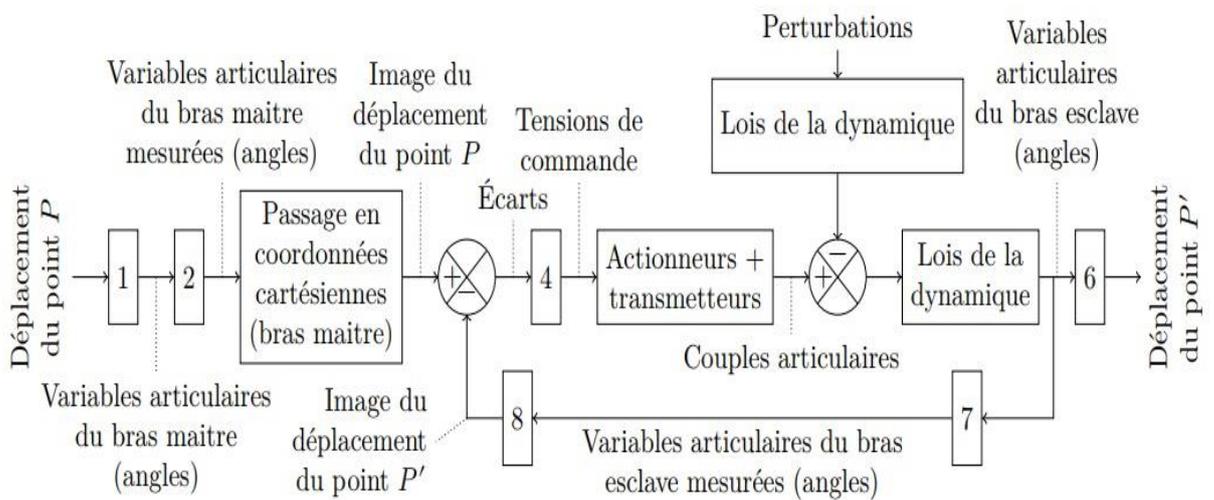


Figure 4.17 Schéma bloc fonctionnel d'asservissement simplifié du déplacement du point terminal du bras esclave sur le point d'accroche de la main du chirurgien

Q 1. D'après le descriptif du système, compléter dans un tableau les numéros des blocs associant aux éléments suivant :

- Passage en coordonnées cartésiennes (pour le bras esclave)
- Correcteurs
- Modèle géométrique du bras maitre
- Capteurs de position du bras esclave
- Capteurs de position du bras maitre

Solution

Entité	Numéro
Passage en coordonnées cartésiennes (pour le bras esclave)	8
Correcteurs	4
Modèle géométrique du bras maitre	1
Capteurs de position du bras esclave	7
Capteurs de position du bras maitre	2

NB:6: Modelé géométrique du bras esclave

4.9.1 Etude du brase maitre

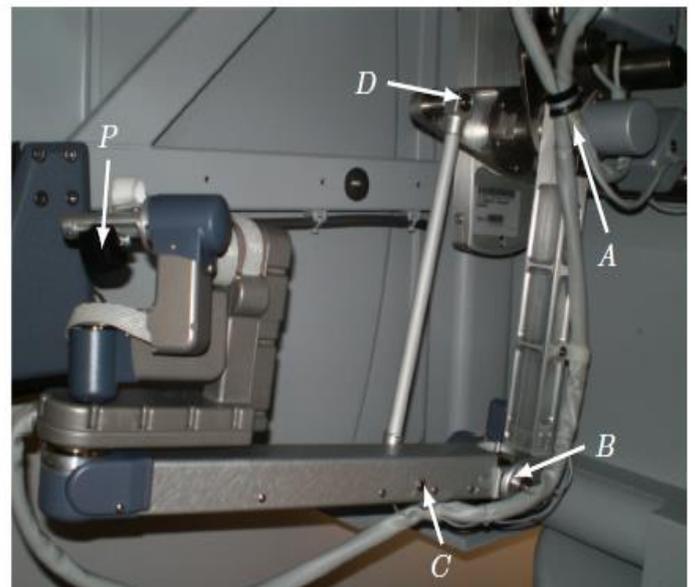
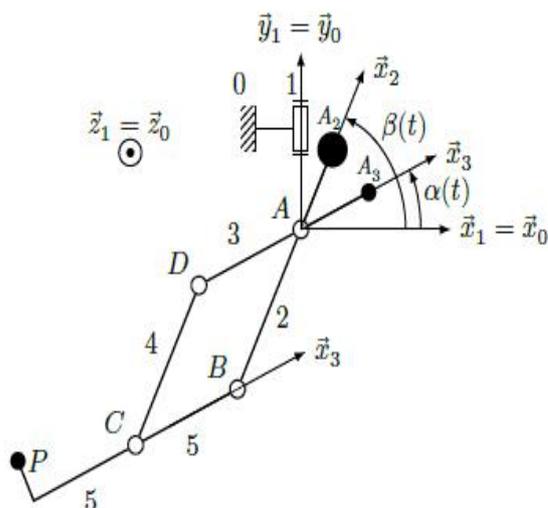


Figure 4.18 Schéma cinématique partiel modélisant le bras maitre et photographie du bras maitre

Le bras maître offre des mouvements dans l'espace selon 7 axes

- 3 translations du point P par rapport au repère $R_0(A, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$
- 3 rotations (non étudiées) réalisées via un mécanisme permettant d'orienter l'extrémité de l'outil chirurgical dans l'espace
- 1 mouvement de serrage (non étudié) des outils munis d'un pince permettant de saisir les tissus humains

Dans cette étude, le point P représente le point d'accroche de la main du chirurgien sur le bras maître. Les 3 translations imposées par le chirurgien sont obtenues via une combinaison de mouvements de rotation autour de différents axes:

- _ Une rotation d'axe (A, \vec{y}_1) (rotation de 1/0);
- _ Deux rotations d'axe (A, \vec{z}_1) rotation de 2/1 et de 3/1).

