



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Ecole Doctorale BioSE (Biologie-Santé-Environnement)

Thèse

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE

Mention : « Sciences de la Vie et de la Santé »

par Manuela PEREZ

« Chirurgie Robotique : de l'Apprentissage à l'Application »

14/09/2012

Membres du jury :

Rapporteurs :	Pr. Nicolas PIRRO	PU-PH, Aix Marseille Université, Marseille
	Dr. Alexandre MOREAU-GAUDRY	MCU-PH, Université Joseph Fourier, Grenoble
Examineurs :	Pr. Frank BRUYERE	PU-PH, Université François Rabelais, Tours
	Pr. Gilles GROSDIDIER	PU-PH, Université de Lorraine, Nancy
	Pr. Jacques HUBERT	PU-PH, Université de Lorraine, Nancy directeur de thèse
	Pr. Jacques FELBLINGER	PU-PH, Université de Lorraine, Nancy

**INSERM U947 Laboratoire « Imagerie Adaptative Diagnostique et Interventionnelle »
CHU de Nancy-Brabois Tour Drouet 4^{ème} étage
5 rue du Morvan 54511 Vandœuvre-lès-Nancy**

Résumé / Abstract

Chirurgie Robotique : de l'Apprentissage à l'Application

Résumé : Le développement croissant de la chirurgie robotique pose le problème de la formation. Cette nouvelle technologie tend à suppléer dans les procédures complexes la coelioscopie. Elle nécessite une adaptation du chirurgien. Il est, en effet, nécessaire de maîtriser à la fois le télémanipulateur et les procédures chirurgicales, qui ne sont pas de simples transpositions des gestes coelioscopiques.

Initialement, nous avons réalisé un historique du développement de la chirurgie mini-invasive coelioscopique et robotique, ainsi qu'un historique de l'apprentissage de la chirurgie.

Puis, nous nous sommes intéressés à l'apprentissage de la robotique. Les simulateurs de chirurgie coelioscopique sont très couramment employés dans l'apprentissage. En robotiques, ils ont fait récemment leur apparition sur le marché. Nous avons étudié la validité du simulateur dV-Trainer® dans l'apprentissage de la chirurgie robotique. Nous avons démontré l'intérêt de cet outil dans l'acquisition de la gestuelle et des automatismes propres au robot.

Nous avons par ailleurs étudié l'impact d'une formation en micro-chirurgie sur les performances développées en chirurgie robotique car, au cours d'une étude préliminaire nous avons constaté que les micro-chirurgiens présentaient de meilleures aptitudes sur le simulateur de chirurgie robotique que ceux sans expérience en micro-chirurgie.

Dans un troisième temps, nous nous sommes intéressés à la téléchirurgie à longue distance qui est impactée par deux contraintes que sont la latence de transmission et le volume des informations à transmettre. Une première étude a étudié l'impact du délai de transmission sur les performances des chirurgiens. Une deuxième étude a consisté à réaliser une évaluation subjective par des chirurgiens de la qualité de vidéos de chirurgie robotique compressées afin de déterminer un seuil de compression maximal acceptable.

Mots clés : Chirurgie robotique, formation en chirurgie robotique, Simulateur de chirurgie robotique, Téléchirurgie, Délai, Compression vidéo avec perte.

Telesurgery: from training to implementation

Summary: The huge expansion of minimally invasive robotic devices for surgery ask the question of the training of this new technology. Progress of robotic-assisted surgical techniques allows today mini-invasive surgery to be more accurate, providing benefits to surgeons and patients for complex surgical procedures. But, it resulted from an increasing need for training and development of new pedagogical strategies. Indeed, the surgeon has to master the telemanipulator and the procedure, which is different from a simple transposition of a laparoscopic skill.

The first part of this work treats about historical development of minimal invasive surgery from laparoscopy to robotic surgery. We also develop the evolution of training program in surgery.

Virtual simulators provide efficient tools for laparoscopy training. The second part of this work, study some possible solutions for robotic training. We assess the validity of a new robotic virtual simulator (dV-Trainer®). We demonstrate the usefulness of this tool for the acquisition of the basic gesture for robotic surgery.

Then, we evaluate the impact of a previous experience in micro-surgery on robotic training. We propose a prospective study comparing the surgical performance of micro-surgeons to that of general surgeons on a robotic simulator. We want to determine if this experience in micro-surgery could significantly improve the abilities and surgeons performance in the field of basic gesture in robotic surgery.

The last part of the study also looks to the future. Currently, telesurgery need sophisticated dedicated technical resources. We want to develop procedures for clinical routine used. Therefore, we evaluate the impact of the delay on the surgical procedure. Also, reducing data volume allow decreasing latency. An appropriate solution to reduce the amount of data could be found by introducing lossy compression for the transmission using the well-known MPEG-2 and H-264 standards.

Keys words: Robotic surgery, Robotic training, Robotic simulator, Telesurgery, Latency, Lossy video compression

Remerciements

Ces travaux de thèse ont été réalisés au sein du Laboratoire d'Imagerie Adaptative Diagnostique et Interventionnel, unité INSERM U 947 et de l'École de Chirurgie de l'Université de Lorraine.

Je tiens, tout d'abord, à remercier Mr le Pr Franck BRUYERE qui m'a fait l'honneur de présider mon jury de thèse. Toute ma gratitude va également à mes rapporteurs Mr le Pr Nicolas PIRRO et Mr le Dr Alexandre MOUREAU-GAUDRY, pour le temps et l'attention portés à l'évaluation de ce travail.

Mes remerciements s'adressent également à Mr le Pr Jacques HUBERT, pour m'avoir proposé ce sujet, pour m'avoir dirigée tout au long de cette thèse et pour m'avoir fait confiance au cours de ces 5 années. Je suis prête pour la suite !

Mes remerciements à Mr le Pr Jacques FELBLINGER, que j'ai toujours considéré comme mon co-directeur et qui a rempli pleinement cette fonction de soutien surtout lorsque tout semblait aller mal. Heureusement, même « les petits boulets » prennent un jour leur envol.

Mes remerciements à Mr le Pr GROSDIDIER qui a constitué le point de départ de cette aventure et sans qui tout ceci n'aurait pas été possible. Vous représentez mon Maître en chirurgie et le pilier de ma vie professionnelle.

Je tiens également à remercier chaleureusement :

Cyril PERRENOT, pour son aide, son amitié et son soutien ; je te rendrai tout ceci dans un futur proche, soit en assuré.

Cédric PASQUIER pour ses talents d'obstétricien qui ont permis de donner naissance à une jolie petite thèse. Entre coach et ami, l'équilibre est souvent délicat. Tu as été un soutien permanent.

Céline FOURNIER qui a mis en forme cette thèse lui apportant cette touche de féminité qui la rend agréable à lire. Un grand merci aussi pour ton aide dans l'océan administratif de l'Université de Lorraine.

Damien HUSSON, qui a su rendre des explications initialement incompréhensibles, limpides comme de l'eau de roche. Les « bits » et leurs codages n'ont plus de secret pour moi grâce à toi.

Emilien MICARD, le virtuose informatique. Tes compétences et tes connaissances dans ce domaine m'ont été d'une aide précieuse. J'espère que nous allons poursuivre cette collaboration encore longtemps.

Gabriela HOSSU qui finira par me faire aimer les statistiques. Si ! Si ! je le crois vraiment. Nous avons encore beaucoup de travail ensemble, je l'espère.

Mes remerciements vont aussi à Mr Eric GUESNEY pour ses explications sur le réseau et le fonctionnement informatique du CHU de Nancy.

À Marc BRAUN, vous êtes mon maître en Anatomie, soyez assuré de ma gratitude.

Mes remerciements à tous les chirurgiens et internes qui ont participé aux expériences conduites dans cette thèse.

Mes remerciements à tous les membres du Laboratoire IADI, promis, je continuerai à vous apporter des bonbons pour les petites pauses.

Mes remerciements à N'gyuen TRAN qui m'a toujours soutenu et aidé. Elle est superbe ton École de Chirurgie.

Mes remerciements à Nicolas, Thomas et Thibaut qui ont gardé la maison CGU à ma place lorsque j'étais débordée. Une mention toute particulière à toi Nicolas qui le fait régulièrement depuis 5 ans. Je crains de devoir encore te mettre à contribution. Soyez assurés de mon amitié.

Mes remerciements à Gérard et à Marie, qui inlassablement ont relu cette thèse pour y traquer les fautes de français et de grammaire. Je suis désolée, j'ai vraiment dû oublier d'intégrer quelques corrections.

Je tiens également à te remercier, Sophie pour ton soutien permanent et ton aide. Notre amitié m'est plus que précieuse. Ce qui me réjouit le plus, c'est l'avenir que nous allons pouvoir continuer à construire ensemble. Il y aura bien sûr des « 5 pages » à remplir mais à 2 ce sera plus facile.

Je tiens également à te remercier, Olivier, toi, mon homme, sans qui tout ceci ne serait pas possible. Ton amour est le moteur de ma vie. Tu es ma vie. Nous avons encore de grandes choses à construire ensemble.

Je tiens également à vous embrasser mes chéris, Clarence, Matéo et Noé. Vous êtes notre plus belle réussite à papa et à moi. Vous êtes l'autre moteur de ma vie et vous en êtes également le soleil et on ne peut pas vivre sans soleil !

Mes remerciements à Colette et Manuel, mes parents, qui en plus de l'amour qu'ils me portent, m'ont dès mon plus jeune âge appris la persévérance et le goût du travail. Je ne peux ici vous dire tout l'amour que j'ai pour vous.

Mes remerciements à tous mes amis, Isa, Géraldine, Ermelle, Delphine, Flo, Olive, Marc, Vincent Votre confiance et votre amitié me sont précieuses.

Sommaire

Résumé / Abstract	5
Remerciements	7
Sommaire	11
Abréviations	17
Table des Figures.....	19
Table des Tableaux	23
 <i>Introduction</i>	 25
 1^{ère} Partie :Chirurgie Robotique	 28
Chapitre 1 :Historique.....	30
I. Chirurgie mini invasive	30
I.1. Développement de la coelioscopie	30
I.2. Limites de la coelioscopie	31
II. Recherche en robotique et développement des télémanipulateurs.....	31
II.1. Pourquoi développer un porte-endoscope ?	31
II.2. Porte-endoscopes	32
II.2.1. AESOP®: Automated Endoscopic System for Optimal Positioning.....	32
II.2.2. Autre porte-endoscope	34
II.3. Télémanipulateurs : robots da Vinci [®] et Zeus [®]	35
II.4. Avantages technologiques du robot da Vinci [®]	38
III. Adaptation à cette nouvelle technologie	40
IV. Téléchirurgie et telementoring	41
 Chapitre 2 :Chirurgie Robotique.....	 44
I. Apprentissage de la chirurgie.....	44
II. Apprentissage de la chirurgie robotique	47
II.1. Minimum requis.....	47
II.2. Enseignement et apprentissage	47
III. Développement de nouvelles pratiques en chirurgie robotique	48
III.1. Eessor de la chirurgie ORL.....	48
III.2. Développement de nouvelles pratiques en gynécologie.....	48
IV. Téléchirurgie et Telementoring à grande distance.....	49
 Chapitre 3 :Evolution de la Chirurgie Robotique à Nancy	 52
I. Historique de la chirurgie robotique à Nancy	52
I.1. Installation du robot	52
I.2. Apprentissage des chirurgiens pionniers	52
I.2.1. Enseignement à Nancy	53
I.2.2. Pratique quotidienne	55
I.2.2.a) Ergonomie.....	55
I.2.2.b) DIU de pédagogie	56
I.2.2.c) Chirurgie robotique et neurochirurgie.....	56
I.2.3. Téléchirurgie et <i>Telementoring</i> : Projet RALTT	57
I.2.3.a) Introduction	57
I.2.3.b) Problématique	58
I.2.3.c) Partenaires.....	59

Introduction	64
Chapitre 1 : Évaluation du Simulateur de Chirurgie Robotique dV-Trainer [®]	68
I. Introduction	68
II. Matériel et Méthode	70
II.1. Le dV-Trainer [®]	70
II.2. Les exercices	71
II.3. Les participants	72
II.4. Le protocole	73
II.5. Les méthodes d'évaluation	75
II.5.1. Evaluation des exercices sur le dV-Trainer [®]	75
II.5.2. Evaluation des exercices au robot da Vinci S [®]	75
II.6. L'analyse statistique	75
III. Résultats	76
III.1. Réalisme	76
III.2. Reproductibilité	78
III.3. Validité de Construction	79
III.4. Validité concurrente	81
IV. Discussion	83
Chapitre 2 : Influence de l'expertise en micro-chirurgie sur les performances des chirurgiens au.....	
dV-Trainer [®]	86
I. Introduction	86
II. Matériel et Méthode	87
II.1. Sujets	87
II.2. Exercices réalisés	87
II.3. Critères analysés	91
II.4. Questionnaire d'ergonomie soumis aux micro-chirurgiens	92
II. 5. Analyse statistique	92
III. Résultats	92
III.1. Score global	92
III.2. Etude par critère	93
III.3. Etude par exercice	94
III.4. Analyse statistique	94
III.5. Analyse du questionnaire d'ergonomie	95
IV. Discussion	96
IV.1. Dextérité chirurgicale	96
IV.2. Psychologie de l'apprentissage et adaptation à l'interface	97
IV.3. Technique et ergonomie	99
IV.4. Retour de force	100
IV.5. Point de vue économique	101
IV.6. Limites de l'étude	101
V. Conclusion et perspectives	101

Introduction	106
I. Problématique de la distance	110
Chapitre 1 :Impact de la latence en Téléchirurgie à longue distance	114
I. Introduction	114
II. Matériel et Méthode	115
II.1.Sujets	115
II.2.Plateforme d'essai	115
II.3.Exercices	117
II.3.1. Exercice des écrous	118
II.3.2. Exercice de l'aiguille	119
II.3.3. Exercice du sang	120
II.3.4. Exercice du nœud	121
II.4.Protocole	122
II.5.Calcul des notes	122
III. Résultats	123
IV. Discussion	126
Chapitre 2 :Impact de la compression video en Téléchirurgie à longue distance	130
I. Introduction	130
II. Historique de la compression	131
III. Techniques de compressions	132
III.1.Organisation d'une vidéo	132
III.2.Caractéristique de l'œil humain	134
III.2.1. Anatomie	134
III.2.2. Physiologie de la vision	136
III.3.Différents modes de compression	137
III.3.1. Compression sans perte	137
III.3.2. Compression avec perte	138
III.3.3. Technique de compression spatiale	138
III.3.4. Technique de compression temporelle	140
III.4.Algorithme de compression type MPEG	143
III.5.Compression d'images dans le milieu médical	145
III.6.Test de la compression avec perte dans le monde chirurgical	146
III.7.Conclusion	149
III.8.Étude de la compression H.264	149
III.8.1. Matériel et méthodes : Sujets	149
III.8.2. Protocole de test	150
III.8.2.a) Séquences vidéos	150
III.8.2.a.i) Séquence 1 : Dissection du Told	151
III.8.2.a.ii) Séquence 2 : Exposition du pédicule rénal sur lacs	152
III.8.2.a.iii) Séquence 3 : Tumorectomie d'une lésion rénale	153
III.8.2.a.iv) Séquence 4 : Passage d'une aiguillée de Monocryl	154
III.8.3.b) Technique de compression	155
III.8.3. Résultat préliminaire pour l'exercice Dissection du Told	155
III.8.4. Exploitation par rapport aux résultats préliminaires	156

4^{ème} Partie : Conclusion et Perspectives	161
I. Pour l'enseignement de la chirurgie robotique	162
I.1. Intérêt d'un enseignement multimodal de chirurgie robotique	162
I.2. Nouvelles évaluations du dV-Trainer®	163
II. Recherche sur l'impact du délai en téléchirurgie	163
Annexes	166
Bibliographie	194
Résumé / Abstract	202

Abréviations

ADSL : Asymmetric Digital Subscriber Line

AESOP : Automated Endoscopic System for Optimal Positioning

ANOVA : ANalyse Of Variance

CCD : Charge-Coupled Device

CEDIT : Comité d'Évaluation et de Diffusion des Innovations Technologiques

CG : Contrôle Goupe

CHU : Centre Hospitalier Universitaire

CIRIL : Centre Interuniversitaire de Ressources Informatiques de Lorraine

CRAN Centre de Recherche et Automatique de Nancy

DARPA : Defence Advanced Research Project Agency

DIU : Diplôme Interuniversitaire

DSI : Direction des Services Informatiques

FDA : Food and Drug Administration

FCR : Fondamentaux en Chirurgie Robotique

FLS : Fundamentals of Laparoscopic Surgery

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers

IP : Internet Protocole

IRCAD : Institut de Recherche contre les Cancers de l'Appareil Digestif

MPEG : Motion Picture Expert Group

MSG : Micro Chirurgie Groupe

NASA : National Aeronautics and Space Administration

ORL : Otorhinolaryngologie

OSATS : Objective Structured Assessment of Technical Skill

PACS : Picture Achieving and Communication system

Pixel: Picture Element

ProMuFERC : Programme Multimodal de Formation et d'Evaluation en Chirurgie Robotique

QoS : Qualité de Service

RALTT : Robotic Assisted Laparoscopic Telementoring and Telesurgery

RENATER : Réseau National de Télécommunication pour la Technologie, l'Enseignement et la Recherche

SAGES : American Gastrointestinal and Endoscopic Surgeons

TCD : Transformation en Cosinus Discret

UDP User Datagram Protocol

VDI : Voix-Données-Images

VPN : Virtual Private Network

Table des Figures

Figure 1: AESOP console & bras articulé.....	33
Figure 2: AESOP & carte de reconnaissance vocale.....	33
Figure 3 : Position d'AESOP au cours d'un geste chirurgical.....	33
Figure 4 : Porte endoscope Endo-Assist®	34
Figure 5 : Robot Zeus® console (A) & bras articulés (B).....	35
Figure 6 : Le Green Telepresence Surgical System™	36
Figure 7 : Robot da Vinci® console (A) & bras articulés (B)	36
Figure 8: Robot da Vinci® en Europe	36
Figure 9: Robot da Vinci® en Europe	36
Figure 10: Courbe d'apprentissage des prostatectomies robot	41
Figure 11 : William Stewart HALSTED	44
Figure 12 : Boîte d'entraînement de la certification FLS	45
Figure 13 : Exercices pratiques de la certification FLS	46
Figure 14 : Opération Lindbergh, chirurgien à New York (A), patient à Strasbourg (B)	49
Figure 15 : Début de la chirurgie robotique à Nancy sur modèles porcins	53
Figure 16 : Simulateur de chirurgie robotique RoSS®	54
Figure 17 : Simulateur de chirurgie robotique dV-Trainer®	54
Figure 18 : Surgical Simulator System installé sur la console du da Vinci SI®	54
Figure 19 : Console du dV-Trainer®	54
Figure 20: Exercices virtuels sur le dV-Trainer®	55
Figure 21 : <i>Microforceps</i> et ciseau de 5mm avec articulation curviligne utilisés en ORL.....	57
Figure 22 : problématique de la téléchirurgie	59
Figure 23 : dV-Trainer® commercialisé par la firme <i>MIMIC Technologies</i> ®.....	68
Figure 24 : Différents composants du simulateur de chirurgie robotique dV-Trainer®	71
Figure 25 : 5 exercices réalisés au dV-Trainer®	72
Figure 26 : Étude de la courbe d'apprentissage par rapport à la courbe de régression :.....	74
Figure 27 : Maquette des exercices réalisés pour le Dry-Lab au robot da Vinci S®	74
Figure 28: Courbe d'apprentissage pour les cinq exercices sur le dV-Trainer®	78
Figure 29 : Validité de construction moyenne des notes par rapport à chaque groupe.....	80
Figure 30 : Validité concurrente sur le score global pour les 5 exercices.....	82
Figure 31: Simulateur de chirurgie robotique : dV-Trainer®	88
Figure 32 : Exercice Pick and Place.	88
Figure 33 : Exercice Peg Board.....	89
Figure 34 : Exercice Ring and Rail	89
Figure 35 : Exercice Camera Targeting.....	90
Figure 36 : Exercice Match Board	90
Figure 37 : Capture d'écran d'une feuille de résultats pour un exercice.....	91
Figure 38 : Box plot Overall Score.....	93
Figure 39 : Box plot Economy of Motion	94
Figure 40 : Box plot Excessive Instrument Force	94
Figure 41: Box plot Instruments.....	94
Figure 42: Espace de travail au dV-Trainer®	97
Figure 43: Espace de travail en microchirurgie.....	97
Figure 44 : Espace de travail au robot	97
Figure 45 : Viseur binoculaire du dV-Trainer®	98
Figure 46 : Viseur binoculaire du microscope.....	98
Figure 47 : Pince pollici-digitale joysticks dV-Trainer®	100
Figure 48 : Pince pollici-digitale microchirurgie.....	100
Figure 49 : Pince Pollici-digitale joysticks en robotique.....	100

Figure 50 : Organisation générale du réseau au CHU de Nancy	108
Figure 51 : Réseau RENATER	109
Figure 52 : Problématique de la téléchirurgie à longue distance	111
Figure 53 : Plateforme d'essai	116
Figure 54 : Plateforme d'essai: de la caméra au moniteur en passant par les ordinateurs	117
Figure 55 : Exercice des écrous	118
Figure 56 : Exercice de l'aiguille	119
Figure 57 : Exercice du sang. a) dissection du cathéter ; b) mise en place d'un clip	120
Figure 58 : Exercice du nœud. a) passage de l'aiguille. b) réalisation du nœud	121
Figure 59 : Perception de l'impact du délai sur un éventuel geste	123
Figure 60 : Courbes de régression : chirurgie envisageable / délai pour chaque exercice	123
Figure 61 : Exemple d'une même image en noir-blanc, niveau de gris et couleur	133
Figure 62 : Répartition des cônes et bâtonnets dans la rétine	135
Figure 63 : Sensibilité de l'oeil rapporté à la fréquence spatiale d'une image	137
Figure 64 : Exemple de transformée fréquentielle et de rendu après suppression des hautes et basses fréquences	139
Figure 65: Compression temporelle	140
Figure 66 : Vue per-opératoire d'une tumorectomie. Image (a) et (a+1)	141
Figure 67 : Source d'erreur entre l'image (a) et (a+1)	142
Figure 68 : Séquence de vidéo compressée selon MPEG	143
Figure 69 : Dissection du Told	151
Figure 70 : Exposition du pédicule rénal	152
Figure 71 : Tumorectomie d'une lésion rénale	153
Figure 72 : Passage d'une aiguillée de Monocryl	154
Figure 73 : Résultat global de l'évaluation qualité	155
Figure 74 : Moyenne des notes rapportées au débit pour la séquence dissection du Told	156

Table des Tableaux

Tableau 1 : Avantage de la chirurgie robotique.....	39
Tableau 2 : Données démographiques concernant les sujets inclus	73
Tableau 3 : Étude du réalisme des exercices	76
Tableau 4 : Évaluation subjective de la difficulté des exercices réalisés au dV-Trainer®	77
Tableau 5 : Intérêt des exercices réalisés au dV-Trainer®	77
Tableau 6 : Avantages et désavantages du dV-Trainer® et du robot da Vinci®	78
Tableau 7 : Analyse de la Reproductibilité pour chacun des 5 exercices et chacun des 7 critères	79
Tableau 8 : Validités du dV-Trainer®	81
Tableau 9 : Corrélation de l'évaluation des compétences.....	82
Tableau 10 : Données démographiques du Groupe MicroChirurgie (MSG) et du Groupe Control (CG)	87
Tableau 11 : Résultats par critères des MSG et CG sur dV-Trainer®	93
Tableau 12 : Résultats par exercices des MSG et CG sur dV-Trainer®	94
Tableau 13 : Similitudes entre l'ergonomie de la chirurgie robotique et de la microchirurgie.....	95
Tableau 14 : Classification des exercices en fonction de leurs caractéristiques	121
Tableau 15 : Résultats de l'exercice Écrou pour tous les chirurgiens.....	124
Tableau 16 : Résultats de l'exercice des aiguilles pour tous les chirurgiens	124
Tableau 17 : Résultats de l'exercice du sang pour tous les chirurgiens	125
Tableau 18 : Résultats de l'exercice du nœud pour tous les chirurgiens	125
Tableau 19 : Classement des exercices en termes de difficulté de réalisation	125

INTRODUCTION

La chirurgie est une spécialité médicale qui a connu un essor considérable grâce au développement de l'anesthésiologie dans les années 1950. En effet, l'introduction d'une anesthésie efficace a permis de développer des techniques chirurgicales dont les grands principes avaient été décrits dès le début du XX^e siècle dans les traités par Billroth, Bassini ou Mikulicz. La disparition de la douleur grâce à une anesthésie générale bien conduite a permis de développer des techniques plus longues dans l'apprentissage et dans la pratique mais également moins agressives pour le patient.

La voie d'abord se faisait dans un premier temps grâce à la chirurgie par voie ouverte (laparotomie), qui reste toujours d'actualité au XXI^e siècle pour certaines procédures.

Elle a évolué vers la chirurgie mini-invasive (coelioscopique ou laparoscopique). Elle représente, à l'heure actuelle, le type de chirurgie vers laquelle de nombreuses spécialités se tournent résolument. Cet abord mini-invasif permet un plus prompt rétablissement des malades, une rançon cicatricielle moindre et des gestes en ambulatoire financièrement plus rentables. Cette chirurgie représente un enjeu tant de santé publique qu'économique.

Les premières coelioscopies ont été réalisées en gynécologie et étaient essentiellement réalisées dans un but diagnostic. En 1987, Philippe Mouret, chirurgien lyonnais, procédait à la première cholécystectomie (ablation de la vésicule biliaire) par voie coelioscopique (1). À l'heure actuelle, la chirurgie mini-invasive est de pratique courante pour de nombreuses interventions très bien codifiées (2)(3)(3). Malgré le développement d'instruments et de pinces automatiques sophistiquées, certains gestes restent cependant, peu envisageables par abord mini-invasif traditionnel. Pour contourner ces difficultés, des robots de chirurgie ont été développés. Il s'agit en fait de télémanipulateurs assistés par ordinateurs qui sont interfacés entre le patient et le chirurgien. Ce type de chirurgie s'appelle téléchirurgie car elle implique une distance entre le chirurgien et son patient. Elle entre dans le cadre de la télé médecine qui est en plein essor également.

L'implantation de ces robots est exponentielle dans le monde (1600 aux Etats Unis et 300 en Europe en 2009). Ils sont mutualisés au sein d'un ou plusieurs centres hospitaliers entre plusieurs équipes et aident à la réalisation de procédures complexes dans différentes spécialités aussi variées que la chirurgie urologique (4)(5), viscérale(6), gynécologique (7), oto-rhino-laryngologie (ORL) (8)(9), cardiaque (10)....

La chirurgie coelioscopique avait été une « révolution » en introduisant une distance de quelques dizaines de centimètres entre le chirurgien et son patient. La main du chirurgien n'était plus en contact direct avec le site opératoire. En chirurgie robotique, la distance introduite est encore plus grande car le chirurgien n'est plus à côté de son patient, il n'est pas habillé stérilement et commande les bras articulés du robot par l'intermédiaire de la console qui se trouve à quelques mètres du site

opératoire ou même parfois très loin du malade (plusieurs milliers de kilomètres). Cette nouvelle technologie en plein essor, qui tend à suppléer dans certains cas la coelioscopie, nécessite une adaptation du chirurgien. Il est nécessaire de maîtriser à la fois le télémanipulateur et les procédures chirurgicales. La chirurgie robotique n'est pas une simple transposition du geste réalisé par voie coelioscopique. La faible amplitude de mouvement du système oblige à modifier le déroulement du geste chirurgical, même si les principes restent les mêmes.

Par ailleurs, le coût de la chirurgie robotique impose une approche différente de l'apprentissage par rapport aux autres types de chirurgies (laparotomie ou coelioscopie).

Il convient donc de modifier nos anciens modèles d'enseignement pour pouvoir les appliquer à la téléchirurgie et d'explorer de nouveaux horizons pour le développement futur de la téléchirurgie.

La première partie de ce travail a retracé l'évolution de la chirurgie. Nous avons décrit l'essor des chirurgies mini-invasives et l'environnement qui a permis le développement de la chirurgie robotique. Un chapitre était par ailleurs dédié au développement de la chirurgie robotique à Nancy.

L'enseignement évolue de façon parallèle à la chirurgie. Dans les chapitres suivants, nous étudions donc l'adaptation du chirurgien à cette nouvelle technologie robotique, dans la pratique courante avec la gestion de l'activité d'enseignement et également dans un axe qui est en devenir : celui de la téléchirurgie à longue distance et du *telementoring*.

La deuxième partie de ce travail a été réalisée dans le cadre de l'enseignement et de l'apprentissage de la robotique. L'évolution actuelle se fait vers une pratique première de la chirurgie pour les jeunes internes dans le monde virtuel des simulateurs notamment de coelioscopie, de manière concomitante au compagnonnage développé sur le modèle halstedien. Trois simulateurs ont été également développés pour la chirurgie robotique (11)(12)(13). Avant de valider leur intégration dans des cursus de formation en chirurgie robotique, il convient de valider leurs performances en termes de validité évidente, de contenu, de construction et validité concurrente. Dans ce travail, nous avons évalué l'intérêt du simulateur de chirurgie robotique, le *dV-Trainer*® développé par la firme *MIMIC Technologies*®, Seattle - Washington (WA).

La troisième partie de ce travail a porté sur l'adaptation des chirurgiens à une technologie en développement associé à la chirurgie robotique : la téléchirurgie à longue distance. Cette téléchirurgie à longue distance nécessite le transfert d'un gros volume d'informations entre le chirurgien (la console) et le patient (les bras articulés du robot), les deux pouvant être séparés par plusieurs milliers de kilomètres. Ceci implique une adaptation du chirurgien à la latence de transmission consécutive à la distance et à la nécessité d'introduire une compression de l'image afin de diminuer le volume d'informations à transmettre. Latence de transmission, compression d'image et leurs impacts sur le chirurgien constituent donc les autres axes de recherche dans cette thèse.

1^{ERE} PARTIE :

CHIRURGIE ROBOTIQUE

Chapitre 1 :

Historique

I. Chirurgie mini invasive

I.1. Développement de la coelioscopie

Afin de comprendre l'évolution qui a conduit à la conception des robots de chirurgies robotiques, il faut remonter au début de la chirurgie mini-invasive. Durant de nombreuses décennies, la chirurgie ne se concevait que par de grandes incisions selon le dogme « à grande incision, grand chirurgien... ». Cependant, à l'heure actuelle, dans toutes les spécialités chirurgicales, la tendance est au développement des techniques mini invasives, qui permettent au prix d'un apprentissage parfois long et difficile, de meilleures suites post-opératoires. Ceci est d'autant plus vrai en chirurgie viscérale. La chirurgie coelioscopique était initialement essentiellement utilisée par les gynécologues à visée diagnostique. Elle a été introduite en chirurgie digestive par le Dr Mouret, chirurgien viscéral à Lyon (1) formé à la coelioscopie lors de son passage en chirurgie gynécologique. Il a donc, en 1987, réalisé la première cholécystectomie par voie coelioscopique, dans le même temps opératoire qu'un geste gynécologique. Cette innovation n'a été rapportée dans la littérature que tardivement. Entre temps cette chirurgie mini-invasive a secondairement été développée par les Prs Dubois (Paris) et Perissat (Bordeaux) qui ont, eux, promu la technique en France puis dans le monde (14). La coelioscopie connut secondairement un essor considérable. Elle est actuellement considérée comme le «Gold Standard» pour de nombreuses interventions réalisées très couramment : cholécystectomie (3)(15), appendicectomie (2), cure de hernie hiatale (16) (17), chirurgie colique (18)...

Le principe de la coelioscopie consiste à opérer les malades en faisant de mini abords qui se résument à 3 ou 5 incisions de l'ordre de 1cm au travers de la paroi. Par ces incisions, on introduit des trocars qui permettent le passage d'une caméra et d'outils de coelioscopie, comme des pinces, des ciseaux ou des porte-aiguilles. La vision de l'intervention se fait par l'intermédiaire de la caméra sur un moniteur en deux dimensions. Ce type d'intervention limite les grandes incisions telles les laparotomies xipho-pubienne (de la xiphoïde au pubis), facilite les suites post-opératoires immédiates et diminue les risques d'éventrations et d'occlusions à distance du geste.

I.2. Limites de la coelioscopie

L'encadrement de l'apprentissage n'était absolument pas codifié au début de la coelioscopie et c'est ainsi que l'on a vu réapparaître des complications chirurgicales par voie coelioscopique qui n'existaient pas en chirurgie ouverte. La plus fréquente était la plaie de la voie biliaire (19).

Par ailleurs, même s'il s'agit d'une technique mini-invasive qui évolue depuis de nombreuses années et qui a bénéficié du développement d'instruments « facilitateurs » comme les pinces automatiques et les instruments de coagulation, le geste coelioscopique est difficilement transposable à certaines interventions complexes, comme les pontages à cœur battant, les prostatectomies radicales, les néphrectomies partielles ou la cure d'un syndrome de la jonction pyélo-urétérale... En effet, dans ces interventions souvent longues, la dissection est étendue (curage ganglionnaire ou dissection vasculaire) et la précision du geste est primordiale (sutures). Les limites constituées par la chirurgie coelioscopique sont de plusieurs ordres :

- des instruments avec 5 degrés de liberté obligatoirement dans l'axe de l'instrument
- une vision 2D sans possibilité de démultiplication
- une dépendance vis à vis d'un aide parfois inexpérimenté...

Ces différents éléments ont conduit au développement de la téléchirurgie avec le soutien de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) et de l'US Army (20). Ces deux puissants organismes américains étaient intéressés par le développement d'une téléchirurgie dans l'espace et sur les champs de bataille (20) (21). Ils ont donc contribué au développement de la téléchirurgie en pensant à son application à longue distance, ce qui représente notre futur proche à l'heure actuelle.

II. Recherche en robotique et développement des télémanipulateurs

II.1. Pourquoi développer un porte-endoscope ?

Comme nous l'avons vu dans le précédent paragraphe, le chirurgien, en coelioscopie, est dépendant d'un aide qui tient l'endoscope (caméra). Ce même aide est également amené à exposer le site opératoire avec des pinces ou des écarteurs. Il doit se concentrer sur deux tâches simultanées. L'aide peut être un interne en chirurgie, un infirmier ou un étudiant en médecine. Au début de l'apprentissage de l'aide, ce dernier éprouve souvent des difficultés avec le maniement de la caméra (à 0 degré) car il se retrouve dans un espace clos (la cavité abdominale) sans repère extérieur. Ces

difficultés peuvent être accrues lorsque l'on utilise une optique de 10 ou 30 degrés encore plus complexe à manipuler. L'aide doit correctement orienter la caméra, maintenir la position pendant un temps indéterminé et souvent dans une attitude qui n'est pas forcément confortable, le tout sous la directive du chirurgien. Les problèmes qui peuvent survenir sont liés à l'orientation de la caméra, au focus du champ opératoire, à la stabilité de l'image, et aux collisions qui peuvent survenir avec les organes, sources de souillure (nécessité de sortir l'optique du trocart pour le nettoyer ce qui est synonyme de perte de temps et de refroidissement de l'optique). Ces difficultés peuvent concourir à handicaper le chirurgien lors de la réalisation du geste, ce d'autant que la procédure est complexe ou que le chirurgien peu expérimenté. Pour essayer de suppléer cet aide et également afin de diminuer les coûts opératoires, un des premiers robots développés dans le cadre de la chirurgie le fût par la compagnie *Computer Motion*[®], Inc in Santa Barbara –California. Il est né d'un partenariat avec la NASA dans le cadre d'un contrat de recherche. Son nom est AESOP (*Automated Endoscopic System for Optimal Positioning*). La NASA participait au projet car, pour sa part, elle souhaitait développer un bras articulé automatisé.

II.2. Porte-endoscopes

II.2.1. AESOP[®]: Automated Endoscopic System for Optimal Positioning

La compagnie *Computer Motion*[®] Inc., Goleta, CA, a développé, avec le soutien de la DARPA (*Defence Advanced Research Projects Agency*), le premier porte-endoscope à commande manuelle puis vocale dénommé AESOP[™] (Figure 1, Figure 2) (20) (22).



Figure 1: AESOP console & bras articulé



Figure 2: AESOP & carte de reconnaissance vocale



Figure 3 : Position d'AESOP au cours d'un geste chirurgical

Computer Motion[®] a eu l'autorisation de mise sur le marché par la *Food and Drug Administration* (FDA) en 1994. Cet instrument se posait dans l'optimisation du contrôle de la caméra. En effet, il permet de s'affranchir de l'aide pour le maintien de cette caméra. Il redonne le contrôle de la caméra au chirurgien. Il est composé d'une console, qui intègre à son système informatique une carte de reconnaissance vocale spécifique à chaque chirurgien, et le bras porte-endoscope, commandé par la console, qui est fixé à un rail sur le plateau chirurgical (Figure 3). Le bras répond à la commande vocale du chirurgien. La commande vocale est transmise grâce à un micro peu encombrant positionné sur le chirurgien. Ce dernier induit tous les mouvements du porte-endoscope grâce à des ordres simples du type : « *turn left* » ; « *turn right* » ; « *focus* ». La commande vocale est initiée en interpellant le robot « AESOP[®] ».

Il existe trois types de mouvements :

- un mouvement continu initié par le chirurgien lorsqu'il commence son ordre par « *move...left, right, up, down, in, out* », le mouvement sera interrompu par l'ordre « *stop* ». Ceci est réservé au changement d'exposition et donc au déplacement relativement long.
- un déplacement court, l'ordre est donné directement « *left, right...* ».
- un mouvement de retour à une position initiale.

Ce porte-endoscope est simple d'utilisation (23). Il évite les tremblements et les mouvements intempestifs, il diminue les risques de souillures de l'endoscope, la réponse à l'ordre est immédiate sans erreur d'orientation de la caméra. Le modèle fonctionne selon un système maître-esclave. Tout mouvement d'AESOP[®] ne peut être initié que par l'intermédiaire de la commande du chirurgien. Une étude de la littérature avait démontré que le robot faisait aussi bien qu'un aide expérimenté. Il libère par ailleurs un aide et diminue ainsi les coûts chirurgicaux en termes de personnel. Il a démontré son efficacité (22). AESOP[®] 3000 a fait l'objet d'une évaluation par le Comité d'Évaluation et de Diffusion

des Innovations Technologiques (CEDIT Ref : 00.01) (24). Il reconnaissait l'intérêt d'AESOP[®] sur le versant chirurgical dans les procédures longues, et sur le versant économique en diminuant le nombre d'aides nécessaires.