Le constructeur a choisi d'utiliser une structure particulière pour les deux dernières rotations. Afin de soulager le chirurgien lors de l'opération, des contrepoids solidaires des éléments 2 et 3 assurent l'équilibre stable du bras maître lorsqu'il n'est soumis qu'à son propre poids outre les actions des liaisons.

Pour toute la suite du sujet le mouvement de rotation verticale (entre 0 et 1) n'est pas étudié

.Ainsi, on impose $\vec{x}_1 = \vec{x}_0, \vec{y}_1 = \vec{y}_0$ et $\vec{z}_1 = \vec{z}_0$. On adopte une modélisation plane dans le plan $(A, \vec{x}_0, \vec{y}_0)$. [53]

4.9.1.1 Paramétrage et hypothèses

Le champ de pesanteur est noté $\vec{g} = -g\vec{y}_0$ avec $g = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.

Les solides sont indéformables.

Solide	Caractéristiques géométriques	Caractéristiques massiques	Situation géométrique/commentaires
2	$\overline{BA} = l_2 \vec{x}_2$ $l_2 = 500 \text{ mm}$ $\overline{BG_2} = \frac{l_2}{2} \vec{x}_2$	masse : $m_2 = 2,5 \text{ kg}$ centre de gravité : G_2	repère attaché : $R_2(A, \vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_0)$ paramètres d'orientation : $\beta(t) = (\vec{x}_0, \vec{x}_2) = (\vec{y}_0, \vec{y}_2)$
Contrepoids solidaire de 2	$\overline{AA_2} = e \vec{x}_2$ $e = 300 \text{ mm}$	masse : M_2 centre de gravité : A_2	
3	$\overline{DA} = l_3 \vec{x}_3$ $l_3 = 300 \text{ mm}$ $\overline{DG_3} = \frac{l_3}{2} \vec{x}_3$	masse : $m_3 = 3 \text{ kg}$ centre de gravité : G_3	repère attaché : $R_3(A, \vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z}_0)$ paramètres d'orientation : $\alpha(t) = (\vec{x}_0, \vec{x}_3) = (\vec{y}_0, \vec{y}_3)$
Contrepoids solidaire de 3	$\overline{AA_3} = e \vec{x}_3$	masse : M_3 centre de gravité : A_3	
4	$\overline{CD} = l_2 \vec{x}_2$ $\overline{CG_4} = \frac{l_2}{2} \vec{x}_2$	masse : $m_4 = 1,5 \text{ kg}$ centre de gravité : G_4	
5	$\overline{CB} = l_3 \vec{x}_3$ $\overline{BG_5} = -\frac{3l_3}{2} \vec{x}_3$ $\overline{BP} = -2l_3 \vec{x}_3 + h \vec{y}_3$ $h = 150 \text{ mm}$	masse : $m_5 = 2,5 \text{ kg}$ centre de gravité : G_5	ces caractéristiques prennent en compte le système d'orientation de l'outil non représenté

Tableau 4.19 Caractéristiques et situation géométriques des parties de bras esclave

4.9.1.2 Justification de la structure

La manipulation du bras maitre doit s'effectuer de manière à minimiser la fatigue du chirurgien. Pour cela, un des objectifs est donc de minimiser les efforts musculaires pour le manipuler. Au repos, la structure cinématique retenue pour le bras maitre lui permet de rester dans une position d'équilibre stable quelle que soit sa position .Cette propriété intéressante est obtenue grâce à l'utilisation des deux contrepoids outre les actions des liaisons, seul le poids s'applique à l'ensemble des pièces du bras maitre. Le centre de gravité de l'ensemble (2, 3, 4, 5, contrepoids solidaire de 2, contrepoids solidaire de 3) est noté G. Le critère de manipulation avec minimum d'effort musculaire se traduit alors la condition suivant:

$$\overline{AG} \cdot \vec{x}_0 = 0. \quad [53].$$

Q 2. En s'appuyant sur la Figure 4.18, montré que la condition énoncée ci-dessus peut se mettre sous la forme suivante

$$K_{M3} \cos \alpha(t) + K_{M2} \cos \beta(t) = 0$$

Avec k_{M2} une constante à expliciter en fonction de $M_2, e, l_2, m_2, m_4,$ et m_5

k_{M3} . Une constante à expliciter en fonction de $M_3, e, l_3, m_3, m_4, \text{ et } m_5$

Solution

On isole l'ensemble $S = \{2,3,4,5\}$ et on effectue un bilan d'actions mécaniques extérieures

Actions de liaison:

$$t_{1 \rightarrow 3} = \begin{vmatrix} X_{13} & L_{13} \\ Y_{13} & M_{13} \\ Z_{13} & 0 \end{vmatrix} A. x \rightarrow_0. y \rightarrow_0. z \rightarrow_0 \quad t_{1 \rightarrow 2} = \begin{vmatrix} X_{12} & L_{12} \\ Y_{12} & M_{12} \\ Z_{12} & 0 \end{vmatrix} A. x \rightarrow_0. y \rightarrow_0. z \rightarrow_0$$