Dans ce travail, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à AESOP[®], car il va devenir le précurseur du télémanipulateur Zeus[®]. Actuellement, AESOP[®] est un porte-endoscope encore utilisé par des équipes chirurgicales même si la maintenance n'est plus assurée par la firme conceptrice. Le coût d'utilisation de ce robot, après acquisition, est peu élevé.

II.2.2. Autre porte-endoscope

Il existe d'autres porte-endoscopes, comme par exemple, l'*EndoAssist*[®] développé par la société *Armstrong Healthcare*[®] Inc (25). Le chirurgien contrôle les mouvements de la caméra en réalisant des mouvements de la tête. Le système se compose de 3 parties : un porte endoscope mobile (Figure 4), une unité de réception et un casque émetteur positionné sur la tête du chirurgien.

Le porte-endoscope est commandé par l'unité de réception sur le moniteur qui enregistre les mouvements de la tête du chirurgien par l'intermédiaire d'une lumière infra-rouge émise par le casque posé sur la tête du chirurgien. Lorsque ce dernier veut changer la position de l'endoscope, il doit activer la détection en appuyant sur une pédale et orienter son regard vers le moniteur. S'il veut la caméra vers le haut, il regarde vers le haut du moniteur, s'il veut la caméra vers le bas, il regarde vers le bas... Des études ont été réalisées afin de comparer *Endoassist*[®] et AESOP[®], études qui retrouvaient des performances relativement similaires (26).



Figure 4 : Porte endoscope Endo-Assist[®]

II.3. Télémanipulateurs : robots da Vinci® et Zeus®

Avec l'évolution de la technologie, des robots plus complexes se sont progressivement développés dans le cadre de la chirurgie mini-invasive. Toujours sous l'essor de la *DARPA*, *Computer Motion*® poursuit le développement d'AESOP® et lui associe deux bras articulés pour créer un robot télémanipulateur nommé « Zeus® » (Figure 5).



Figure 5 : Robot Zeus® console (A) & bras articulés (B)

La compagnie *Intuitive Surgical*® perfectionnera le télémanipulateur créé par Philipp GREEN. Il s'agit d'un scientifique issu de la NASA, qui rejoint le *Stanford Research Institute* (SRI) pour mettre au point le « Green Telepresence Surgery System® » (21)(27)(28) (Figure 6). Ce dernier servira de base à la conception du robot « da Vinci® » (Figure 7). Ces télémanipulateurs assistés par ordinateur que l'on appelle improprement robots permettent le contrôle du positionnement de la caméra mais également le contrôle du mouvement des instruments par l'intermédiaire de bras articulés. Le robot ne remplace pas la fonction chirurgicale, car il n'opère pas seul. Le robot est assujéti au chirurgien et ceci correspond, comme pour les porte-endoscopes, à un système maître-esclave. Tous les mouvements de la caméra ou des instruments sont initiés par le chirurgien qui les induit sur la console par le biais des joysticks et des commandes aux pieds. La console transmet les commandes par l'intermédiaire de câbles à la colonne porte-instruments. Le porte-endoscope AESOP® a servi de base pour l'élaboration du robot Zeus®.



Figure 6 : Le Green Telepresence Surgical System™

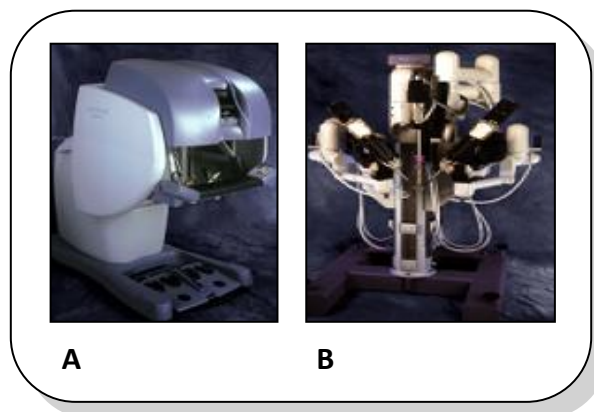
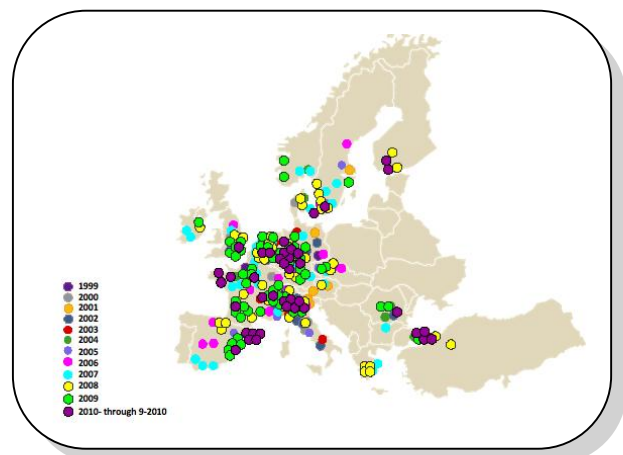


Figure 7 : Robot da Vinci® console (A) & bras articulés (B)

Pour apporter une réponse aux limites de la coelioscopie et aux difficultés techniques qu'elle rencontrait, la chirurgie robotique ou téléchirurgie s'est développée de manière progressive avec l'implantation dès 1998 des premiers robots aux USA et en Europe, puis de manière exponentielle depuis, notamment pour le robot da Vinci® (Figure 8, Figure 9).



**Figure 8: Robot da Vinci® en Europe
(1999-2000)**



**Figure 9: Robot da Vinci® en Europe
(2001-2010)**

Le robot représente une interface homme machine entre le chirurgien et le patient. Il améliore

les possibilités techniques au décours d'un geste. Un robot est défini comme une machine réalisant des gestes trop dangereux ou trop difficiles pour l'humain. Il permet d'augmenter l'efficacité du geste et la productivité. Ces télémanipulateurs appartiennent à la catégorie des outils-instruments qui permettent la réalisation de tâches. Y est associée une part de réalité augmentée qui permet d'augmenter (et non pas de remplacer) les capacités perceptives et motrices humaines. Cependant, ce télémanipulateur modifie l'approche chirurgicale. Il nécessite l'acquisition d'une nouvelle habileté motrice, ce qui constitue un champ particulier dans le domaine de l'expertise. En effet, le maniement et le contrôle de la machine ne sont pas intuitifs. Un geste robotique diffère du même geste par voie coelioscopique, tant du point de vue de l'installation que du point de vue des temps chirurgicaux. Les premiers robots ont été implantés en Europe, ayant reçu le marquage CE avant l'accord d'implantation de la *Food and Drugs Administration* (FDA) aux USA. Un robot da Vinci[®] était implanté au CHU de Nancy et un robot de type Zeus était implanté à l'Institut de Recherche contre les Cancers de l'Appareil Digestif (IRCAD) à Strasbourg en 1999. Ces robots ont permis de progresser dans les gestes chirurgicaux réalisés par voie mini-invasive. En mars 2003, les deux entreprises *Intuitive Surgical*[®] et *Computer Motion*[®] ont fusionné. Seul le robot da Vinci[®] survivra à cette fusion. Depuis, la firme *Intuitive Surgical*[®] ne cesse de perfectionner le robot da Vinci[®].

Il s'agit donc à l'heure actuelle du seul télémanipulateur sur le marché. Il évolue dans un monopole absolu.

Ce télémanipulateur que l'on appelle par abus de langage « robot » est constitué de 3 parties :

- une **console** (robot côté chirurgien) où est installé le chirurgien qui constitue la zone de commandes, commande de l'endoscope par l'intermédiaire de pédales et commande des bras porte-instruments par l'intermédiaire de deux joysticks. Celui qui réalise le geste est donc bien le chirurgien et non pas la machine seule, d'où l'utilisation impropre du terme « robot ». La réception de l'image vidéo 3D provenant des caméras se fait par l'intermédiaire d'un viseur binoculaire sur la console,
- une **colonne porte-instrument** (robot côté patient) supportant 3 (da Vinci[®]) ou 4 bras articulés (da Vinci SI[®], la nouvelle génération) porte-endoscope et porte-instruments commandés par le chirurgien par le biais de la console (pédales et joysticks).

Le bras central porte la caméra qui est munie de 2 capteurs tri-CCD avec un angle d'orientation différent. Cette différence d'angle permet une vision 3D haute définition. Des instruments ayant une articulation intrinsèque de 7 degrés d'amplitude sont positionnés sur les bras du robot (porte aiguille, crochet, pinces à prendre...). Ces instruments sont introduits dans la cavité abdominale du patient par l'intermédiaire des trocars,

- une **colonne** sur laquelle sont installés un moniteur (permet la vision de l'intervention par l'aide), un insufflateur et une source lumineuse, minimal requis pour tout geste mini-invasif.

Cette partie ne diffère absolument pas des outils nécessaires pour un geste coelioscopique standard.

II.4. Avantages technologiques du robot da Vinci®

Les robots da Vinci présentent plusieurs avantages qui sont résumés dans le Tableau 1:

- la **position ergonomique** du chirurgien qui évite à ce dernier de se fatiguer,
- la vision du champ opératoire en **3D** grâce à 2 endoscopes au sein de la même caméra présentant un angle de 6° entre eux, ceci permet un rendu optimal du relief des tissus, élément essentiel lors de la réalisation de sutures délicates et diminue le risque de collision des instruments avec les tissus,
- l'extrémité articulée des instruments endoscopiques avec une articulation à **7 degrés de liberté**, qui est comparée à la mobilité du poignet du chirurgien,
- la **stabilité de l'image** qui n'est soumise à aucun mouvement,
- l'**absence de tremblement** des instruments,
- la possibilité de **grossissement** du champ opératoire grâce à un zoom sur la caméra, ceci permettant un contrôle parfait de la préhension des tissus, de la dissection de ces tissus et de la réalisation de sutures régulières et étanches.

Tableau 1 : Avantage de la chirurgie robotique

DIFFICULTES EN COELIOSCOPIE	AVANTAGES DE LA ROBOTIQUE
<i>perte de coordination yeux-mains</i>	<i>rétablissement de l'axe yeux-mains</i>
le chirurgien regarde un écran vidéo situé à distance du champ opératoire	le regard du chirurgien est orienté vers ses mains qu'il a l'impression de plonger dans le champ opératoire
<i>mouvements inversés</i>	<i>mouvements intuitifs</i>
le point fixe de la traversée pariétale est responsable d'un effet pivot entraînant une inversion des mouvements pour la réalisation d'un geste endo-corporel	les mouvements réalisés à la console correspondent à ceux reproduits en endo-corporel
<i>agrandissement variable</i>	<i>agrandissement réglé par l'opérateur</i>
l'agrandissement de l'image dépend de la distance entre l'endoscope et le champ opératoire	l'opérateur maîtrise lui-même les déplacements de la caméra
<i>démultiplication variable</i>	<i>démultiplication adaptée au grossissement</i>
dépend de la longueur de l'instrument et de la longueur de la partie extracorporelle	réglée à la console, jusqu'à un rapport de 5/1
<i>5 degrés de liberté</i>	<i>7 degrés de liberté</i>
les mouvements sont limités du fait de la rigidité des extrémités des instruments	les articulations endo-corporelles reproduisent les 7 degrés de liberté du membre supérieur
<i>vision 2D</i>	<i>vision 3D</i>
vision sur un écran de télévision unique	réelle vision tridimensionnelle grâce à 2 canaux optiques séparés donnant une image sur 2 écrans (un pour chaque œil)
<i>instabilité de l'image</i>	<i>stabilité de l'image</i>
les tremblements de la caméra tenue par l'aide augmentent avec sa fatigue au fil de l'intervention.	fixée sur le bras du robot, la caméra reste stable tout au long de l'intervention
<i>exposition / assistant</i>	<i>utilité du « coude » de l'instrument</i>
un trocart supplémentaire manipulé par l'assistant peut être nécessaire pour écarter les tissus	le corps de l'instrument permet d'écarter (foie...) tout en ayant la pince ou le crochet à 90° qui travaille sans problème.
<i>tremblement</i>	<i>absence de tremblement</i>

les tremblements naturels sont amplifiés à l'extrémité des instruments, et leur amplitude augmente avec la longueur de l'instrument et la fatigue.	un filtre électronique élimine le tremblement
<i>position non ergonomique</i>	<i>position ergonomique</i>
la fatigue du chirurgien liée à une position debout, plus ou moins inclinée latéralement selon le type d'intervention	le chirurgien est assis à la console, les bras appuyés

Le chirurgien étant installé de manière ergonomique, utilisant un matériel sophistiqué et bénéficiant d'une vision 3D, des interventions, qui initialement, étaient jugées trop complexes pour envisager une procédure coelioscopique sont finalement devenues accessibles à un abord mini invasif. Le robot da Vinci® a permis de dépasser les limites de la laparoscopie et a très probablement permis de progresser dans ce domaine.

Les dernières innovations ont consisté à associer 2 consoles afin que 2 chirurgiens puissent utiliser le robot en même temps sur un même patient. La deuxième console dispose d'un simulateur de chirurgie robotique. Un 4^{ème} bras a été ajouté, de nouveaux instruments sont fournis (laser pour la chirurgie ORL, pince de coagulation type Ligasure® ...).

Le marketing initial des firmes Intuitive Surgical® et Computer Motion® était réalisé auprès des chirurgiens cardiaques leur vantant la possibilité de réaliser des pontages coronaires sur cœur battant par voie thoracoscopique (c'est à dire un abord mini-invasif du thorax). Secondairement le robot a été très largement utilisé par les autres spécialités et notamment les chirurgiens urologues et digestifs. Et depuis quelques années, les interventions à visées gynécologiques et ORL prennent le pas.

III. Adaptation à cette nouvelle technologie

L'apprentissage du geste opératoire en chirurgie robotique diffère d'une transposition simple de la technique coelioscopique. Cette nouvelle technologie nécessite une formation du chirurgien, d'une part au maniement du robot et d'autre part, au geste chirurgical robotisé. Cet apprentissage ne peut s'envisager au bloc opératoire avec un partage des tâches comme cela se pratique en coeliochirurgie. En effet, les gestes chirurgicaux robots assistés sont souvent des gestes d'emblée complexes (procédure de chirurgie pour l'obésité morbide, prostatectomies...). Il n'existe pas de gestes simples réalisés au robot compte tenu du coût de l'heure « chirurgie robotique ». Tous ces éléments sont des freins à l'apprentissage. Ce qui se conçoit en chirurgie coelioscopique, où l'on réalise

plusieurs interventions par jour et de difficultés variables ce qui permet d'aider graduellement un interne ou un assistant en formation, est impossible en chirurgie robotique.

À l'heure actuelle, la pratique de la chirurgie robotique n'est soumise à aucun pré requis et aucune certification tant en Europe qu'aux US. Une formation courte et intensive sur 2 jours est proposée et financée par la société « *Intuitive Surgical*[®] » à tous les chirurgiens acquéreurs d'un robot da Vinci[®]. Elle est obligatoire. La formation repose ensuite sur le « *proctoring* » qui consiste en un accompagnement dans la réalisation d'une procédure chirurgicale spécifique. Le chirurgien en formation reçoit l'aide d'un expert sur quelques interventions. Puis il continue seul son apprentissage, ce qui peut se faire aux dépens de la qualité des soins puisque entre 15 et 30 procédures chirurgicales robotiques d'un même geste sont nécessaires pour sortir de la courbe d'apprentissage (Figure 10)(29). Ces courbes sont variables en fonction des procédures.

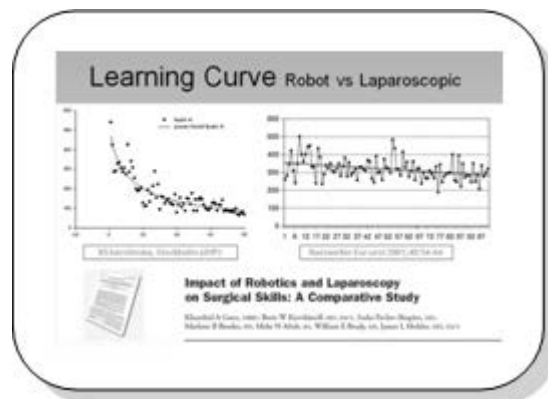


Figure 10: Courbe d'apprentissage des prostatectomies robot

La compagnie *Intuitive Surgical*[®] prévient ses clients : « *Intuitive Surgical*[®] forme à la manipulation du da Vinci Surgical System[®]. Les informations données durant les formations « *Intuitive Surgical training* » ne se substituent pas à une formation médicale ou à une certification. *Intuitive Surgical*[®] n'est en aucun cas responsable de la formation ou de la qualification des chirurgiens et de leurs techniques ou procédures chirurgicales » (<http://www.intuitivesurgical.com/training/>).

IV. Téléchirurgie et *telementoring*

Si l'on reprend l'historique de cette aventure robotique, les premières recherches conduites dans ce domaine l'étaient en 1980 sous l'égide de la NASA avec deux arrière-pensées concernant le développement de la téléchirurgie et de robots autonomes dans l'espace. Les militaires étaient également très intéressés par la chirurgie à longue distance afin de prendre en charge les soldats blessés lors des conflits sans exposer les chirurgiens. Ceci explique l'implication financière dans le développement des premiers télémanipulateurs (21) (27)...

La téléchirurgie à longue distance reste en 2011 un enjeu d'actualité pour plusieurs raisons :

- les conflits, toujours aussi nombreux et dangereux,
- les zones à faible couverture sanitaire (Canada ou USA),
- les zones difficiles d'accès au vu de conditions climatiques.

Toutes ces raisons contribuent à l'instauration d'une égalité des soins pour tous les patients.

Ceci ouvre donc la porte à la télé médecine et la téléchirurgie.

Chapitre 2 :

Chirurgie Robotique

I. Apprentissage de la chirurgie

L'apprentissage actuel de la chirurgie se base sur un modèle de compagnonnage instauré par le Dr William Stewart Halsted (1852-1922), considéré comme le père de la chirurgie aux Etats-Unis (Figure 11) (30).



Figure 11 : William Stewart HALSTED

C'est un nom connu de tous les chirurgiens. L'intervention de « Halsted », (mastectomie totale, résection du grand pectoral et curage axillaire), a été la première intervention qui a permis la guérison des patientes atteintes d'un cancer du sein dans les années 1890.

Il a également été le premier chirurgien à mettre en place un enseignement académique de la chirurgie : « Nous avons besoin d'un système et nous l'aurons, qui produise non pas des chirurgiens, mais les meilleurs chirurgiens ... » (31). Ce modèle basé sur un « *Surgical Residency Training Program* » développé à Baltimore au Johns Hopkins Hospital était composé d'un internat de 6 ans suivi d'un assistantat de 2 ans. Halsted choisissait lui-même ses assistants qui étaient tenus de transmettre leurs connaissances aux plus jeunes. Il demandait à ses élèves, en plus de leur activité de chirurgie, une activité de recherche en pathologie chirurgicale, en bactériologie et en physiologie. Le concept de médecin chercheur était ébauché.

Ce programme d'entraînement a été largement diffusé aux Etats-Unis et en Europe. Il constitue encore notre base de fonctionnement en chirurgie à l'heure actuelle avec un compagnonnage des plus jeunes par les plus expérimentés, chacun à son niveau. L'interne enseigne à

l'étudiant en médecine, l'assistant aux internes et aux étudiants en médecine, les praticiens hospitaliers et professeurs à tous.

Lorsque la coelioscopie est apparue, l'apprentissage s'est fait sur la base de l'auto-apprentissage et donc pour une part aux dépens du patient. Il n'existait pas de centre de formation et tous les chirurgiens devaient pratiquer cette chirurgie mini-invasive sous peine de perdre une partie de leur « patientèle ». Sont alors apparues des complications qui n'existaient pas en chirurgie ouverte, la plus classique était la plaie de la voie biliaire (19).

Une évolution s'est secondairement faite dans les mentalités sur l'apprentissage. Les points de vues éthique, médico-légal et financier ont fait évoluer les sociétés savantes de chirurgie qui ont réfléchi à de nouveaux moyens d'enseignement.

Aux Etats-Unis, la « *Society of American Gastrointestinal and Endoscopic Surgeons* » (SAGES) a mis au point une certification « *Fundamentals of Laparoscopic Surgery* » (FLS) que tout interne doit valider avant de pouvoir prétendre à la pratique de la chirurgie coelioscopique. Ceci peut être apparenté à une sorte de permis de conduire de la chirurgie coelioscopique. Avant d'être reconnus comme des standards de la formation en chirurgie coelioscopique, ces FLS ont été validés par des études conduites sur une durée de 7 ans (32) (33) (34). Ces FLS correspondent à un enseignement théorique sur l'environnement peri, per et post opératoire et un enseignement pratique sur une boîte d'entraînement coelioscopique (35).



**Figure 12 : Boîte d'entraînement de la certification FLS
(2 types d'exercices : déplacement de plots et découpage d'un cercle)**

L'examen final porte sur 6 modules :

- Module 1 : considérations pré-opératoires (matériel, source de lumière...),
- Module 2 : considérations per-opératoires (position du patient, pneumopéritoine...),
- Module 3 : procédures coelioscopiques de base,
- Module 4 : suites post opératoires et complications,
- Module 5 : 5 exercices pratiques (Figure 12 et Figure 13),
- Module 6 : test final.

- A : déplacer des plots
- B : découper une compresse en rond
- C : positionnement d'un endoloop
- D : nœud extra-corporel
- E : nœud intra-corporel

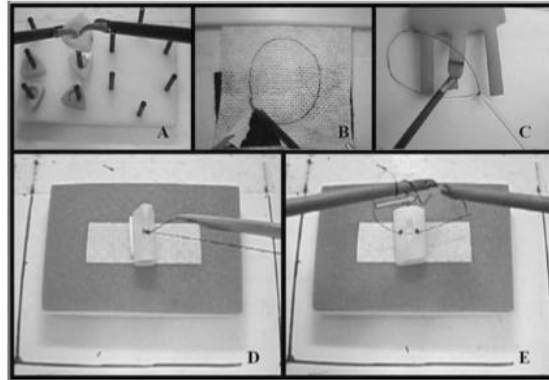


Figure 13 : Exercices pratiques de la certification FLS

Des kits officiels sont commercialisés comprenant la boîte d'entraînement (*training box*), les différents exercices pour l'entraînement et les brochures pour l'enseignement.

L'apprentissage s'est donc, beaucoup développé sur des « *training box* » à partir de 2000 puis sont arrivés sur le marché des simulateurs de chirurgie coelioscopique. Ils contribuent également à la formation des internes sans risque pour le patient. Ces simulateurs aident le jeune chirurgien en formation à acquérir des compétences en coelioscopie pas à pas. Dans un premier temps, il familiarise le jeune chirurgien avec le sens de l'orientation de la caméra et des instruments dans l'espace. Secondairement, il permet la réalisation de petits exercices qui simulent des temps opératoires puis des gestes techniques simples (cholécystectomie) puis de plus en plus complexes (*By Pass* : chirurgie de l'obésité). Cet entraînement se fait sans impact sur un éventuel patient qu'ils opéreraient. Ces simulateurs ont déjà démontré leur utilité dans la formation des plus jeunes (39) (36).

Pour la chirurgie robotique, le problème est encore plus complexe. En effet, la chirurgie robotique ne se conçoit, compte tenu des coûts opératoires, que pour des procédures complexes. Il est donc extrêmement difficile de s'entraîner sur un geste d'emblée difficile à réaliser. Par ailleurs le mode compagnonnage qui se conçoit encore en coelioscopie et qui, à notre avis, demeure indispensable, est plus difficile à mettre en pratique en chirurgie robotique. En effet, le chirurgien est isolé à la console du robot. Il ne peut pas montrer quelque chose dans le viseur à un éventuel apprenant sans se retirer de la console et donc perdre toute maîtrise du geste. Au contraire, en coelioscopie, il est simple de laisser ou de prendre en main une pince ou un crochet. Le geste peut facilement être partagé entre deux chirurgiens. Par ailleurs, le contrôle du robot n'est pas aisé. Il faut apprendre à manipuler la console et les bras, gérer les pannes classiques et adapter son geste à la procédure robotique.

II. Apprentissage de la chirurgie robotique

II.1. Minimum requis

À l'heure actuelle, la pratique de la chirurgie robotique n'est soumise à aucun pré requis et aucune certification tant en Europe et qu'en Amérique du Nord.

Pour rappel, une formation courte et intensive sur 2 jours est proposée et financée par la société « *Intuitive Surgical*[®] » à tous les chirurgiens acquéreurs d'un robot da Vinci[®] (37). Elle est obligatoire et intervient juste avant le début effectif de la pratique chirurgicale robotique. Elle permet un enseignement rapide de la manipulation du robot et des dysfonctionnements pouvant intervenir au cours d'un geste opératoire. Cette formation courte a pour but essentiel de familiariser le chirurgien avec la machine et sa manipulation.

La formation repose ensuite sur le « *proctoring* » qui consiste en un accompagnement dans la réalisation d'une procédure chirurgicale spécifique. Le chirurgien en formation reçoit l'aide d'un expert sur quelques interventions. Puis il continue seul son apprentissage, ce qui peut se faire aux dépens de la qualité des soins. En effet, il est considéré que 20 à 30 procédures chirurgicales robotiques d'un même geste sont nécessaires pour « sortir » de la courbe d'apprentissage et de la zone critique.

Pour notre part, il nous semble que cette mise en situation seule, n'est pas suffisante et compatible avec la pratique de la chirurgie robotique en toute sécurité. Un encadrement est indispensable afin d'éviter l'apprentissage « isolé » qui a conduit à de nombreuses complications lors de l'introduction de la coelioscopie dans les pratiques chirurgicales dans les années 1990.

II.2. Enseignement et apprentissage

A l'heure actuelle, l'École de Chirurgie de Nancy, sous l'égide du Pr Hubert (38), nous proposons un enseignement inter-universitaire de chirurgie robotique. Il vise, dans un premier temps, à donner une formation de base du maniement du robot da Vinci[®]. Puis l'enseignement se fait par spécialités, afin d'appréhender correctement le geste robotique.

L'enseignement se déroule sur 2 semaines, à l'École de Chirurgie de la Faculté de Médecine de Nancy, selon 3 axes :

- 1 : Cours théoriques
- 2 : Enseignement pratique qui se répartit selon trois activités pédagogiques :
 - entraînement sur un simulateur de chirurgie robotique : dV-Trainer[®],
 - entraînement de micro-chirurgie,
 - entraînement sur le robot da Vinci[®] en Dry Lab et Wet Lab.
- 3 : Enseignement au bloc opératoire avec un expert dans la spécialité du chirurgien, avec des mises aux points sur les spécificités de chaque procédure.

Ce DIU s'adresse aux futurs chirurgiens projetant l'acquisition prochaine d'un robot ou en ayant fait l'acquisition récente. Pour l'année universitaire 2011-2012, nous avons totalisé 45 inscrits.

III. Développement de nouvelles pratiques en chirurgie robotique

III.1. Essor de la chirurgie ORL

La chirurgie carcinologique ORL et notamment la prise en charge des cancers du larynx posait d'importants problèmes de séquelles qui ont permis une évolution de la prise en charge au cours du siècle passé. Initialement, une laryngectomie totale était systématique, puis elle a laissé la place dans les cas les plus favorables à une hémi-laryngectomie par abord trans-cervical pour finalement évoluer vers l'utilisation du laser par voie trans-orale afin de réaliser la laryngectomie partielle. Cette expérience de l'abord trans-oral pour la chirurgie par laser a permis de mettre au point une technique expérimentée pour la première fois en 2005, par une équipe américaine : laryngectomie robot assistée. Weinstein a décrit la première laryngectomie supra-glottique par abord trans-oral chez le chien, geste conduit avec succès grâce au robot da Vinci[®] (39). L'expérience a secondairement été promue, puis s'est largement développée chez l'homme (44) (8).

III.2. Développement de nouvelles pratiques en gynécologie

La chirurgie robotique se développe également en gynécologie, essentiellement aux USA avec un nombre croissant d'hystérectomies pour lésion bénigne ou pour cancer de l'utérus réalisées en chirurgie robotique. Dans le cas des hystérectomies pour lésions bénignes, il n'a pas été démontré de bénéfice pour la patiente, à utiliser le robot (40). Cependant, dans la pathologie cancéreuse et

notamment les cancers de l'endomètre, la laparoscopie est une technique certes réalisable mais souvent complexe en raison de la nécessité de réaliser un curage lymphatique. La courbe d'apprentissage est longue et de nombreuses équipes restent donc à l'abord par voie ouverte. Il semble que le robot puisse apporter une aide considérable dans la réalisation du curage lymphatique. La durée opératoire d'une hystérectomie par laparotomie est plus courte qu'en chirurgie robotique. Cependant, ce temps est équivalent voire plus court en robotique que par voie coelioscopique (41)(42). Et le robot semble aux USA, promouvoir l'abord mini-invasif dans cette pathologie complexe qu'est le cancer de l'utérus.

IV. Téléchirurgie et *Telementoring* à grande distance

Ces deux modalités de chirurgie robotique introduisent une distance plus ou moins importante entre le chirurgien et le patient. Le télémanipulateur da Vinci® a rompu le lien physique entre le chirurgien et son patient en intercalant entre les deux une console, un ordinateur, une connectique et une colonne sur laquelle s'articulent les bras du robot. Cependant, cette distance à l'heure actuelle est classiquement de quelques mètres, mais pourrait augmenter pour conduire à un geste de téléchirurgie à longue distance.

Une première expérience humaine de téléchirurgie à longue distance a été conduite en 2001. Il s'agissait de l' « Opération Lindbergh », un geste chirurgical trans-atlantique (Figure 14).

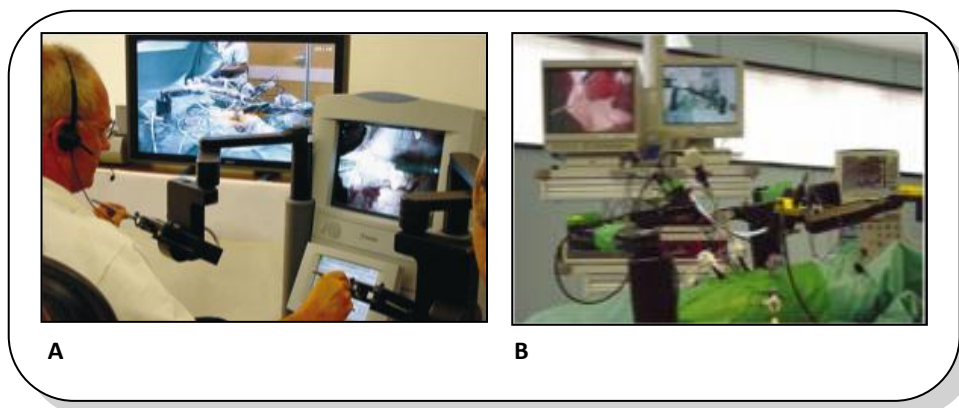


Figure 14 : Opération Lindbergh, chirurgien à New York (A), patient à Strasbourg (B)

Un chirurgien français opérait depuis New York City une patiente anesthésiée dans un bloc opératoire à Strasbourg. Il a procédé à une cholécystectomie, intervention qui consiste à retirer la vésicule biliaire. Le chirurgien se trouvait à plus de 6000 km de sa patiente. L'intervention s'est déroulée sans problème particulier en 54 minutes. Avant le geste chirurgical sur l'humain des pré-tests

avaient été réalisés sur des modèles animaux pour s'assurer de la fiabilité des réseaux. Cet « exploit » a été réalisé grâce au robot Zeus[®]. Le chirurgien manipulait la console du robot qui était localisée à New York et commandait les bras articulés du robot porteur des instruments chirurgicaux à Strasbourg. Du point de vue technique, une connexion optique à haut débit était nécessaire entre New York et Strasbourg, connexion qui permettait le transit des informations visuelles, auditives et des commandes de la console vers les bras articulés. Cette connexion était doublée d'un relais satellitaire afin de sécuriser au maximum l'intervention. La connexion se faisait dans le sens New York - Strasbourg et Strasbourg – New York. En effet, le chirurgien doit pouvoir visualiser le geste qu'il fait quasiment en direct et la connexion doit être sécurisée car une quelconque interruption peut être délétère pour le patient. La transmission devait par ailleurs être la plus rapide possible pour ne pas perturber le geste. La latence de réception de la vidéo par le chirurgien était de 155 millisecondes. Il doit s'agir, cependant, de l'intervention chirurgicale la plus chère au monde. En effet, afin d'en garantir le succès en toute sécurité, la transmission des informations (vidéos et commandes des manettes) était assurée par des fibres optiques terrestres à haut débit dédiées de France Télécoms[®] et une transmission satellitaire de secours y était associée. 40 personnes, notamment des ingénieurs, étaient mobilisées pour cette intervention. Elle a démontré la faisabilité de la téléchirurgie à longue distance. Cependant, ce modèle n'est pas applicable au quotidien, au vu du surcoût que cela entraîne. Il convient donc d'identifier les facteurs limitant de cette expérience.

La première contrainte est une contrainte liée au volume à transmettre qui implique l'utilisation de fibres optiques dédiées. Les données à transmettre sont visuelles (les plus importantes), auditives (de communication entre les deux sites) ainsi que les informations de commande des bras du robot (en provenance des *joysticks* et des pédales). La vision du robot est une vision 3D obtenue grâce à deux endoscopes tri CCD fournissant des vidéos à un débit de 270 Mbits/s chacune, soit un volume de 540 Mbits/s pour les deux. Ceci représente le volume d'informations à transmettre uniquement pour la partie vidéo, d'où la nécessité de fibres optiques hauts débits dédiées.

La deuxième contrainte est la contrainte de latence. Elle représente le temps entre la réalisation d'un geste à New York sur la console, l'arrivée de la commande à Strasbourg, et le retour de l'information visuelle de l'impact du geste, à New York. La latence est impactée par la distance entre les deux sites et le volume d'informations à transmettre.

Chapitre 3 :

Evolution de la Chirurgie Robotique à Nancy

À Nancy, la chirurgie robotique représente une activité importante, qui ne cesse de croître. Elle intéresse à la fois l'activité de soin, l'enseignement et la téléchirurgie à longue distance. Une recherche active est menée sur ces différents thèmes.

I. Historique de la chirurgie robotique à Nancy

I.1. Installation du robot

Le CHU de Nancy a été un des premiers centres hospitaliers en Europe à acquérir le robot Da Vinci® en 2000. Le but premier était de développer la chirurgie cardiaque mini-invasive et notamment les pontages à cœur battant. Cependant, ce robot a été mutualisé entre différentes équipes de chirurgie : urologie, digestive, cardiaque et gynécologique. À l'heure actuelle, les gestes les plus couramment réalisés le sont en urologie (prélèvement de rein sur donneurs vivants, syndrome de la jonction pyélo-urétérale, néphrectomie partielle...) et en chirurgie digestive (promonto-fixation pour prolapsus, By Pass, surrénalectomie complexe...). Plus de 1300 interventions ont été réalisées en 10 ans.

I.2. Apprentissage des chirurgiens pionniers

En 2000, lors de l'acquisition du robot, une discussion a été conduite pour envisager la formation à cette « nouvelle » technologie. En l'absence d'expérience mondiale antérieure, les chirurgiens nancéiens ont décidé de réaliser un apprentissage par étapes. Ceci s'est déroulé pendant un an à l'École de Chirurgie de l'Université Lorraine où le robot avait été installé. La première partie était basée sur l'apprentissage de la maîtrise du robot. Ils réalisaient des exercices sur des kits d'entraînements. L'étape suivante a consisté à réaliser des gestes sur des modèles porcins (Figure 15).



Figure 15 : Début de la chirurgie robotique à Nancy sur modèles porcins

Le robot avait été installé à l'École de Chirurgie à la Faculté de Médecine de Nancy. Après un an de formation individuelle, la première intervention robot assistée a été réalisée en novembre 2001 dans d'excellentes conditions de sécurité. Il s'agissait d'une cholécystectomie. Les suites post-opératoires ont été simples. Les chirurgiens nancéiens sont devenus depuis, des experts de cette chirurgie robotique, chacun dans sa spécialité. Tirant parti de cette expérience, un enseignement universitaire de la chirurgie robotique a été mis en place à Nancy sous forme de DIU de chirurgie robotique.

I.2.1. Enseignement à Nancy

Du point de vue de la pratique quotidienne, afin de ne pas reproduire les erreurs faites lors de l'apparition de la coelioscopie, une réflexion a dû être menée sur l'apprentissage de la chirurgie robotique. Cet apprentissage doit permettre l'adaptation du chirurgien à cette nouvelle technologie. Ceci justifie notre axe de recherche basé sur la gestion de l'activité d'enseignement pour autonomiser le plus rapidement possible les chirurgiens et diminuer l'impact des courbes d'apprentissage des procédures complexes sur les premiers sujets.

En effet, le modèle Halstedien d'apprentissage par compagnonnage est difficilement applicable en chirurgie robotique pour plusieurs raisons :

- coût élevé de l'heure de chirurgie robotique
- faible disponibilité des robots qui sont mutualisés entre plusieurs équipes
- complexité des procédures qui ne se prêtent pas à un enseignement au bloc opératoire.

D'autres solutions doivent donc être trouvées. En parallèle des simulateurs de chirurgie coelioscopique qui sont à l'heure actuelle nombreux, deux simulateurs virtuels de chirurgie robotique ont vu le jour : le *Robotic Surgical Simulator RoSS*[®] (Figure 16) créé par la firme *Simulated Surgical Systems*[®] et le *dV-Trainer*[®] (Figure 17) créé par la firme *MIMIC Technologies*[®]. Ce dernier a été installé sur la double console du robot da Vinci SI[®] (Figure 18). Ils présentent de nombreux atouts, notamment leurs faibles coûts d'utilisation après acquisition, leurs disponibilités et le caractère objectif de l'évaluation rendue.



Figure 16 : Simulateur de chirurgie robotique RoSS[®]



Figure 17 : Simulateur de chirurgie robotique dV-Trainer[®]



Figure 18 : Surgical Simulator System installé sur la console du da Vinci SI[®]

Compte tenu de l'expérience de l'École Nancéenne en chirurgie robotique, un DIU de chirurgie robotique a été créé en 2008 sous la direction du Pr. HUBERT. Ce DIU intègre plusieurs thématiques, qui ont évolué dans le temps, notamment grâce à la recherche réalisée de manière concomitante. L'une d'elle est basée sur l'apprentissage sur simulateur de chirurgie robotique.

À Nancy, nous avons fait l'acquisition de trois simulateurs de chirurgie robotique. Ces simulateurs dV-Trainer[®] (Figure 19), conçus par la firme *MIMIC Technologies*[®] (Seattle-US). Ils reproduisent la console d'un robot da Vinci[®].