Actions de la pesanteur :

$$\vec{p}_2 \text{ en } G_2; \vec{AG}_2 = -\frac{l_2}{2} \vec{x}_2; m_2$$

$$\vec{p}_{c2} \text{ en } A_2; \vec{AA}_2 = e \vec{x}_2; M_2$$

$$\vec{p}_3 \text{ en } G_3; \vec{AG}_3 = -\frac{l_3}{2} \vec{x}_3; m_3$$

$$\vec{p}_{c3} \text{ en } A_3; \vec{AA}_3 = e \vec{x}_3; M_3$$

$$\vec{p}_4 \text{ en } G_4; \vec{AG}_4 = -l_3 \vec{x}_3 - \frac{l_2}{2} \vec{x}_2; m_4$$

$$\vec{p}_5 \text{ en } G_5; \vec{AG}_5 = -l_2 \vec{x}_2 - \frac{3l_3}{2} \vec{x}_3; m_5$$

On applique le théorème du moment statique en A, suivant la direction \vec{Z}_0 :

$$\vec{AG}_2 \wedge \vec{p}_2 + \vec{AA}_2 \wedge \vec{p}_{c2} + \vec{AG}_3 \wedge \vec{p}_3 + \vec{AA}_3 \wedge \vec{p}_{c3} + \vec{AG}_4 \wedge \vec{p}_4 + \vec{AG}_5 \wedge \vec{p}_5$$

$$\left[\left(\frac{l_2}{2} \vec{x}_2 \right) \wedge (m_2 \vec{g} \vec{y}_0) + (e \vec{x}_2) \wedge (M_2 \vec{g} \vec{y}_0) + (e \vec{x}_2) \wedge (-M_2 \vec{g} \vec{y}_5) + \left(\frac{l_3}{2} \vec{x}_3 \right) \wedge (m_3 \vec{g} \vec{y}_0) + (e \vec{x}_3) \wedge (-M_3 \vec{g} \vec{y}_0) + \left(-l_3 \frac{l_2}{2} \vec{x}_3 \right) \wedge (M_4 \vec{g} \vec{y}_5) + \left(-l_2 \vec{x}_2 - \frac{3l_3}{2} \vec{x}_3 \right) \wedge (-m_5 \vec{g} \vec{y}_0) \right]. \vec{z}_0 = 0$$

$$\frac{I_2}{2} m_2 g \cos \beta - e M_2 g \cos \beta + \frac{I_3}{2} m_3 g \cos \alpha - e M_3 g \cos \alpha + \frac{I_2}{2} m_4 g \cos \beta + I_2 m_5 g \cos \beta + \frac{3I_3}{2} m_5 g \cos \alpha = 0$$

$$\frac{I_2}{2} m_2 g \cos \beta \left[I_3 \left(\frac{m_3}{2} + m_4 + \frac{3}{2} m_5 \right) - e M_3 \right] \cos \alpha + \left[I_2 \left(\frac{m_2}{2} + \frac{m_4}{2} + m_5 \right) - e M_2 \right] \cos \beta = 0$$

$$k_{M_3} \cos \alpha + k_{M_2} \cos \beta = 0 \text{ avec } \begin{cases} I_3 \left(\frac{m_3}{2} + m_4 + \frac{3}{2} m_5 \right) - e M_3 \\ I_2 \left(\frac{m_2}{2} + \frac{m_4}{2} + m_5 \right) - e M_2 \end{cases}$$

$\vec{x}_0 = 0$ N.B: on peut aussi positionner le barycentre Gde l'ensemble s = (2.3.4.5) de telle manière que \overrightarrow{AG} .

$$(m_2 \overrightarrow{AG_2} + (M_2 \overrightarrow{AA_2} + m_3 \overrightarrow{AG_3} + M_3 \overrightarrow{AA_3} + m_4 \overrightarrow{AG_4} + m_5 \overrightarrow{AG_5})) \cdot \vec{x}_0 = 0$$

On : obtient alors la mémé résultat [53].

Q 3. Afin d'assurer l'équilibre pour toutes les valeurs de $\alpha(t)$ et $\beta(t)$, donner les expressions de M_2 et M_3 , puis les calculer numériquement [53].

Solution

$$k_{M_3} = 0 \text{ et } k_{M_2} = 0 \left| \begin{array}{l} I_3 \left(\frac{m_3}{2} + m_4 + \frac{3}{2} m_5 \right) - e M_3 = 0 \\ I_2 \left(\frac{m_2}{2} + \frac{m_4}{2} + m_5 \right) - e M_2 = 0 \end{array} \right|$$

$$\text{Alors } \left| \begin{array}{l} \frac{I_3}{e} \left(\frac{m_3}{2} + m_4 + \frac{3}{2} m_5 \right) = M_3 \\ \frac{I_2}{e} \left(\frac{m_2}{2} + \frac{m_4}{2} + m_5 \right) = M_2 \end{array} \right| \quad \text{A.N : } M_3 = 6.75 \text{ Kg et } M_2 = 7.5 \text{ Kg [53].}$$

4.10 Les erreurs de robot leur cause et leur effet

Une étude publiée dans le Journal of Healthcare Quality évoquait une sous-déclaration des effets indésirables liés à l'utilisation du robot en salle d'opération, aux États-Unis. Auparavant, une vingtaine de décès avaient été déplorés outre-Atlantique, pour les mêmes raisons, ce qui avait déclenché une enquête de la FDA américaine, dans ce contexte, l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé a réalisé une enquête auprès de 69

établissements français équipés d'au moins un robot Da Vinci*(le plus fréquemment utilisé dans les blocs), entre le 5 et le 15 novembre 2013. Elle a obtenu les réponses de 39 d'entre eux (57 %), dont plus de la moitié ont déclaré ne jamais avoir rencontré de problème avec ce robot qui est utilisé huit fois sur dix lors d'interventions en urologie (il peut également servir en gynécologie et en chirurgie digestive) [54].

Au total, une trentaine d'événements indésirables graves ont été rapportés sur plus de 17 000 interventions réalisées avec le robot Da Vinci dans l'Hexagone. Les principaux sont des hémorragies (40 %), des perforations d'organe (32 %) et des brûlures internes (23 %). Les autres problèmes décrits sont par exemple des étirements de racines nerveuses, des lésions musculaires et des œdèmes... L'enquête montre que 45 % des incidents graves sont dus à un manque d'expérience et de formation du chirurgien. 20 % découlent d'un dysfonctionnement du robot ou d'un instrument, 20 % de l'état du patient et 15 % de la limite de la technologie de l'appareil [54].

Le robot Da Vinci réalise dans ces premiers douze ans plus d'un million d'interventions chirurgicales en tous genres. Plus de mille accidents liés à ce robot ont été signalés à FDA en douze ans. En majorité, heureusement, les patients n'ont souffert que de blessures plus ou moins graves, mais dans 71 cas de complications, le patient a trouvé la mort. Mais ce n'est que la partie émergée de l'iceberg puisque les chercheurs qui ont réalisé cette étude expliquent qu'il existe d'autres cas d'incidents lors de procédures chirurgicales qui n'ont jamais été déclarées. Une étude de 2010 a montré que plusieurs médecins, témoignant sous l'anonymat, avaient déjà subi plusieurs avaries techniques et autres défaillances médicales en utilisant Da Vinci mais n'ont jamais déclaré ces problèmes [55].

On est effaré de voir que les médecins faisaient autant « confiance » à ces robots alors même qu'ils font preuve de certaines défaillances. Bien sûr, on se doute qu'il y aura toujours des erreurs, aussi bien pour les robots que pour les chirurgiens. C'est pour cela qu'on considère qu'il est très important que les accidents lors de chirurgies assistées par des robots soient automatiquement signalés pour éviter que des drames ne se produisent [55].

Toutes ces erreurs affaiblissent la relation entre les patients et la technologie moderne, leur impact affectera inévitablement la vitesse de développement des systèmes médicaux robotiques, en particulier chirurgicaux. Et comme nous l'avons indiqué ici et précédemment (le troisième chapitre), le manque d'expérience des utilisateurs des systèmes robotiques

chirurgicaux et médicaux est parmi les causes principales des erreurs à des mauvaises répercussions sur la santé du patient, qui conduit parfois à la mort. Alors l'utilisation des systèmes de simulation pendant des longues heures et dans diverses spécialités chirurgicales est essentielle pour réduire le nombre d'accidents chirurgicaux du robot.

4.10.1 Erreurs de contrôle et Les erreurs de coordination cinétique

Les erreurs de contrôle du robot Da Vinci peuvent s'expliquer par plusieurs raisons, notamment:

- 1-Le manque de bonne utilisation des moyens d'entraînement des bras, qui à leur tour effectuent toutes les étapes du processus manuellement.
- 2-Les plugins du robot ont disparu car ils n'étaient pas configurés lors de l'installation.
- 3-Manque de bonne concentration de la part des médecins contrôlant le robot pendant l'opération.
- 4-Chevauchement des phases pendant la procédure.
- 5-Défaut de définir les coordonnées auxquelles accéder dans le corps du patient.
- 6- Le manque de bonne connexion entre les différentes parties du robot..

Toutes ces raisons nuisent au manque de coordination dans le robot, mais cela se produit rarement dans les chirurgies officielles, car le personnel médico-chirurgical simule le robot avant d'effectuer l'opération, et cela pour éviter tous les problèmes pouvant survenir.

4.11 La simulation

4.11.1 Définition

Une simulation est une imitation approximative du fonctionnement d'un processus ou d'un système; qui représente son fonctionnement dans le temps [56]. Le simulateur robotique est un simulateur utilisé pour créer une application pour un robot physique sans dépendre de la machine réelle [57].

4.11.2 Les avantages du simulateur chirurgie robotique

La simulation sous toutes ses formes est une partie importante de l'expérience d'apprentissage de la technologie chirurgicale. En fournissant une recreation contrôlée des étapes critiques du contrôle des instruments, le grand avantage c'est que la simulation permet aux chirurgiens de mettre en pratique leurs compétences dans un environnement non clinique. D'autres avantages majeurs de la simulation incluent la capacité de:

- Augmenter la familiarité avec le système da Vinci : Toute nouvelle technologie chirurgicale s'accompagne d'une courbe d'apprentissage. Le simulateur de compétences permet aux chirurgiens de s'entraîner sur le système da Vinci autant que nécessaire pour se familiariser avec les nouvelles techniques.
- Offrez plus d'occasions d'apprentissage : La simulation aide à maximiser leur temps de pratique et garantit qu'ils obtiennent autant d'exposition technique que possible.
- Mesurer les progrès : Il s'agit d'une plateforme quantitative et mesurée conçue pour permettre aux chirurgiens de voir comment ils ont fait un exercice et de suivre les progrès au fil du temps.
- Échauffement avant la chirurgie : Le simulateur peut être utilisé immédiatement avant une chirurgie pour permettre aux chirurgiens de se familiariser à nouveau avec la console [58].