Figure 19 : Console du dV-Trainer[®]

Chaque simulateur dispose de 35 exercices virtuels afin de s'entraîner (Figure 20). Ce simulateur permet de se familiariser avec la gestuelle particulière de la chirurgie robotique par l'intermédiaire des joysticks, y associant l'utilisation concomitante des commandes aux pieds par des pédales.



Figure 20: Exercices virtuels sur le dV-Trainer®

Si les simulateurs sont des outils de certification reconnus en coelioscopie, ils sont en cours de développement pour la robotique. Un des objectifs de cette thèse a été d'évaluer la validité évidente, de contenu, de construction et la validité concurrente du simulateur de chirurgie robotique dV-Trainer® dans sa version de décembre 2009 pour déterminer si ses caractéristiques étaient compatibles avec les exigences d'une certification. Nous avons également introduit une pratique de micro-chirurgie dans cet enseignement.

I.2.2. Pratique quotidienne

Hormis une pratique chirurgicale soutenue de chirurgie robotique qui est mutualisée entre plusieurs spécialités digestive, urologique, gynécologique, vasculaire et ORL, la recherche en chirurgie robotique s'est développée autour de plusieurs axes concernant tant la pratique quotidienne que l'enseignement ou la téléchirurgie à grande distance.

I.2.2.a) Ergonomie

La recherche en chirurgie robotique suit plusieurs axes à Nancy. Du point de vue de la pratique quotidienne, une étude sur l'ergonomie a été menée à l'École de Chirurgie par le Dr Nicolas HUBERT conjointement avec l'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité). Elle a consisté à comparer l'ergonomie des chirurgiens lors de la réalisation d'un même geste par voie coelioscopique et par voie robotique. La comparaison a permis de mettre en évidence des contraintes se répartissant différemment entre les deux techniques.

I.2.2.b) DIU de pédagogie

Dans le cadre du DIU de Pédagogie Médicale de l'Est nous avons réalisé avec le Dr Colnat une étude sur la formation des chirurgiens en chirurgie robotique. Ce mémoire a été réalisé en 2008 sous l'égide du Pr HUBERT et du Dr PERNET. Ce travail a permis d'analyser l'opinion des chirurgiens utilisant le robot da Vinci® en France sur leur formation pour, secondairement, proposer une trame d'enseignement.

Nous avons envoyé à chaque chirurgien recensé un questionnaire contenant des items d'ordre général sur l'activité propre de chacun et des items spécifiques à la formation reçue. 52% des chirurgiens ont répondu. Les chirurgiens avaient entre 40 et 60 ans. L'activité publique était prédominante. Les urologues (45,2%) et les chirurgiens digestifs (23,8%) étaient les principaux utilisateurs du robot. Aucun chirurgien ne travaillait seul et 69% des chirurgiens avaient bénéficié de la formation dispensée par l'IRCAD (Institut de Recherche contre les Cancers de l'Appareil Digestif), où les carences principales qui ressortaient étaient les problèmes spécifiques d'installation et de positionnement des trocars. 60% des chirurgiens avaient fait appel à un expert, pour les former à un geste spécifique.

La première notion qui se dégageait de l'analyse des données était la distinction faite entre l'apprentissage du fonctionnement du robot et l'apprentissage spécifique d'une intervention chirurgicale. Et c'était l'application en pratique clinique qui semble être le secteur le moins bien développé lors de la formation. L'expert et le compagnonnage apparaissent comme des bases solides pour l'apprentissage. À partir de ce questionnaire et d'une revue de la littérature, nous avons proposé une trame pouvant servir de base à un enseignement de type universitaire de la chirurgie robotique.

I.2.2.c) Chirurgie robotique et neurochirurgie

Le Dr Colnat, neurochirurgien au CHU de Nancy, a participé à une étude visant à évaluer l'impact de la maîtrise d'une activité de micro-chirurgie sur les performances de prise en main du robot da Vinci®. De cette expérience, nous est née l'idée d'étudier à l'Ecole de Chirurgie de l'Université Lorraine la faisabilité d'un geste de neurochirurgie crânienne par voie robotique, sur pièce anatomique fournie par le département d'Anatomie.

La pièce anatomique a été installée en position latéral et nous avons réalisé une craniotomie conventionnelle ptérionale droite afin d'accéder au lobe temporaire droit. Le robot a été positionné arrivant latéralement par rapport à la pièce et les instruments à environ 10 cm au dessus de la craniotomie avec une caméra sur le bras central, un ciseau bras gauche et un mini *grasper* bras droit (le neurochirurgien étant gaucher). Nous avons testé le robot en utilisant 3 bras sur les 4 disponibles, car une tentative avec le 4^{ème} bras entraînait un encombrement trop important de l'espace. Ceci a mis en exergue la nécessité d'utiliser des instruments de petites tailles du type de ceux utilisés en chirurgie

robotique ORL (Figure 21). De plus, l'encombrement consécutif au positionnement des bras nécessite probablement de réaliser une craniotomie légèrement plus grande qu'habituellement.

Figure 21 : Microforceps et ciseau de 5mm avec articulation curviligne utilisés en ORL



I.2.3. Téléchirurgie et *Telementoring* : Projet RALTT

I.2.3.a) Introduction

L'activité de recherche que je mène à l'heure actuelle dans le cadre de ma thèse des universités est intégrée pour partie dans le cadre du projet « *Robotic Assisted Laparoscopic Telementoring and Telesurgery* » (RALTT). Ce projet a vu le jour en 2005 et il porte sur la faisabilité de la Téléchirurgie et du *Telementoring* à longue distance. Le terme de *Telementoring* est probablement moins familier que celui de Téléchirurgie. Le concept du *Telementoring* représente l'assistance que peut apporter un mentor ou expert en chirurgie robotique au cours d'une procédure de chirurgie robotique complexe réalisée par un chirurgien non expert. Ce « *proctoring* », en dehors de la chirurgie robotique, a été étudié par Ereso dans le cadre de gestes réalisés par des internes sur des modèles animaux présentant des traumatismes graves. Le « *proctoring* » était réalisé par des experts en chirurgie par l'intermédiaire d'une plateforme assurant des possibilités de pointage de zones opératoires et une transmission d'information et de conseils par voie vocale (45). En résultats globaux, l'auteur décrit de meilleures performances chez les jeunes chirurgiens lorsqu'ils étaient guidés par les seniors.

Cependant, dans le cadre de la chirurgie robotique, ce « mentor » peut se trouver à plusieurs milliers de kilomètres du chirurgien qui souhaite un soutien. Ceci représente la possibilité d'amener en temps quasi réel une assistance chirurgicale délivrée par un expert à un chirurgien non-expert sur une procédure chirurgicale complexe. Ceci peut s'envisager dans des régions rurales reculées où des

chirurgiens peuvent être confrontés à des gestes complexes qu'ils ne maîtrisent pas entièrement. Mais cela peut avoir un intérêt considérable sur les lieux de conflits armés. En effet, les blessures de guerre et notamment celles par déflagration peuvent entraîner des dommages corporels majeurs et diffus avec atteintes neurologique, thoracique, digestive...Ceci peut impliquer la nécessité d'expert pour la prise en charge de tels polytraumatisés. Cependant, il est inconcevable d'envisager la présence de chirurgiens hyper-spécialisés à proximité de chaque conflit armé. Le robot peut à ce moment servir d'interface entre le chirurgien de formation générale présent à proximité de la zone de conflit et les experts qui sont dans leur centre hospitalier. Le robot permet un partage en temps réel des images et des communications. Les deux chirurgiens possédant un robot da Vinci®, ce dernier joue alors le rôle d'interface. Il permettrait la transmission de conseil par voie orale, mais également une prise en main directe du problème par le chirurgien expert lors d'un moment critique. D'où l'intérêt d'étudier la faisabilité de ces deux pratiques que sont la Téléchirurgie et le *Telementoring*.

I.2.3.b) Problématique

La problématique de la Téléchirurgie est exposée dans la Figure 22. L'élément limitatif dans ce type d'intervention en téléchirurgie ou *telementoring* à longue distance est représenté par le volume d'informations visuelles et sonores à transmettre (du patient vers la console), associé au flux de commandes du robot (de la console vers le patient).

En effet, le robot assure une vision binoculaire, grâce au flux de 2 caméras tri-CCD, chacune ayant un débit de 270 mégabits par seconde (Mbits/s).

Pour assurer cette transmission, trois options sont donc ici envisageables :

- soit on augmente la latence de transmission,
- soit on diminue le volume d'information à transmettre,
- soit on augmente les capacités du réseau à transmettre.

Notre hypothèse de travail pour rendre la téléchirurgie facilement accessible est d'envisager d'utiliser le réseau internet même si ce dernier, en l'état actuel des choses, n'est pas compatible avec des transmissions de procédures chirurgicales (réseau sans sécurité et confidentialités de transmission, risque de perte d'information lors de la transmission).

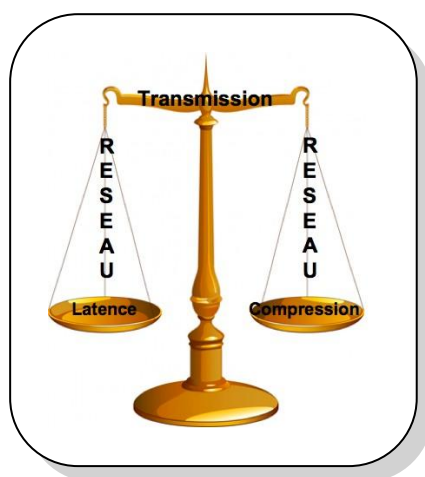


Figure 22 : problématique de la téléchirurgie

I.2.3.c) Partenaires

Les travaux présentés dans ce troisième chapitre sont issus d'une étroite collaboration au sein du projet RALTT dirigé par le Pr. J. Hubert, entre des intervenants du monde scientifique du Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN) et du monde médical du CHU de Nancy.

Plusieurs stagiaires et un doctorant ont participé à ces travaux :

Christophe BURLLOT, élève ingénieur inscrit en Master au CRAN qui travaillait sur la compression de vidéos médicales.

Frédéric QUIAIOS, élève ingénieur inscrit en Master II au CRAN avec qui je travaillais, dans le cadre de mon Master II, pour développer une plateforme d'essai afin de tester l'impact du retard sur un geste chirurgical.

J'ai principalement travaillé avec Nedia NOURI, ingénieur qui a effectué sa thèse en parallèle de la mienne. Elle a soutenu sa thèse en 2011 sur la thématique de la compression d'image pour le milieu médical. Cette collaboration s'est faite dans le cadre du projet RALTT.

Mlle Nedia NOURI était encadrée par :

Pr. Jean Marie MOUREAU, du CRAN, spécialiste en compression d'images médicales,

Mr Denis ABRAHAM, spécialiste des essais subjectifs pour le monde de la télévision grand public,

Pr. Michel DUFAUT, spécialiste en traitement du signal.

Cette collaboration a permis de conduire de nombreux travaux tous en rapport avec la téléchirurgie à longue distance, notamment sur l'impact du délai de transmission des informations vidéos et sur la nécessité d'introduire une compression de ces vidéos chirurgicales pour diminuer les contraintes réseaux lors de la transmission des flux.

2^{ÈME} PARTIE :

ENSEIGNEMENT DE LA CHIRURGIE ROBOTIQUE

Introduction

La chirurgie robotique est une technique chirurgicale en plein essor. Son usage a connu une forte croissance en urologie, croissance qui s'étend à de nombreuses autres spécialités tels que la gynécologie (7), la chirurgie digestive (6), cardiaque (10), pédiatrique (43) et ORL (44)(8). Le robot, terme utilisé par abus de langage, est en fait un télémanipulateur assisté par ordinateur. Cette plateforme robotique de type maître-esclave sert à coupler la précision du système robotique à l'habileté et à la capacité de réaction du chirurgien. Le da Vinci[®] est un outil-instrument auquel a été intégrée une part de réalité augmentée (44). La réalité augmentée grâce aux améliorations techniques qu'elle fournit, augmente les capacités perceptives et psychomotrices du chirurgien.

Une procédure chirurgicale robotisée diffère donc d'une simple transposition d'une procédure classique par voie coelioscopique en raison de l'interface entre le chirurgien et son patient : le robot. De cette interface homme-machine naît une complexification première du geste qui va nécessiter, comme pour la conduite automobile ou le pilotage d'un avion, une familiarisation avec la machine afin d'acquérir les automatismes nécessaires.

Ceci nous permet d'envisager un apprentissage en chirurgie robotique se décomposant en deux parties : la première permettant une adaptation à la gestuelle spécifique du robot et la deuxième concernant directement le geste chirurgical et le déroulement spécifique de la procédure.

Le modèle halstedien (45)(31), basé sur le compagnonnage de jeunes chirurgiens non expérimentés avec des chirurgiens plus expérimentés fonctionne très bien pour l'apprentissage de la chirurgie coelioscopique. Depuis plusieurs années lui est associé un apprentissage sur simulateurs de chirurgie coelioscopique qui ont démontré leur validité quant à la formation des jeunes chirurgiens. Ils permettent un apprentissage en dehors du bloc opératoire.

En revanche, le modèle halstedien ne peut constituer le socle de l'apprentissage de la chirurgie robotique pour plusieurs raisons :

- Le coût élevé de l'heure de chirurgie robotique
- La faible disponibilité des robots qui sont mutualisés entre plusieurs équipes
- La complexité des procédures qui ne se prêtent pas d'emblée à un enseignement au bloc opératoire.

Une solution partielle pourrait partiellement être apportée par le dernier modèle du robot da Vinci Si[®] qui est équipée d'une double console qui permettra d'opérer à deux chirurgiens. Cette deuxième console permettrait un partage de l'expérience chirurgicale entre deux chirurgiens et un enseignement sur le mode du compagnonnage, mais augmente le coût d'achat du robot de 400 000

dollars. Par ailleurs de nombreux robots sont déjà installés et trop anciens pour avoir une double console.

L'utilisation d'un simulateur de chirurgie robotique prend, alors, tout son intérêt.

Trois simulateurs virtuels de chirurgie robotique sont actuellement sur le marché : le *Robotic Surgical Simulator - RoSS*[®] (46) créé par la firme *Simulated Surgical Systems*[®], le dV-Trainer[®] créé par la firme *MIMIC Technologies*[®] (47) et le simulateur *da Vinci Surgical Skill*[®] disponible sur la console da Vinci Si[®]. Ce dernier est une adaptation du dV-Trainer[®] sur une authentique console du robot qui est fournie en double exemplaire.

Ces simulateurs présentent de nombreux atouts, notamment leurs faibles coûts d'utilisation après acquisition, leurs disponibilités et le caractère objectif de l'évaluation rendue. Cependant, avant de les intégrer dans des modalités d'apprentissage, il est impératif de s'assurer de leur validité. Pour notre part, nous nous sommes plus spécifiquement intéressés au dV-Trainer[®], et nous en avons étudié la validité afin de confirmer la possibilité de l'intégrer dans une formation multimodale en chirurgie robotique.

Nous avons testé le dV-Trainer[®] sur différents exercices et en étudiant en parallèle l'influence de l'expérience en micro-chirurgie des chirurgiens sur la maîtrise de l'outil. Nous avons mis en évidence dans un petit groupe de micro-chirurgiens de meilleures performances sur le dV-Trainer[®] comparé aux autres chirurgiens. Nous avons donc réalisé une étude mesurant l'impact des performances sur dV-Trainer[®] corrélée à la présence ou l'absence d'une expérience antérieure en micro-chirurgie.

Dans ce chapitre, nous avons évalué d'une part l'intérêt et la validité du dV-Trainer[®] pour une formation en chirurgie robotique, et d'autre part l'intérêt de la micro-chirurgie dans cet apprentissage de la chirurgie robotique.

Chapitre 1 :

Évaluation du Simulateur

de Chirurgie Robotique dV-Trainer®

I. Introduction

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'un master II de recherche par Cyril Perrenot, interne de chirurgie générale que nous avons encadré.

Ce travail a été accepté pour publication dans *Surgical Endoscopy* (48).

Comme nous l'avons brièvement vu dans le chapitre I, la chirurgie robotique nécessite un apprentissage spécifique et ne se conçoit pas comme une simple transposition de la coelioscopie. L'apprentissage aux dépens du patient n'est plus concevable à l'heure actuelle sur le plan éthique, juridique et financier.

En effet, pour la sécurité du patient et la protection juridique des praticiens, il est indispensable que le chirurgien bénéficie d'une formation validée avant de débiter une nouvelle pratique chirurgicale.

Cette formation en chirurgie robotique peut s'appuyer sur un simulateur de chirurgie robotique. Nous nous sommes plus particulièrement intéressés au modèle commercialisé par la firme le dV-Trainer® -MIMIC Technologies® (Figure 23).

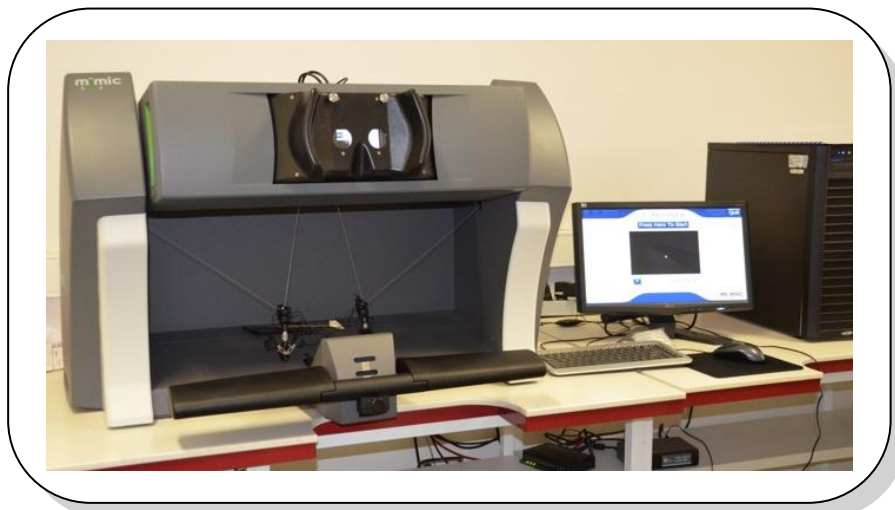


Figure 23 : dV-Trainer® commercialisé par la firme MIMIC Technologies®

L'objectif de cette étude a été de tester la reproductibilité et la validité du simulateur de chirurgie robotique dV-Trainer® (MIMIC Technologies®) comme outil d'évaluation des compétences spécifiques à la chirurgie robotique de manière à démontrer son intérêt dans le développement d'une formation certifiée.

Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur une revue récente de la littérature concernant les simulateurs de coelioscopie, réalisée par Van Nortwick (49), reprenant 83 études, qui a résumé les critères de qualité à respecter dans ce type d'étude sur la validité des simulateurs.

Le terme validité représente la capacité d'un instrument à mesurer avec justesse ce dont il est sensé rendre compte (50). Cette validité du dV-Trainer® à former et à évaluer les chirurgiens à la chirurgie robotique se décline en plusieurs types de validités, que nous allons détailler. Elle est associée au contrôle de la fiabilité ou reproductivité du dV-Trainer®.

Pour tester la validité du dV-Trainer®, plusieurs méthodes ont été établies (49) :

Le réalisme (face validity) : il est déterminé par des experts qui jugent du réalisme des tests. Il s'agit d'une évaluation potentiellement subjective de l'outil.

La validité de construction : vérifie que l'outil élaboré est capable de mesurer l'habileté, les qualités et les performances pour lesquelles il a été mis au point. Une des traductions va être sa capacité à différencier un expert d'un novice dans les tests réalisés. « Vérifier que le dV-Trainer® est capable de faire la différence entre un chirurgien expert et un novice en chirurgie robotique ».