4.11.3 La simulation par robot Da Vinci

Il existe plusieurs simulateurs de robotique chirurgicale selon chaque robot et ça technologie, le robot Da Vinci a des systèmes développé comme SimNow et Mimic dV-Trainer, aussi des simulateurs de l'usages réel de robot comme pelvi-trainer est utilisé.

On va prendre une simulation de l'université de Paris et l'analyse.

4.11.3.1 La méthode

La simulation n'est pas utilisée dans une orientation strictement formative mais davantage comme moyen d'accompagner aux mieux les professionnels dans leur organisation dans le but d'améliorer la qualité des soins, et principalement la gestion des risques. Il ne s'agit pas de séances de simulation pour entraîner le chirurgien à la chirurgie robotique, préalable indispensable et obligatoire à la pratique de cette nouvelle technologie. Il est précisé que cette formation et les moyens de se former sont délivrés par l'industriel. Il est précisé que dans nombre de cas, l'architecture est construite en vue d'une activité prédéfinie [59].

4.11.3.2 Les objectifs

Les scénarii ont été écrits par un formateur en simulation avec pour objectif d'anticiper les contraintes ergonomiques du robot lors de situations de crises, mais également d'adapter des procédures et protocoles déjà existants mais adaptés à d'autres chirurgies et dans un autre environnement [59].

4.11.3.3 Les scénarii

La gestion des urgences vitales (médicales et laparoconversions) est compliquée par les contraintes ergonomiques spécifiques du robot ce qui est préjudiciable pour la sécurité des patients. Les scénarii ont été définis en tenant compte de l'expérience et des préoccupations des professionnels de santé en se centrant sur des « exercices à base de problème ». Ainsi, trois scénarii ont été construits autour de situations d'urgence pouvant potentiellement se produire, l'intérêt étant de reproduire des histoires médicales d'urgence devenues encore plus spécifiques du fait des particularités de la chirurgie robotique pelvienne :

- La laparoconversion en urgence vitale pour hémorragie,
- L'arrêt cardio-respiratoire peropératoire,
- Le retrait d'une pince bloquée.

Six heures de simulation dans la salle d'opération dédiée à cette chirurgie ont été organisées avec les référents en chirurgie robotique de Gustave Roussy.

Un mannequin bas fidélité Gaumard hybridé avec un simulateur procédural de type « pelvi-trainer » permettant l'usage réel du robot et un simulateur de paramètres vitaux Prosim 8 ont été utilisés.

Le robot Da Vinci Xi d'Intuitive Surgical a été déployé dans les conditions ergonomiques et matérielles reproduisant celles d'un patient opéré d'une chirurgie robotique pelvienne [59].



Figure 4.20 la simulation par mannequin

4.11.3.4 Les résultats

Pour chacun des scénarii, des défauts de procédures ont pu être constatés et des mesures correctives immédiates ont été mises en place.

a. La laparo-conversion en urgence vitale pour hémorragie

Les bras du robot ont occasionné une gêne importante rendant difficile d'accès le site opératoire. De plus, il a été constaté l'absence d'écarteur en salle d'opération. Un écarteur chirurgical a été rajouté dans la boîte de laparoconversion. La position des bras du robot a pu être modifiée en conséquence.

b. L'arrêt cardio respiratoire peropératoire

La pose des électrodes du défibrillateur est rendu très difficile du fait des bras du robot. L'absence de coordination entre le retrait du robot et le début de la réanimation a entraîné un temps de No-Flow de 70 secondes.

c. Le retrait d'une pince bloquée

Aucune procédure n'existait pour le déblocage du robot en cas de panne électrique, ou de panne des écrans ; la localisation du kit de déverrouillage manuel était inconnue et son utilisation ne donnait pas lieu à une procédure [59].

4.11.3.5 Discussion

La formation des internes de chirurgie au retrait urgent du robot a été affirmée comme étant une nécessité.

Plusieurs entraînements ont permis de réduire de manière importante le No-Flow. La mise en place de mesures correctrices a permis d'améliorer la coordination entre dé-docking et réanimation et ainsi de réduire ce temps à 20 secondes lors d'un deuxième scénario.

Un kit de déverrouillage a pu être localisé, la procédure d'utilisation a pu être validée puis diffusée. Sa manipulation a pu être répétée en situation non urgente par les chirurgiens et infirmières [59].

Ce réalisme de simulation chirurgicale robotisée permet le contrôle de la console de chirurgie et les infirmières dans la salle d'opération de maîtriser les situations critiques avec faible coût.

La répétition des sessions permet le staff chirurgical d'affronter des nouvelles situations dangereuses capables d'apparaître dans la chirurgie officielle.

4.12 La maintenance

Les propriétaires de robots doivent s'assurer qu'ils utilisent de bonnes pratiques de maintenance pour éviter l'accumulation de poussière, car cela peut bloquer les capteurs ou bloquer les courroies, provoquant une surcharge.

En plus, les directeurs d'usine doivent s'assurer qu'ils ont mis en place une stratégie de maintenance. Les robots peuvent fonctionner de manière sous-optimale en cas d'usure, ce qui

peut être détecté par des capteurs. L'entretien et la vérification proactifs de l'état de l'équipement réduisent le risque de dysfonctionnement.

À mesure que les robots progressent, l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique leur permettent de prendre des décisions indépendantes. La connectivité via Bluetooth ou Internet signifie que les robots peuvent communiquer des informations de diagnostic, alertant le personnel de maintenance lorsque les performances sont sous-optimales.