La validité de contenu (concurrente) : elle vise à analyser les différents tests du dV-Trainer® afin de s'assurer qu'ils évaluent correctement les aptitudes et l'habileté des chirurgiens vis-à-vis d'une référence. « L'évaluation faite par le dV-Trainer® est-elle comparable aux résultats obtenus sur un outil de référence avec des critères de référence ? » Le degré de corrélation entre les deux tests représente le degré de validité concurrente ou de contenu. Dans cette étude, nous avons comparé les performances des participants entre leur geste évalué sur le dV-Trainer® et le même geste réalisé avec le da Vinci®. Pour l'évaluation sur le robot da Vinci® nous nous sommes largement inspirés des critères GOALS (51) que nous avons légèrement modifiés pour les appliquer à la chirurgie robotique.

La validité prédictive : évalue si l'outil permet de prédire le trait de caractère en situation. « Le dV-Trainer® est-il capable de prédire les performances des chirurgiens sur le robot da Vinci® ? » À l'heure actuelle, cette validité n'a pas été étudiée pour le dV-Trainer®.

La reproductibilité (reliability) : capacité d'un instrument de mesures dont les résultats obtenus d'essais indépendants et dans des conditions identiques, demeurent stables. « Ceci se vérifie

lorsqu'un exercice appliqué deux fois au même sujet permet d'obtenir des résultats presque similaires». Ces tests doivent être réalisés en dehors des courbes d'apprentissage.

Pour cette étude, nous avons donc testé, la reproductibilité, le réalisme, la validité de contenu, la validité construction de façon concomitante.

II. Matériel et Méthode

II.1. Le dV-Trainer[®]

Le simulateur de chirurgie robotique dV-Trainer[®] (MIMIC Technologies[®]) (Figure 24) dans sa version (version Beta 1.0.0.1132) est composé :

- Une plateforme Mantis Duo II [1], système d'haptique [8] à câble (similaire aux *joysticks*) qui permet de reproduire les sensations des manipulateurs du robot da Vinci[®]. Les 7 degrés de liberté sont obtenus grâce à des câbles reliés à des moteurs qui permettent 3 degrés de liberté (vertical, horizontal, profondeur), à une pince qui permet l'ouverture et la fermeture de l'instrument et grâce à un système électromagnétique qui permet 3 rotations (axiale, longitudinale et transversale). De la force appliquée sur chacun des 8 moteurs, il est possible de déduire la position du manipulateur. L'information positionnelle transmise par le système électromagnétique situé sur le manipulateur donne l'orientation de la pince et son état d'ouverture.
Cette plateforme est reliée via un « routeur » [7] à un ordinateur sur lequel fonctionne le logiciel.
- Un stéréoscope [2] permettant une vision en 3D de l'image produite par le logiciel recréant les sensations de la console du robot da Vinci[®].
- Un ordinateur [3] sur lequel est installé le logiciel dV-Trainer[®] qui offre un vaste choix d'exercices. Ce logiciel offre la possibilité de suivre **la progression** des performances des étudiants à l'aide d'une interface très intuitive et facile d'utilisation. Il permet de personnaliser les programmes d'entraînement de chaque chirurgien.
- Un écran de contrôle [4] sur lequel est affichée, grâce à un splitter [6], l'image de l'œil droit du stéréoscope.
- Un pédalier [5] composé de 5 pédales, réplique exacte de celui du robot Da Vinci S[®] qui permet de commander le robot selon les modalités exactes du robot réel.

Il propose des exercices d'entraînement dans un environnement virtuel 3D. Trois simulateurs ont été utilisés pour cette étude.

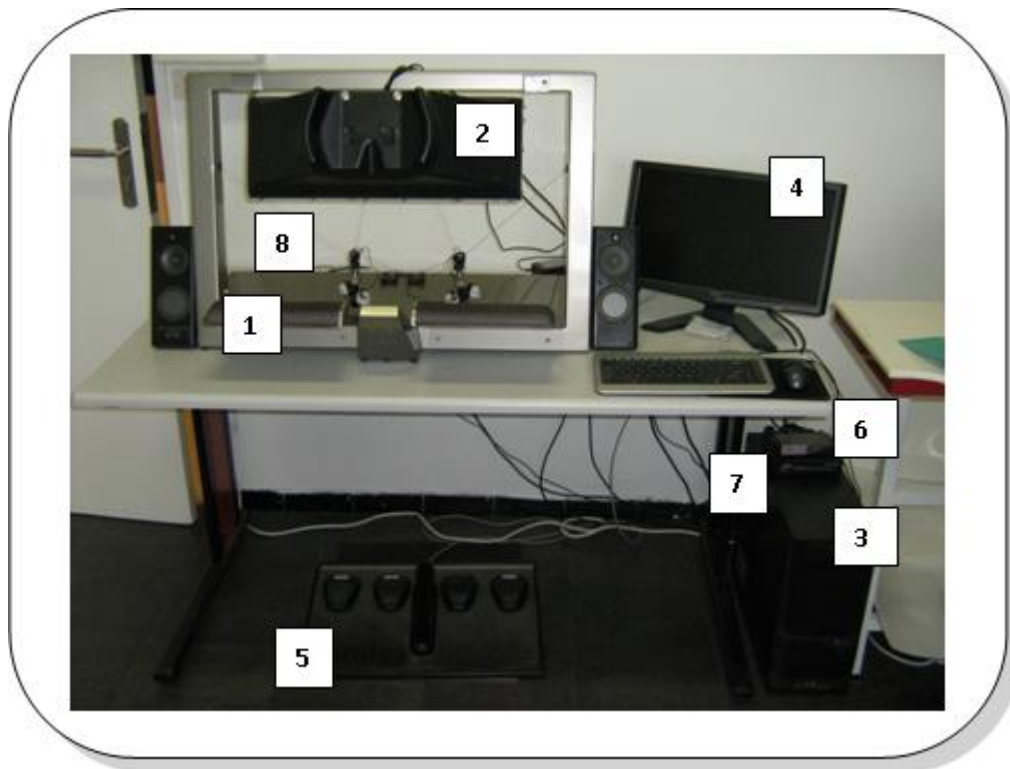


Figure 24 : Différents composants du simulateur de chirurgie robotique dV-Trainer®

II.2. Les exercices

Dans un premier temps, nous avons sélectionné cinq exercices parmi les quinze proposés. Pour cela, cinq objectifs pédagogiques prioritaires correspondant aux compétences spécifiques de la chirurgie robotique ont été définis et pour chacun d'eux, un exercice a été choisi sur l'avis de chirurgiens experts en robotique. Les cinq exercices étaient toujours réalisés dans le même ordre.

- **Pick and Place** : (Figure 25a) Perception en 3D : consiste à placer des plots rouges, bleus, ou jaunes dans la boîte de couleur correspondante,
- **Peg Board** : (Figure 25b) Débrayage : consiste à saisir des anneaux placés sur un support vertical avec la main gauche, puis à les transférer dans la main droite, pour les placer sur un plot,
- **Ring et Rail** : (Figure 25c) Retour de force visuel : consiste à déplacer un anneau le long d'une tige métallique sinueuse en évitant d'appliquer une force excessive sur l'anneau ou sur la tige,
- **Match Board** : (Figure 25d) *Endowrist* manipulation (maîtrise des instruments articulés) : consiste à positionner précisément sur un tableau à neuf cases des chiffres et des lettres,

- **Camera Targeting** : (Figure 25e) Manipulation de la caméra : consiste à focaliser la caméra sur différentes sphères bleues réparties dans une large cavité pelvienne.

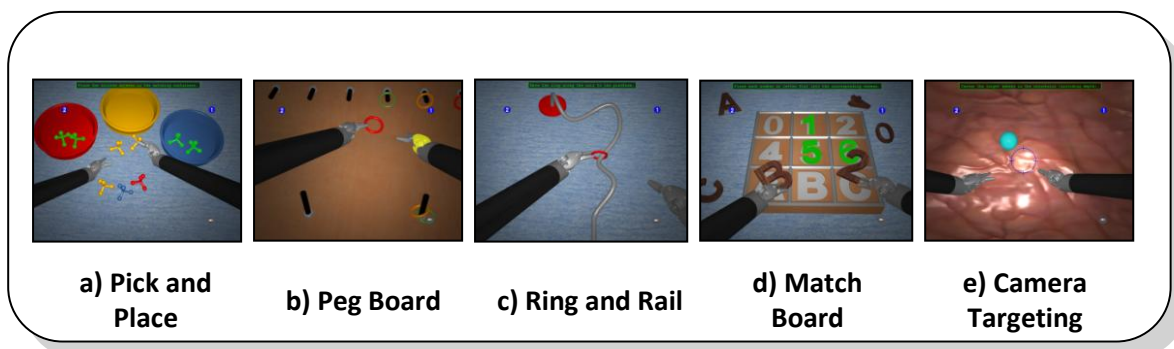


Figure 25 : 5 exercices réalisés au dV-Trainer®

II.3. Les participants

Soixante-quinze sujets ont été inclus dans 5 groupes avec des niveaux différents de compétences en chirurgie robotique :

- **groupe 1 (G1)** : 5 **experts** ayant réalisé plus de 100 interventions en chirurgie robotique,
- **groupe 2 (G2)** : 6 chirurgiens d'**expérience intermédiaire** ayant réalisé entre 10 et 40 cas,
- **groupe 3 (G3)** : 8 **débutants** ayant utilisé le robot entre 4 et 10 heures mais n'ayant jamais réalisé seuls un geste complet en tant qu'opérateur principal,
- **groupe 4 (G4)** : 37 chirurgiens et internes en chirurgie n'ayant pas ou **peu d'expérience** en chirurgie robotique (manipulation inférieure à 1 heure),
- **groupe 5 (G5)** : 19 **témoins** (ingénieurs, étudiants en médecine et infirmières) sans expérience en chirurgie.

Il y avait 58 hommes et 17 femmes ; un gaucher, deux ambidextres et 72 droitiers. Les sujets venaient de 14 hôpitaux différents de France, Belgique et Tunisie.

Les données démographiques ont été recueillies à partir d'un questionnaire rempli par chaque participant au début de l'étude et sont résumées dans le

Tableau 2. Sept participants ont été exclus pour réalisation incomplète de la série de 5 exercices soit suite à une panne du simulateur, soit par manque de temps, soit par impossibilité de réaliser un exercice.

Tous les participants ont été informés des objectifs de l'étude et ont accepté d'y participer.

Tableau 2 : Données démographiques concernant les sujets inclus dans l'étude de validité du dV-Trainer®

	n=	Expérience en coelioscopie (années)	Expérience en chirurgie robotique	Âge (années)	Jeux Vidéo (h par WE)
Chir Experts en Robotique (G1)	5	14,2	264 cas [100-510]	48,2	0
Chir. Exp intermédiaire Robotique (G2)	6	6,5	21 cas [10-40]	43,3	0
Chir débutant Robotique (G3)	8	2,63	6,43 h [4-10]	31,3	1,63
Chir et Interne sans expérience en robotique (G4)	37	3,3	0,22 h [0-1]	34	0,73
Étudiants en médecine, infirmière, ingénieurs (G5)	19	0	0	29,7	0,81

II.4. Le protocole

Ce travail a été conduit de façon prospective de décembre 2009 à Avril 2010. Avant de débiter l'étude, chaque sujet a reçu des informations standardisées sur le dV-Trainer®, explication du *clutching*, de la manipulation de la caméra, de l'*endowrist*. Ces explications étaient accompagnées d'un entraînement libre de cinq minutes sur un exercice non inclus dans l'étude, *Ring Walk*. Chaque exercice était accompagné d'une explication standardisée.

Étude de validité de construction : évalue la capacité du simulateur à différencier des populations de niveaux différents, l'ensemble du panel a été inclus.

Étude de reproductibilité : nous nous sommes amandés de la courbe d'apprentissage lors de la réalisation des exercices. L'étude de cette courbe d'apprentissage (Figure 26) réalisée à partir de la moyenne des scores des cinq exercices permettait d'identifier un pallier après cinq séries d'exercices. Compte tenu de ce résultat, seuls les 21 sujets issus du groupe 3 ayant réalisé plus de 5 séries d'exercices ont été retenus pour l'étude de reproductibilité (52).

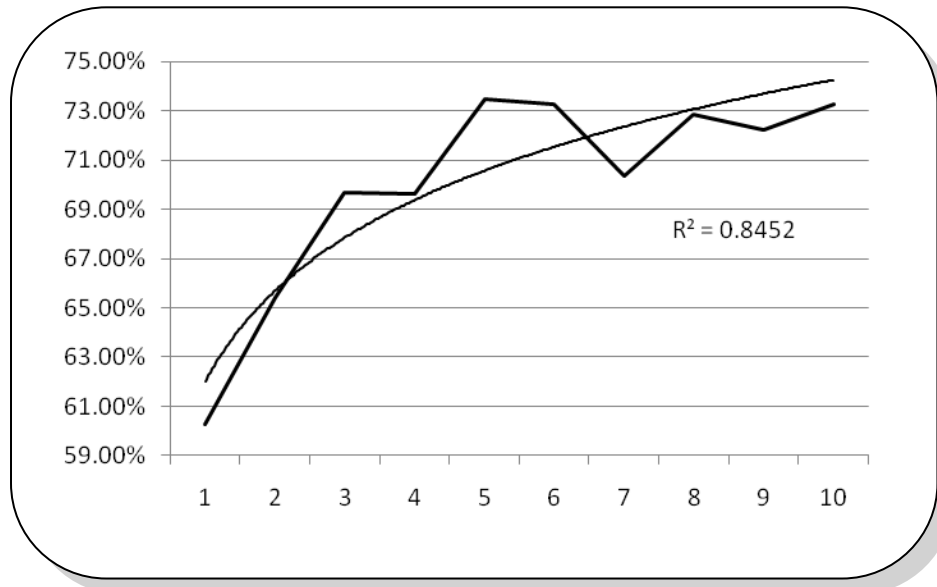


Figure 26 : Étude de la courbe d'apprentissage par rapport à la courbe de régression :
ordonnées : moyenne score du groupe 3 – abscisse : nombre de séries réalisées

Pour les études de validité évidente, de validité de contenu (53) d'évaluation du réalisme et de l'intérêt du simulateur : les sujets du groupe 4 et 5 n'ayant jamais manipulé le robot da Vinci[®] ont été exclus. Nous avons donc retenu 37 sujets.

Pour l'étude de validité concurrente : elle a nécessité la comparaison des résultats sur dV-Trainer[®] et sur robot da Vinci[®]. Compte-tenu des difficultés d'accès au robot, seuls 38 sujets ont pu réaliser complètement le protocole (2 sujets du groupe 1, 4 du groupe 3, 32 du groupe 4). Pour cette partie de l'étude, nous avons dû reproduire le *design* des cinq exercices réalisés sur le dV-Trainer[®] sur des maquettes (Figure 27) puis réaliser les exercices sur le robot da Vinci S[®]. Une distribution par randomisation a permis de définir 2 groupes, un premier de 18 sujets qui réalisait dans un premier temps les exercices sur le simulateur puis sur le robot, un deuxième de 20 sujets qui les réalisait dans l'ordre inverse.

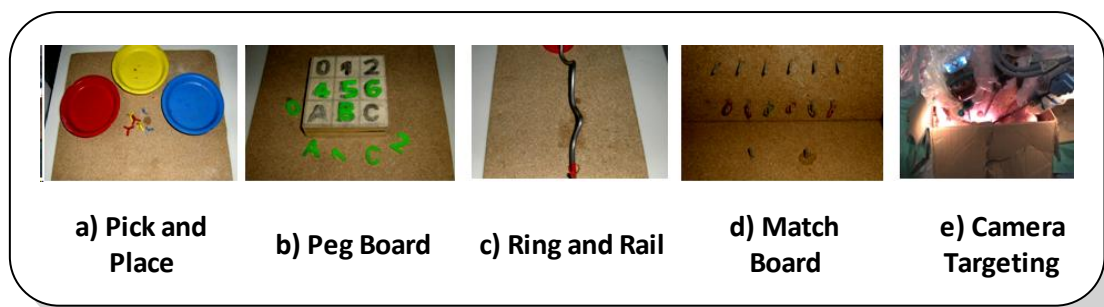


Figure 27 : Maquette des exercices réalisés pour le Dry-Lab au robot da Vinci S[®]

II.5. Les méthodes d'évaluation

II.5.1. Evaluation des exercices sur le dV-Trainer[®]

Le logiciel M-Sim inclut un utilitaire de notation avec 7 critères : temps, économie des mouvements, lâchers d'objets, collisions des instruments, force excessive, instruments hors du champ opératoire (secondes), *master workspace* (ergonomie et position des mains). Un score global moyennant ces critères est rendu pour chaque exercice, il est exprimé en pourcentage. Les résultats sur 1164 exercices, score global et scores par critère, ont été étudiés.

II.5.2. Evaluation des exercices au robot da Vinci S[®]

Les exercices sur le robot da Vinci S[®] ont été filmés par deux caméras, l'une centrée sur le flux endoscopique, l'autre sur la position du participant. Les vidéos ont été anonymisées et analysées par deux experts selon une grille de notation dérivée du score GOALS (*Global Objective Assessment of Laparoscopic Skills*) (51) (54) (55) gold-standard actuel pour l'évaluation en chirurgie coelioscopique, auquel ont été ajoutés deux critères d'utilisation de la caméra et d'utilisation du *clutch*. Afin de vérifier la validité de ce score de GOALS modifié, une première série de 20 vidéos a été examinée par les deux experts au terme de laquelle, la reproductibilité inter-observateur a été testée ($r = 0,802$) puis les résultats des deux experts ont été comparés afin d'affiner certains critères de notation.

II.6. L'analyse statistique

Les statistiques ont été réalisées à l'aide de l'outil d'analyse de Microsoft Excel 2007 (Microsoft Office[®]). Le test-retest reliability (54) et la validité concurrente ont été testées à l'aide du coefficient de Pearson (55). Une valeur supérieure 0,8 est nécessaire pour une évaluation de haut-niveau (56). La validité de construction a été testée par ANalyse de Variance à un seul facteur (ANOVA) (57) avec un seuil $p < 0.05$ et par un test de Student avec un seuil $p < 0.05$.

III. Résultats

III.1. Réalisme

Le réalisme des exercices était jugé élevé ou très élevé par la majorité des sujets 0.676 [0.486 - 0.811]. « *Match Board* » et « *Camera Targeting* » étaient les exercices les plus réalistes (Tableau 3). L'évaluation subjective de la difficulté (Tableau 4) des exercices sur une échelle de 1 (très facile) à 5 (très difficile) était hautement corrélée au score obtenu (Pearson ; $r = -0.88$).

Tableau 3 : Étude du réalisme des exercices (Face validité traduite validité apparente)

Exercices	Non réaliste	Faiblement réaliste	Moyennement réaliste	Fortement réaliste	Très fortement réaliste
Pick and Place	0 (0)	4 (0.11)	15 (0.41)	18 (0.49)	0 (0)
Peg Board	0 (0)	3 (0.08)	9 (0.24)	20 (0.54)	5 (0.14)
Ring and Rail	0 (0)	4 (0.11)	9 (0.24)	21 (0.57)	3 (0.08)
Match Board	0 (0)	2 (0.05)	7 (0.19)	20 (0.54)	8 (0.22)
Camera Targeting	0 (0)	2 (0.05)	5 (0.13)	17 (0.46)	13 (0.35)

Tableau 4 : Évaluation subjective de la difficulté des exercices réalisés au dV-Trainer®

Exercice	Très facile	Facile	Assez difficile	Difficile	Très difficile
Pick and Place	5 (0.14)	16 (0.43)	11 (0.30)	5 (0.14)	0 (0)
Peg Board	0 (0)	10 (0.27)	14 (0.38)	8 (0.22)	5 (0.14)
Ring and Rail	0 (0)	5 (0.14)	11 (0.30)	18 (0.49)	3 (0.08)
Match Board	0 (0)	1 (0.03)	5 (0.14)	14 (0.38)	17 (0.46)
Camera Targeting	0 (0)	9 (0.24)	8 (0.22)	16 (0.43)	4 (0.11)

L'intérêt pour l'apprentissage était jugé élevé ou très élevé par la majorité des sujets 0,762 [0,459 -0,919]. "*Match Board*" et "*Camera Targeting*" étaient les exercices les plus intéressants (Tableau 5).

Tableau 5 : Intérêt des exercices réalisés au dV-Trainer®

Exercices	Aucun intérêt	Faible intérêt	Intérêt Moyen	Haut Intérêt	Très haut intérêt
Pick and Place	0 (0)	2 (0.05)	18 (0.49)	16 (0.43)	1 (0.03)
Peg Board	0 (0)	1 (0.03)	6 (0.16)	24 (0.65)	6 (0.16)
Ring and Rail	0 (0)	3 (0.08)	7 (0.19)	21 (0.57)	6 (0.16)
Match Board	0 (0)	0 (0)	4 (0.11)	21 (0.57)	12 (0.32)
Camera Targeting	0 (0)	1 (0.03)	2 (0.05)	20 (0.54)	14 (0.38)

Les résultats de ces deux évaluations au sein du sous-groupe expert n'étaient pas différents de ceux des autres sujets ($p = 0.165 - 0.462$).

Exploitation des évaluations subjectives :

À la question « Quel est pour vous le meilleur outil pour l'apprentissage de la gestuelle de base en chirurgie robotique ? », la majorité des sujets 30 (soit 81,1%) ont cité le dV-Trainer® soit seul (18 chirurgiens) soit associé au robot (12 chirurgiens); 6 ont répondu le robot seul et 1 ne s'est pas prononcé.

À la question ouverte “Quels sont les avantages et les inconvénients du dV-Trainer® pour la formation à la chirurgie robotique?”, les réponses ont été variées et sont résumées dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Avantages et désavantages du dV-Trainer® et du robot da-Vinci®

	Avantages		Désavantages	
dV-Trainer®	Apprentissage de la gestuelle de base	14	Fragile et existence de Bugs	13
	Accessibilité	4	Moins de mobilité pb pr mvt en rotation	10
	Évaluation immédiate	4	Plus de mouvements	5
	Ressemblance avec le da Vinci®	3	Feeling différent du da Vinci®	3
	Prix	3	Moins maniable que le da Vinci®	2
	Aucun risqué de casse du matériel ou du robot	3	Pas de manipulation fine	2
	Reproductibilité de l'évaluation	1	Exercices parfois trop difficile	1
Robot da Vinci®	Plus fluide et précis	16	Accessibilité	8
	Meilleure vision 3D	9	Coût	4
	Facile à utiliser	7	Temps d'installation	2
	Plus confortable	5	Pas de feedback	2
	Meilleur feeling	3	Besoin de matériel	1
	Programme d'entraînement illimité	2	Utilisation des modèles animaux	1
	Plus pratique	1		

III.2. Reproductibilité

L'analyse de la courbe d'apprentissage a permis de mettre en évidence un plateau dans la courbe d'apprentissage après une série de six exercices (Figure 28).

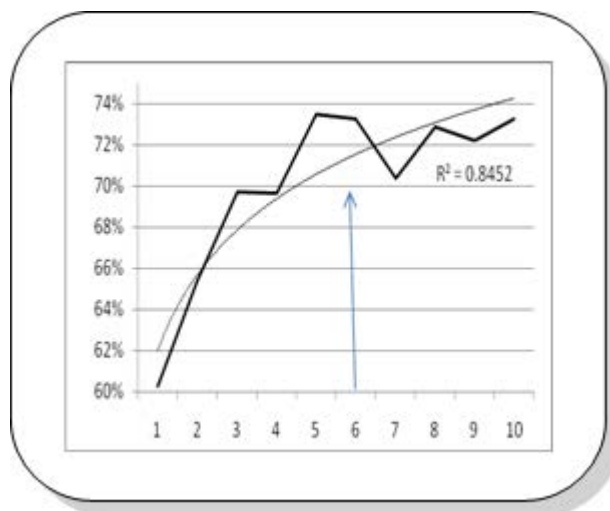


Figure 28: Courbe d'apprentissage pour les cinq exercices sur le dV-Trainer®

L'analyse de la reproductibilité a été réalisée entre le cinquième et sixième essai (Pearson ; $r = 0.851$) et entre le sixième et septième essai (Pearson ; $r = 0.847$) c'est-à-dire lorsque l'on atteignait le plateau de la courbe d'apprentissage. Le même calcul a été réalisé pour chacun des cinq exercices et pour chacun des sept critères de notation (Tableau 7).

Tableau 7 : Analyse de la Reproductibilité pour chacun des 5 exercices et chacun des 7 critères

Exercices/ Critères	Reproductibilité 5-6	Reproductibilité 6-7	Validité Construct (ANOVA) 5 groupes	Validité Construct (T-test) 2 groupes	Validité Concurrente (PEARSON)
Analyse par exercice					
5 exercices	0,851	0,847	0,0024	0,00092	0,822
Pick and Place	0,677	0,737	0,0053	0,0032	0,661
Peg Board	0,423	0,032	0,039	0,0044	-0,139
Ring and Rail	0,789	0,737	0,0063	0,0026	0,620
Match Board	0,057	0,700	0,239	0,0268	0,461
Camera Targeting	0,705	0,831	0,087	0,0339	0,399
Analyse par critère					
Temps de réalisation	0,8230	0,9908	0,0330	0,0096	0,645
Economie de mouvement	0,7065	0,939	0,0131	0,0059	-0,710
Force Excessive /Instrument	0,8651	0,9011	0,685	0,290	-0,538
Lâchers	-0,0256	-0,4980	0,345	0,0383	-0,520
Collisions d'Instruments	0,2417	0,2875	0,105	0,0153	
Instrument hors champ	0,9671	0,9983	0,829	0,604	-0,456
Espace travail	0,7811	0,0632	0,0739	0,0366	-0,412

III.3. Validité de Construction

Les scores globaux sont fortement corrélés à l'expérience antérieure en chirurgie robotique : moyenne des non-chirurgiens 56.00, moyenne des chirurgiens sans expérience robotique 59.42, moyenne des chirurgiens débutant en robotique 62.61, moyenne des intermédiaires 66.10, moyenne des experts 77.31. À l'inverse la variance inter-groupe diminue avec l'expérience, avec respectivement : 67.73 ; 79.57 ; 87.36 ; 130.12 ; 123.21 (Figure 29). L'analyse de variance à un seul facteur retrouvait une différence significative entre les cinq groupes (ANOVA, $p=0.0024$). Les chirurgiens robotiques avec une expérience supérieure à dix cas en chirurgie robotique surpassaient les sujets sans expérience robotique pour le score global (T-test ; $p < 0.001$) mais aussi pour chacun

des 5 exercices analysés séparément et pour la plupart des critères sauf la force et le temps passé avec les instruments hors du champ de vision (Tableau 8).

L'étude du sous-groupe ingénieurs, ayant une grande expérience en jeux vidéo et en informatique ne retrouvait pas de différence avec le sous-groupe étudiants et infirmiers 57.93 versus 55.49 (T-test ; $p=0,721$).

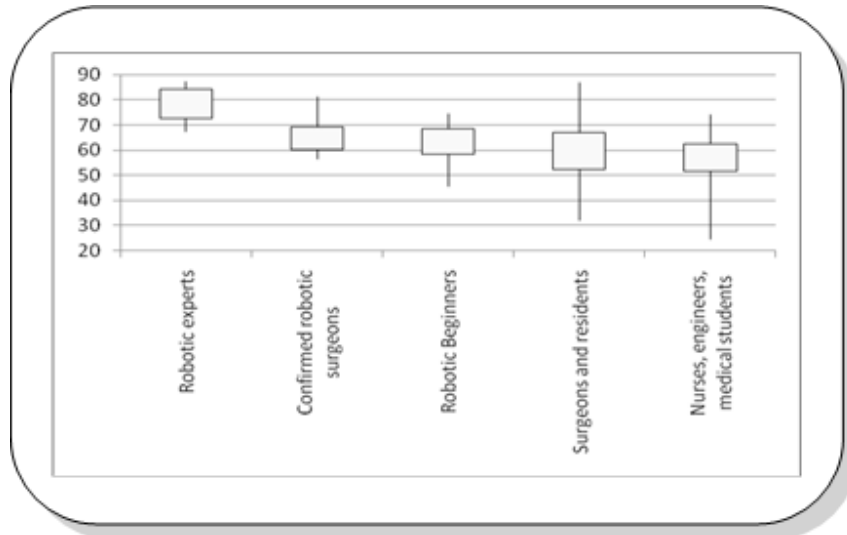


Figure 29 : Validité de construction moyenne des notes par rapport à chaque groupe (min, max, 0,25 percentile, 0,75percentile)

Tableau 8 : Validités du dV-Trainer®

Exercices et critères	Reproductibilité Ex 5-6	Reproductibilité Ex 6-7	Validité Construction (ANOVA) 5 groups	Validité Construction (T-test) 2 groups	Validité Concurrente (PEARSON)
<i>Par exercices</i>					
Série de 5 exercices	0,851	0,847	0,0024	0,00092	0,822
Pick and Place	0,677	0,737	0,0053	0,0032	0,661
Peg Board	0,423	0,032	0,039	0,0044	-0,139
Ring and Rail	0,789	0,737	0,0063	0,0026	0,620
Match Board	0,057	0,700	0,239	0,0268	0,461
Camera Targeting	0,705	0,831	0,087	0,0339	0,399
<i>Par critères</i>					
Time	0,8230	0,9908	0,0330	0,0096	0,645
Economy of Motion	0,7065	0,939	0,0131	0,0059	-0,710
Excessive Instrument Force	0,8651	0,9011	0,685	0,290	-0,538
Drops	-0,0256	-0,4980	0,345	0,0383	-0,520
Collisions of Instruments	0,2417	0,2875	0,105	0,0153	
Time instrument out of view	0,9671	0,9983	0,829	0,604	-0,456
Master Workspace Range	0,7811	0,0632	0,0739	0,0366	-0,412

III.4. Validité concurrente

Les scores évalués par les experts sur le robot étaient fortement corrélés aux scores obtenus sur le simulateur dV-Trainer® (Pearson, $r = 0.822$) (Figure 30). L'analyse statistique a ensuite été réalisée pour chaque exercice et pour chaque critère de façon séparée (Tableau 8). A chaque critère d'évaluation du dV-Trainer® correspondait un critère du score de GOALS modifié sauf pour les critères de collision et de lâcher d'objets qui ont été groupés et comparés au critère du maniement des instruments et pour le critère de l'économie de mouvements qui a été comparé au critère de fluidité des mouvements.

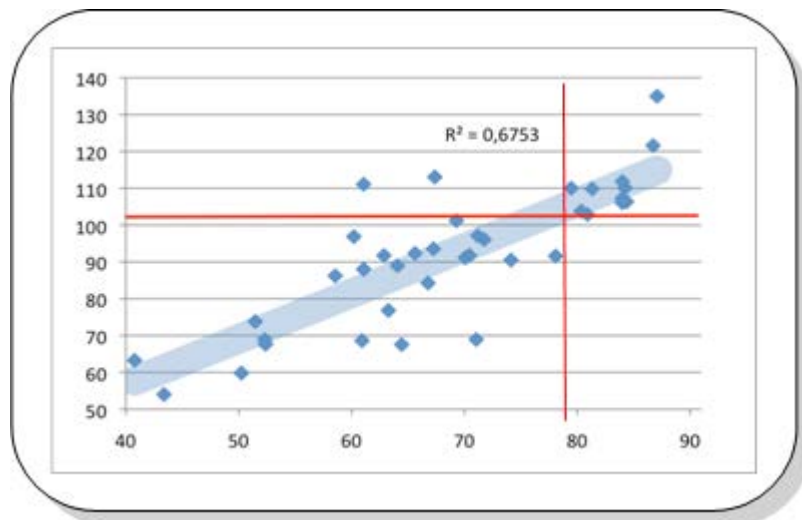


Figure 30 : Validité concurrente sur le score global pour les 5 exercices

(abscisse : notes sur dV-Trainer® ; ordonnée : notes sur le da Vinci®, trait rouge : notes des experts)

L'analyse statistique a ensuite été réalisée pour chaque exercice et pour chaque critère de façon séparée afin d'affiner ce premier résultat qui montrait une excellente corrélation entre ces deux outils d'évaluation (Tableau 9). A chaque critère d'évaluation du dV-Trainer® correspondait un critère du score de GOALS modifié sauf pour les critères de « collision » et « lâcher d'objets » qui ont été groupés et comparés au critère « maniement des instruments » et pour le critère « économie de mouvements » qui a été comparé au critère de « fluidité des mouvements ».

Tableau 9 : Corrélation de l'évaluation des compétences entre dV-Trainer® et robot da Vinci®

simulateur dV-Trainer®	robot da Vinci®	Coefficient de Pearson
score global	note globale	0,791
score global	moyenne des 6 compétences	0,822
temps	temps	0,645
force excessive	adaptation de la force	-0,538
économie de mouvements	fluidité des gestes	-0,710
espace de travail	utilisation des manipulateurs	-0,412
instruments hors champ de vision	utilisation de la caméra	-0,456
lâcher + collision	maniement des instruments	-0,520

Les résultats mettaient en évidence une concordance entre les notes sur le dV-Trainer® et sur le robot da Vinci® pour les exercices Pick and Place, Ring Rail et pour les compétences économie de

mouvement et temps. Pour les autres exercices ou critères, la concordance entre les deux n'était pas retrouvée ou statistiquement non significative ($-0,7 < \text{coefficient de Pearson} < +0,7$).

IV. Discussion

Les simulateurs virtuels de chirurgie robotique sont des alternatives plus économiques qui offrent une évaluation standardisée et objective des compétences. Cependant avant d'inclure un simulateur dans un programme d'entraînement chirurgical, il faut s'assurer qu'il soit un outil fiable d'évaluation des compétences. Notre étude a démontré pour la première fois, la reproductibilité de l'évaluation par le dV-Trainer®. Elle a confirmé à grande échelle la validité évidente, de contenu et de construction. Les validité évidente, de contenu et de construction avaient déjà été démontrées dans les précédentes études de Kenney (13), Sethi (12) et Lendvay (58) sur la version précédente du dV-Trainer®, les résultats obtenus dans notre étude sont comparables. Notre étude est la plus importante à ce jour en nombre d'exercices testés (5), d'exercices réalisés (1164), de participants (75), de niveaux de compétence discriminés (5). L'analyse de la validité concurrente est la première à démontrer l'équivalence entre l'évaluation des compétences sur simulateur dV-Trainer® et sur dry lab robotique. L'étude de validité concurrente de Lerner (59) ayant simplement prouvé l'absence de différence de progression entre un groupe d'étudiants en médecine formé sur simulateur et un groupe de résidents formé sur robot da Vinci®.

Néanmoins, l'analyse séparée par exercices et par critères montrait que les exercices Pick and Place et Ring and Rail ainsi que les critères économie de mouvement et temps étaient les plus pertinents pour une certification. Pour les autres exercices et critères, une ou plusieurs validités n'étaient pas démontrées.

Il est important de noter qu'il existe deux autres simulateurs sur le marché. Le simulateur Ross®, qui a fait l'objet de deux publications par Seixas-Mikelus. La première sur la validité évidente, les experts y jugeaient le réalisme de ce simulateur comme inférieur à la moyenne pour 66% d'entre eux, ce chiffre était de 80% quand la question était centrée sur le rendu proprioceptif du simulateur (60). La deuxième concernant la validité de contenu montrait un intérêt élevé pour l'entraînement et la certification (61). Le réalisme insuffisant du simulateur Ross® et le caractère uniquement subjectif des études réalisées ne permettent pas de recommander à l'heure actuelle son utilisation.

Le simulateur Intuitive Surgical® est disponible sur la console da Vinci Si®. Il est basé sur le même logiciel que le dV-Trainer® mais implémenté sur une vraie console de chirurgie robotique. Aucune étude n'a été menée à ce jour pour le comparer au dV-Trainer®. Il a l'inconvénient de nécessiter l'utilisation de la console du robot Si pour l'entraînement d'où un problème de coût et de disponibilité.

Ces premiers résultats sur le dV-Trainer® semblent encourageants, cependant, ils sont à nuancer car seuls cinq exercices ont été testés sur les 15 exercices disponibles au moment de l'étude. A l'heure actuelle, ils sont au nombre de 35. De plus, l'étude de la validité prédictive n'a pas été réalisée. Enfin, actuellement, le dV-Trainer® ne permet pas une simulation d'un geste chirurgical, au contraire des simulateurs de chirurgie coelioscopique. Il se limite à des exercices de base, réaliste comme pour la réalisation de suture vasculaire mais sans procédure complète. Ceci implique la nécessité d'un robot pour la phase de perfectionnement notamment pour les sutures et dissections.

Les résultats de cette étude positionnent le dV-Trainer® comme un bon candidat pour un programme de certification à grande échelle de type FLS robotique avec des avantages de coût et de disponibilité. D'autres études plus complètes, au mieux multicentriques, étudiant tous les exercices et la validité prédictive (62) seront nécessaires avant de choisir les exercices les plus pertinents, et de définir la place à accorder à cet outil dans la certification et dans la formation qui ne serait se concevoir que de façon multimodale et selon un curriculum basé sur la compétence. L'évaluation de la formation est un processus continu, qui n'est jamais terminé, comme le rappelle Satava (27), celui-ci nécessite une méthodologie rigoureuse.

Chapitre 2 :

Influence de l'expertise en micro-chirurgie sur les performances des chirurgiens au

dV-Trainer®

I. Introduction

L'apprentissage de la chirurgie robotique, nous l'avons vu dans le chapitre précédent, peut tirer avantage d'un entraînement sur les simulateurs de chirurgie robotique. Nous avons validé le dV-Trainer® en tant que outil de formation. Par ailleurs, des résultats préliminaires évoquaient de meilleures performances sur le dV-Trainer® des chirurgiens avec une expérience en micro-chirurgie.

Ceci nous a permis d'explorer d'autres pistes moins conventionnelles. Une réflexion sur l'enseignement en robotique nous a permis de mettre en avant les points communs entre chirurgie robotique et micro-chirurgie. Il existe indéniablement des similitudes entre la pratique de ces deux chirurgies tant dans la gestuelle que dans la présence d'une interface entre le chirurgien et le site opératoire.

Le but de notre travail est de valider l'inclusion de séances de micro-chirurgie dans l'apprentissage de la chirurgie robotique, apprentissage qui était initialement basé sur l'utilisation du simulateur dV-Trainer® et sur du Dry Lab et Wet Lab au robot da Vinci®.

Nous avons donc initié une étude comparative des performances de chirurgiens pratiquant couramment de la micro-chirurgie sans expérience en chirurgie robotique (Micro Surgery Group: MSG) et de chirurgiens témoins (Control Groupe: CG) novices en micro-chirurgie et en chirurgie robotique.