À l'avenir, au lieu qu'un technicien découvre un défaut et commande une pièce de rechange, les robots pourraient diagnostiquer eux-mêmes un dysfonctionnement avant qu'un dommage ne soit causé et commander leur propre pièce de rechange ou alerter le personnel pour qu'il contacte un fournisseur fiable.

Ainsi, au lieu de jouer au jeu du blâme de dysfonctionnement du robot, les fabricants doivent gérer les risques en entretenant de manière proactive l'équipement et en formant bien le personnel [60].

Intuitive surgery offre un système d'assistance pour aider les utilisateurs de robot Da Vinci d'obtenir des conseils en temps réel sur les problèmes techniques par accès téléphonique avec des ingénieurs ayant en moyenne plus de 10 ans d'expérience pratique de ce système. Grâce à l'accès à distance, ils peuvent rapidement diagnostiquer et, dans certains cas, résoudre les problèmes sans arrêter votre système. Il s'appelle Accès et surveillance sur site. Grâce à cette connectivité sécurisée, les techniciens peuvent résoudre les problèmes même pendant la chirurgie [61].

4.13 Le futur de robot Da Vinci

La plupart des systèmes de santé s'efforcent d'améliorer les résultats, de réduire le coût total des soins et d'améliorer l'expérience des patients et des équipes de soins. Mais chez Intuitive, ils proposent déjà des solutions qui améliorent les soins [62],

ils améliorent continuellement les produits actuels tout en travaillant avec des médecins pour créer de nouveaux produits mini-invasifs. Comme on a cité précédemment que le système chirurgical da Vinci SP permet aux chirurgiens urologues et Trans oraux aux États-Unis de pénétrer dans le corps par une seule petite incision. Et, avec la récente autorisation de la FDA de leur système Ion pour les biopsies pulmonaires périphériques mini-invasives, ils étendent leur objectif [63].

4.14 Conclusion

Le robot Da Vinci a fait un bond en avant dans le domaine de la chirurgie robotique en raison de ses nombreux avantages qui lui ont permis de maîtriser ce domaine médical.

Malgré son coût élevé et le coût de l'entretien périodique, de nombreuses cliniques et hôpitaux l'achètent encore. Le principal problème de ce robot et de nombreux robots similaires réside dans les erreurs de contrôle causées par le manque d'expérience de ses utilisateurs et également par le manque d'efficacité des programmes de simulation utilisés. Pour cela, il est impératif pour l'entreprise qui le fabrique d'améliorer les moyens de formation des utilisateurs du programme et de développer de nouveaux dispositifs moins complexes et aussi de développer de véritables programmes de simulation pour éviter tout problème à l'avenir.

Conclusion général

Nous avons vu que les robots représentent un pilier des technologies nouvelles et futures, car ils ont été intégrés dans des domaines sensibles tels que la médecine, l'armée et l'industrie. Tous sont des domaines sensibles qui contrôlent et influencent la vie quotidienne des gens.

Parmi ces domaines se trouve le domaine de la chirurgie médicale qui est principalement basé sur la sécurité de la vie des personnes. La précision, la stérilisation et le confort du patient font partie des bases à prendre en compte lors des opérations chirurgicales pour cela. Ce domaine a connu plusieurs robots et systèmes qui ont été développés au fil du temps et avec le développement de la technologie pour résoudre tous les problèmes et surmonter tous les obstacles dans ce domaine pour que l'avenir soit dans la plupart des domaines de la chirurgie dépendant des robots.

Les robots comme Da Vinci ont une bonne réputation dans le domaine chirurgical, car ils ont réalisé un développement remarquable en plus de vingt ans de leur vie, malgré leur coût élevé et leur coût de maintenance périodique et malgré les erreurs commises qui ont causé la mort de plusieurs patients. L'organisation intuitive surgical a développé des modèles et des instruments EndoWrist de robot Da Vinci grâce auxquels elle a obtenu la propriété intellectuelle d'une technologie chirurgicale importante qui, jusqu'à présent, utilise différentes compétences pour atteindre les systèmes finaux avec un minimum d'erreurs. Des erreurs étaient principalement dans le contrôle et la coordination entre les parties du robot en raison de plusieurs facteurs, dont le plus important, sans aucun doute, est le manque d'expérience des utilisateurs de l'appareil et causé par le manque de formation et l'échec de développer des dispositifs de simulation qui aideraient les stagiaires à mieux s'adapter à l'appareil et à faire face à de nouvelles situations de simulation auxquelles ils pourraient être confrontés à l'avenir dans les chirurgies officielles.

Bibliographie

- [1]: Liza Cooper <https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/introduction-to-robotics/>
- [2] : Introduction à la robotique par Laetitia Matignon Université de Caen, France.
- [3] : Robotique - ISTIA, Université Angers Jean-Louis Boimond.
- [4] : Lazaric Nathalie. Origines et développement de la robotique. In: Revue d'économie Industrielle, vol. 61, 3e trimestre 1992. pp. 54-67.
- [5]: <http://www.sciencekids.co.nz/sciencefacts/technology/historyofrobotics.html>.
- [6]: Joscelin OUDRY Professeur notamment de système d'exploitation a université de marne-la-vallée.
- [7]: Contribution à l'étalonnage géométrique des robots industriels Par : Toufik BENTALEB Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique
- [8] : I.Oestman, C-A Allared, U.Holmqvist, "Pendulum robot", reprint of Asea Journal 3.4.1985
- [9]: « Contrôle d'un robot mobile » par ABDELLAOUI Zakarya et BENKHELIFA Badreddine Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, année 2016.
- [10] : « Etude et conception d'un Robot marchant » par HEDDOUCHE Kamel Université Mohamed Khider Biskra, année 2014.
- [11] : Commande d'un robot mobile Khepera IV par BOUR Djilali & CHERIEF Makhlof Université Djilali BOUNAAMA Khemis Miliana, année 2016.
- [12] : « Commande à distance d'un chariot mobile avec évitement d'obstacle » présente par SALHI Farid et REZKI Dahmane Université Mouloud MAMMERI, Tizi-Ouzou 2010
- [13] : Système de localisation pour robots mobiles par SLIMANE Noureddine université de batna, 2005.
- [14]: <https://sites.google.com/site/typesderobots/home/types-de-robots>
- [15]: <https://www.capital.fr/polemik/les-robots-une-chance-pour-l-homme-1223830>
- [16]: Livre 'Robotique médicale ' Jocelyne Troccaz
- [17]: <https://www.lasfce.com/fr/chirurgie-robotique/chirurgie-robotique>
- [18]: Olga Lechky, « World's first surgical robot in B.C. », The Medical Post, vol. 21, no 23, 12 novembre 1985
- [19]: Magali SANCHEZ 'Chirurgie assistée par ordinateurs (CAO)'.
[20]: <https://www.revmed.ch/RMS/2012/RMS-325/Robots-chirurgicaux-jusqu-ou-va-t-on-repousser-les-limites-de-la-chirurgie>

- [21]: Cours de robotique médicale David.Daney sophia.inria.fr, Projet Coprin, INRIA Sophia Antipolis
- [22]: THÈSE présentée par : Laurence NOUAILLE soutenue le : 09 décembre 2009 pour obtenir le grade de : Docteur de l'université d'Orléans Discipline/ Spécialité : Robotique
- [23]: Tao Li. Commande d'un robot de télé-échographie par asservissement visuel. Autre. UniversitéRennes 1, 2013.
- [24]: <https://www.adechotech.fr/tele-echographie>
- [25]: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Ponction/>
- [26]: <https://www.actusoins.com/16073/prelevements-veineux-laissez-faire-le-robot.html>
- [27]: <https://www.mayoclinic.org/tests-procedures/robotic-surgery/about/pac-20394974>
- [28]: <http://tperobotiquechirurgicale.e-monsite.com/pages/histoire-de-la-robotique-chirurgicale.html> [29]: <https://www.elsan.care/fr/patients/neurochirurgie>
- [30]: <https://www.elsan.care/fr/patients/chirurgie-orthopedique-et-traumatologique>
- [31]: <https://www.chuv.ch/fr/urologie/uro-home/patients-et-familles/maladies-et-affections/>
- [32]: <https://www.urofrance.org/base-bibliographique/la-chirurgie-urologique-assistee-par-ordinateur-et-robot>
- [33]: <https://www.urofrance.org/base-bibliographique/la-chirurgie-urologique-assistee-par-ordinateur-et-robot>
- [34]: <https://www.elsan.care/fr/patients/chirurgie-dentaire>
- [35]: <https://www.dentaly.org/robots-dentistes/>
- [36]: <https://www.mutuelle.com/glossaire-lexique-mutuelle/c/definition-chirurgie-des-yeux.html>
- [37]: <https://sante.lefigaro.fr/actualite/2016/09/15/25398-spectaculaire-operation-loeil-realisee-par-robot>
- [38]: Christophe Drouin 'Contribution à une conception appropriée de robots médicaux : vers une démarche mécatronique'.
- [39]: Jacques HUBERT 'Chirurgie assistée par robot : principes et indications ; formation et évaluation des compétences'.
- [40]: https://en.wikipedia.org/wiki/Intuitive_Surgical
- [41]: <http://www.chirurgie-mini-invasive.com/>
- [42]: <http://da-vinci.e-monsite.com/pages/partie-3/iii-cas-particulier-du-systeme-da-vinci.html#view-page>
- [43]: <https://urologie-davody.fr/cancer-de-la-prostate/prostatectomie-robotisee/les-versions-s-et-si-du-robot-da-vinci/>

- [44]: <https://www.pinnaclesurgical.co.za/new-da-vinci-x-xi-surgical-systems/>
- [45]: <https://www.roboticsbusinessreview.com/health-medical/could-single-port-surgical-robots-lead-to-standard-systems/>
- [46]: <https://www.therobotreport.com/intuitive-surgical-da-vinc-sp-procedures/>
- [47]: <https://www.laparoscopyhospital.com/Book/Ch-03.pdf>
- [48]: <https://www.davincisurgery.com/>
- [49]: <https://www.kelrobot.fr/2011/05/09/le-robot-da-vinci-au-cote-des-chirurgiens/>
- [50]: <https://entokey.com/the-da-vinci-system-technology-and-surgical-analysis/>
- [51]: <https://www.laparoscopyhospital.com/Book/Ch-04.pdf#gsc.tab=0>
- [52] : <http://cedit.aphp.fr/hospital-based-hta-levaluation-de-technologies-de-sante-a-lhopital/point-sur-le-systeme-de-chirurgie-assistee-par-robot-da-vinci/>
- [53] : Concours Centrale. Supelec ‘Conception de la commande d'un robot chirurgical’
- [54] : https://www.lepoint.fr/editos-du-point/anne-jeanblanc/robot-chirurgical-les-accidents-sont-le-plus-souvent-d-origine-humaine-14-02-2014-1791827_57.php#
- [55] : <https://dailygeekshow.com/attention-une-enquete-demonstre-que-les-robots-chirurgiens-ne-sont-pas-aussi-fiables-que-les-medecins-le-pensaient/>
- [56] : https://en.wikipedia.org/wiki/Robotics_simulator
- [57] : <https://en.wikipedia.org/wiki/Simulation>
- [58] : https://www.davincisurgerycommunity.com/Systems_I_A/Skills_Simulator
- [59] : Frédéric Wolff ‘Simulation de situations critiques en chirurgie robotique. Retour d’expérience sur une méthode économique, interprofessionnelle et mobile’
- [60] : <https://www.engineerlive.com/content/how-reduce-robot-malfunctions>
- [61] : <https://www.intuitive.com/en-us/products-and-services/da-vinci/services##>
- [62] : <https://www.intuitive.com/en-us/about-us/company/future-vision>
- [63] : <https://www.intuitive.com/en-us/about-us/company>

Annexe A

Item	Year 1	Year 2	Year 3	Year 4	Year 5	Year 6	Year 7*	Year 8	Year 9	Year 10
Da Vinci Si Surgical System	\$2,643,680	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Start-up reusable equipment and accessories	\$203,360	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Disposables/ consumables	\$330,460	\$330,460	\$330,460	\$330,460	\$330,460	\$330,460	\$330,460	\$330,460	\$330,460	\$330,460
Surgeon training	-	\$6,101	\$6,101	\$6,101	\$6,101	\$6,101	\$6,101	\$6,101	\$6,101	\$6,101
Annual maintenance	-	\$177,940	\$177,940	\$177,940	\$177,940	\$177,940	\$177,940	\$177,940	\$177,940	\$177,940
Annual total costs	\$3,177,550	\$514,501	\$514,501	\$514,501	\$514,501	\$514,501	\$514,501	\$514,501	\$514,501	\$514,501
Cumulative total costs	\$3,177,550	\$3,692,001	\$4,206,502	\$4,721,002	\$5,235,503	\$5,750,004	\$6,264,505	\$6,779,006	\$7,293,506	\$7,808,007

Tableau Coûts du robot Da Vinci, de la maintenance, des consommables et de la formation, par année en Dollar Canadien

Annexe B

Système Bodyo pour le diagnostic médical

un système d'Intelligence Artificielle qui avait battu les médecins seniors dans le diagnostic des tumeurs cérébrales. C'est maintenant au tour de BodyO, un pod qui produit des rapports médicaux complets en quelques minutes.

C'est une start-up technologique qui a été sélectionnée par la Dubai Future Foundation pour son programme d'accélération dans le cadre d'une initiative de la Dubai Health Authority, à laquelle plus de 650 entreprises ont participé pour créer des solutions liées à la santé. BodyO a fabriqué des cabines avec intelligence artificielle qui effectuent un scan corporel autonome des patients. Ce scanner obtient le taux de sucre dans le sang, la pression artérielle, la composition corporelle (masse grasse, masse musculaire, hydratation, taille et poids) et les partage avec les hôpitaux et les établissements médicaux, ce qui facilite les contrôles car sa localisation: les espaces publics, centres commerciaux, gymnases

Soixante pour cent de la population des EAU sont obèses, et les maladies cardiaques chroniques et le diabète atteignent des niveaux presque épidémiques à l'échelle mondiale, mais avec ces tests simples et non évasifs, les utilisateurs peuvent désormais recevoir les informations dont ils ont besoin pour être en mesure de surveiller ces niveaux, ce qui leur permet d'être notifiés le plus tôt possible si des mesures doivent être prises. (Tariq Hussain, PDG de BodyO)

L'intelligence artificielle entre en jeu lorsque ces informations sont également utilisées par BodyO pour proposer des services préventifs à ses clients via une application mobile. En plus d'offrir à ses utilisateurs l'accès à leurs données, il dispose également de programmes de remise en forme, de santé et de nutrition créés individuellement avec les données des utilisateurs. Le coût est de 9,99 \$



Figure Diagnostique par le robot BodyO

Annexe C

Les paroles des patients opérés par le Robot Da Vinci Xi

Opéré le 13/09/2016 à l'Hôpital Robert Schuman

« J'ai entendu parler du robot chirurgical des HPMetz par la presse locale et par mon médecin. La perspective de me faire opérer par ce robot ne m'a pas inquiété. En effet, le chirurgien m'a expliqué que l'opération serait plus précise et moins lourde. Cette solution m'a donc paru plus fiable, j'étais donc plutôt confiant. Deux jours après l'opération je me sens bien et je n'ai pas trop de douleurs, moins je pense que lors d'une opération classique. En plus, je suis hospitalisé moins longtemps et ça, c'est vraiment appréciable. »

Opérée le 20/09/2016 à l'Hôpital Robert Schuman

« C'est mon médecin qui m'a parlé du robot chirurgical des HPMetz dans le cadre d'une opération prévue vis-à-vis de mon état de santé. Cette technologie m'a impressionnée mais j'ai vite été rassurée par le chirurgien qui allait m'opérer. Pour moi, la chirurgie robotique comporte moins de risques qu'une chirurgie classique car elle me paraît plus précise. J'ajouterai que le fait d'avoir une cicatrice moins grande est vraiment un avantage, c'est moins douloureux et je suis hospitalisée moins longtemps. »



Figure les statistiques de robot Da Vinci Xi utilisé