II. Matériel et Méthode

II.1. Sujets

Deux groupes de chirurgiens ont participé à l'étude : un premier (Groupe Micro-Chirurgie : MSG) composé de 11 sujets ayant la pratique régulière de la micro-chirurgie et issus des services de Chirurgie de la Main et de Chirurgie Maxillo Faciale et Reconstructrice et de Neurochirurgie du CHU de Nancy et un deuxième (Control Group : CG) composé de 38 chirurgiens sans expérience en chirurgie robotique ni micro-chirurgie. Tous les sujets MSG étaient détenteurs du DIU de Micro-chirurgie ce qui impliquait un minimum de 40 heures d'expérience dans ce domaine. Les données démographiques des deux populations sont résumées dans le (63).

Tableau 10 : Données démographiques du Groupe Micro-Chirurgie (MSG) et du Groupe Control (CG)

	Groupe Micro-Chirurgie (MSG)	Group Control (GC)	p-value
n =	11	38	
cœlioscopie (années)	0,14	3,21	0,02
expérience jeux vidéo (heures/semaine)	0,74	1,27	0,29
âge (ans)	29,5	34,2	0,06
pourcentage de femmes (%)	9,09	21,05	-
pourcentage d'internes (%)	27,27	34,21	-

II.2. Exercices réalisés

Les tests ont été réalisés sur le simulateur de chirurgie robotique dV-Trainer[®] commercialisé par la firme MIMIC Technologies[®] (Figure 31). Avant chaque exercice, les chirurgiens recevaient une information standardisée sur le fonctionnement du simulateur et sur les exercices à réaliser.



Figure 31: Simulateur de chirurgie robotique : dV-Trainer®

Les deux groupes de sujets devaient réaliser 5 exercices qui constituent selon un panel d'experts les bases du training en chirurgie robotique sur le dV-Trainer®. Cinq objectifs pédagogiques prioritaires correspondant aux compétences spécifiques de la chirurgie robotique ont été définis. Ils étaient clairement identifiés dans les cinq exercices choisis. Ces derniers étaient toujours réalisés dans le même ordre: Pick and place (Figure 32), Peg Board (Figure 33), Ring and Rail (Figure 34), Camera Targeting (Figure 35) et Match Board (Figure 36).

- Perception 3D: **Pick and Place** (Figure 32) consiste à placer des petits objets rouges, bleus et jaunes dans des boîtes de couleurs correspondantes.

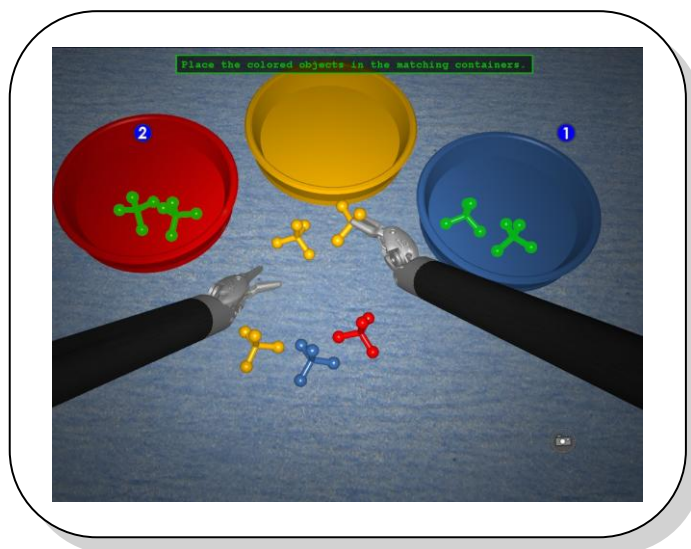


Figure 32 : Exercice Pick and Place.

- Clutching: **Peg Board** (Figure 33) consiste à attraper des anneaux sur une patère en position verticale, avec la main droite, puis à les passer dans la main gauche avant de les poser sur un plot.

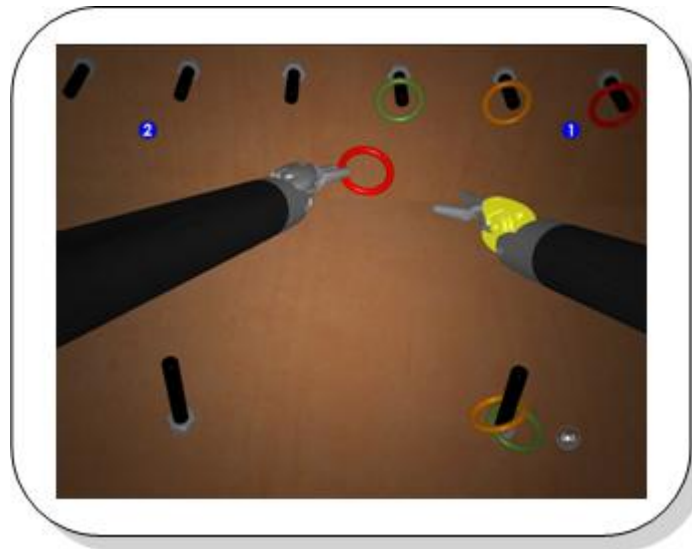


Figure 33 : Exercice Peg Board

- Force feedback visuel: **Ring and Rail** (Figure 34) consiste à déplacer un anneau sur une tige ondulée en fer sans y appliquer une force excessive.

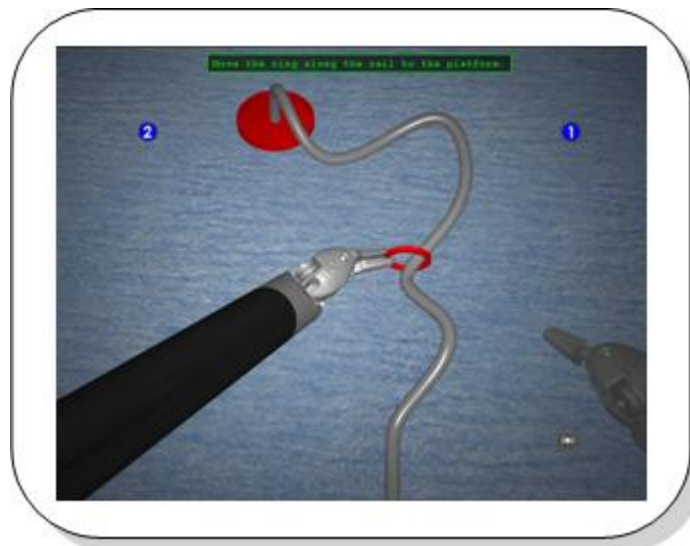


Figure 34 : Exercice Ring and Rail

- Control camera: **Camera Targeting** (Figure 35) consiste à zoomer la caméra sur différentes sphères positionnées sur les parois de ce qui simule une cavité pelvienne.

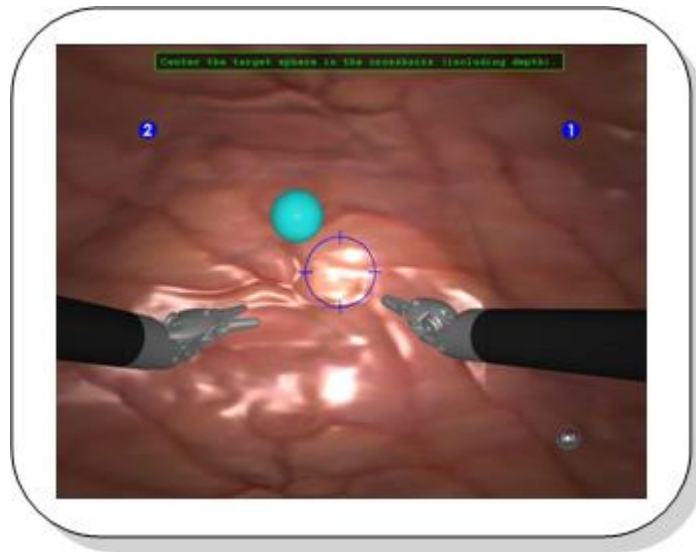


Figure 35 : Exercice Camera Targeting

- Endowrist manipulation (test la dextérité lorsque l'on travaille avec un ou plusieurs instruments): **Match Board** (Figure 36) consiste à placer neuf lettres et chiffres sur des emplacements spécifiques comme pour un puzzle.



Figure 36 : Exercice Match Board

À la fin de chaque exercice, le simulateur permet une évaluation fiable des performances réalisées par le chirurgien.

II.3. Critères analysés

Le dV-Trainer® attribue une note globale sur 100 tenant compte de 7 critères de performance (Figure 37). On obtient pour chaque exercice un algorithme de scores qui combine de façon automatique ces 7 critères :

- Time to complete exercise : Temps de réalisation des exercices (en secondes),
- Economy of motion : Economie de mouvement : déplacement des instruments durant un exercice (en centimètre)
- Excessive Instrument Force : temps pendant lequel le chirurgien applique une force excessive sur un instrument (en secondes)
- Instrument Out of View : Instrument hors de champ : distance entre les bords de l'écran et l'extrémité des instruments en dehors du champ visuel (en centimètres).
- Master Workspace Range : espace de travail des mains du chirurgien pendant un exercice représenté par la distance moyenne entre les instruments et le centre de l'espace de travail.
- Instrument Collisions : nombre de collisions entre les instruments ou entre les instruments et l'environnement
- Drops : nombres d'objets lâchés pendant les exercices

L'étude statistique a été réalisée en étudiant les résultats par exercice et par critères pour tous les exercices pour aboutir à un score final Overall Score.



Figure 37 : Capture d'écran d'une feuille de résultats pour un exercice

II.4. Questionnaire d'ergonomie soumis aux micro-chirurgiens

À la fin des tests, nous avons soumis aux micro-chirurgiens un questionnaire sur l'ergonomie d'utilisation du simulateur dV-Trainer®. Il recherchait les similitudes entre micro-chirurgie et chirurgie robotique pour les items suivants : ergonomie de posture ; position assise ; position des avant bras ; travail des poignets ; système de vision binoculaire ; taille et concentration sur l'espace de travail ; prise en main des joysticks et des instruments en micro-chirurgie ; gêne occasionnée par l'absence de retour de force. On interrogeait également les micro-chirurgiens sur la préhension des instruments.

II. 5. Analyse statistique

Les résultats statistiques (moyenne, dérivation standard et coefficient de variation) ont été calculés en utilisant un logiciel R Development Core Team software version R 2.13.1 (2011). Le caractère statistiquement significatif des paramètres quantitatifs a été déterminé en utilisant un test non paramétrique de type Wilcoxon. Nous avons choisi un test non-paramétrique car nos cohortes étaient faibles. Une valeur de p inférieure à 0.05 a été retenue comme limite de la significativité. Nous avons également réalisé un test d'Anova afin d'évaluer l'impact de chaque critère sur le score global. Un astérisque (*) signale les résultats statistiquement significatifs.

III. Résultats

III.1. Score global

L'ensemble des chirurgiens a réalisé l'intégralité des cinq exercices. Les MSG ont obtenu de meilleurs résultats pour tous les exercices et pour tous les critères comparativement au CG. En effet, les MSG ont atteint un score final total de 67,79% comparativement aux CG qui ont atteint un score de 58,07% ($p=0,008^*$). Le score global est le même tant pour l'évaluation par critère que par exercices (Figure 38).

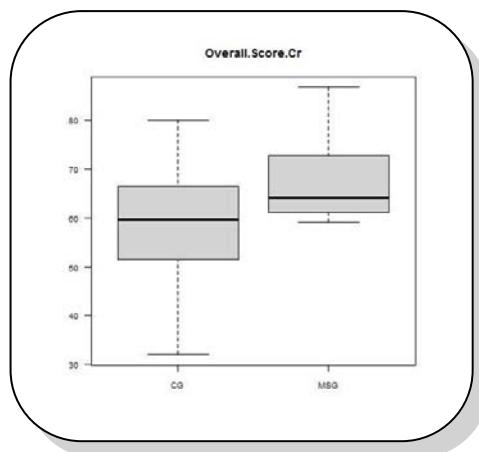


Figure 38 : Box plot Overall Score

III.2. Etude par critère

Pour le critère «Time to Complete Exercise » les MSG ont réalisé les exercices plus rapidement que les CG (171 secondes contre 227) mais non significatif. Tous les résultats sont résumés dans les Tableau 11 et Tableau 12.

Tableau 11 : Résultats par critères des MSG et CG sur dV-Trainer®

	Overall Score	Time to Complete Exercise (sec)	Drops	Economy of Motion (cm)	Master Workspace Range (cm)	Excessive Instrument Force (sec)	Instrument Collisions	Instrument(s) Out of View (cm)
MSG (micro-surgery group)	67,79 +/- 9,27	171,78 +/-54,20	0,39 +/- 0,43	230 +/- 47	9 +/- 0,9	1,5 +/-3,5	2,25 +/- 1,55	0,15 +/- 0,2
CG (control group)	58,07 +/- 10,58	226,83 +/- 108,37	0,68 +/- 0,53	299 +/- 113	9,7 +/- 1,1	10,5 +/-22,9	2,28 +/- 2,12	9,01 +/- 18,3
P vale Wilcox	0,008*	0,068	0,052	0,008*	0,031*	0,001*	0,676	0,000*

Dans l'étude, les MSG ont obtenu de meilleurs résultats pour les critères « Economy of Motion » ($p=0,017^*$) (Figure 39), « Excessive Instrument Force » ($p=0,003^*$) (Figure 40), « Instrument Out of View » ($p=0,001^*$) (Figure 41) et « Master Workspace Range » ($p= 0,031$) que les CG, différence statistiquement significative. Les critères « Drops » et « Instrument Collision » n'étaient pas statistiquement significatifs dans la comparaison entre les deux groupes (à la limite ($p= 0,052$) pour le critère Drops.

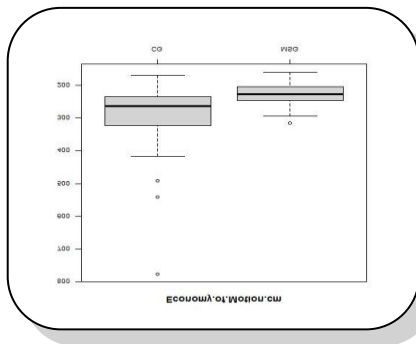


Figure 39 : Box plot Economy of Motion

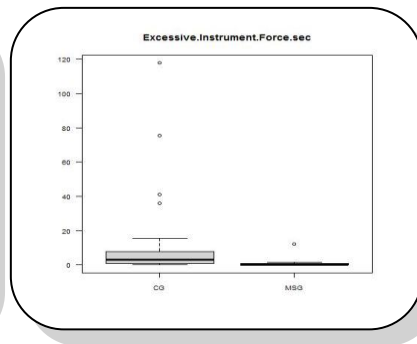


Figure 40 : Box plot Excessive Instrument Force

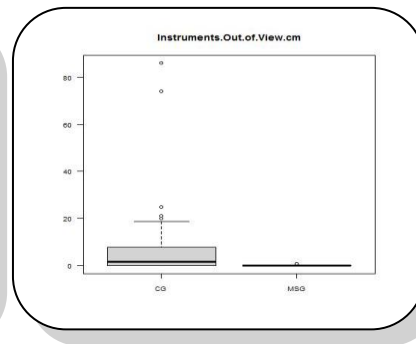


Figure 41: Box plot Instruments Out of View

III.3. Etude par exercice

Lorsque l'on réalise une comparaison entre les deux groupes pour les résultats par exercices (Tableau 12) et non pas par critères, les performances de MSG sont toujours meilleures que celles de CG mais de manière moins significative car on retrouve un $p < 0,05$ que dans un seul exercice « Ring and Rail ». Cependant, l'écart-type dans le groupe MSG est plus petit que dans le CG suggérant une plus grande homogénéité des comportements au sein de ce groupe.

Tableau 12 : Résultats par exercices des MSG et CG sur dV-Trainer®

	Overall Score	Match board	Camera Targeting	Ring Rail	Peg Board	Pick and place
MSG (micro-surgery group)	67,79 +/- 9,27	52,17 +/- 10,01	65,96 +/-15,23	73,96 +/- 12,19	65,44 +/- 16,48	81,42 +/- 6,55
CG (control group)	58,07 +/- 10,58	42,75 +/- 17,12	56,85 +/-21,32	57,03 +/- 17,50	56,69 +/- 16,86	77,03 +/- 10,47
P value wilcox	0,008*	0,118	0,127	0,002*	0,120	0,088

III.4. Analyse statistique

En analyse univariée, pour le MSG, une association a été trouvée entre Economy of Motion et Time to complete Exercise pour le score global ($R = 0,89$). En analyse multivariée, aucune association n'est liée au score global. Pour la même analyse univariée pour le CG, une association a été trouvée entre Economy of Motion et Time to complete Exercise, Drops, MasterWorkspace Range et le score.

En analyse multivariée Economy of Motion - Time to Complete Exercise et Economy of Motion – Drops étaient associés au score global.

Nous nous sommes par ailleurs assurés de l'absence de biais statistique qui pouvait être introduit par l'expérience en jeux vidéo. Il n'y avait pas de différence statistiquement significative dans la pratique des jeux vidéo de chaque groupe.

III.5. Analyse du questionnaire d'ergonomie

Tous les micro-chirurgiens ayant participé à notre étude ont admis une grande similitude d'ergonomie entre la pratique de la micro-chirurgie et de la chirurgie robotique. Les résultats sont résumés dans le Tableau 13. Ces similitudes sont particulièrement fortes pour les items position assise (100%), espace de travail (73%), position des avant-bras (91%), travail des poignets (73%), système de vision binoculaire (81%). A l'inverse, les joysticks ne sont pas assimilés à des instruments de micro-chirurgie (27%) même si les chirurgiens les tiennent avec les mêmes doigts : pouce-index ou pouce-index-majeur. L'absence de retour de force ne constitue un handicap que pour la moitié des chirurgiens (55%).

Tableau 13 : Similitudes entre l'ergonomie de la chirurgie robotique et de la micro-chirurgie

Items	Similarités (% de Oui)
Ergonomie de posture	100
Position assise	100
Position des avant bras	91
Travail des poignets	73
Espace de travail	73
Concentration sur l'air de travail	73
Système de vision binoculaire	81
Joysticks / instruments de micro-chirurgie	27
Inconfort dû à l'absence de retour de force	55
Manipulation des joysticks	Pouce/Index : 91 — Pouce/Majeur : 9
Préhension des instruments de micro-chirurgie	Pouce/Index : 73 — Pouce/Index/Majeur : 27

IV. Discussion

Les chirurgiens du MSG obtenaient un meilleur score global sur le simulateur de chirurgie robotique dV-Trainer[®] comparé aux chirurgiens du CG. Ils étaient, également, plus rapides pour réaliser les exercices. Ces meilleurs résultats suggèrent que l'expérience en micro-chirurgie augmente l'habileté dans l'apprentissage de la chirurgie robotique.

Il semble que la micro-chirurgie présente des similitudes en terme d'espace de travail de vision binoculaire, de technique, d'ergonomie, avec l'apprentissage de la robotique pouvant expliquer ces meilleurs résultats.

IV.1. Dextérité chirurgicale

Un geste efficace est un geste précis. Cette caractéristique est évaluée sur le dV-Trainer[®] par l'item « economy of motion ». L'item « economy of motion » est lié à l'efficacité des gestes. On retrouve un trajet moyen de 229,87cm pour le MSG contre 298,55 cm pour le CG ($p=0,017^*$). Les micro-chirurgiens ont une gestuelle posée sans geste brusque, avec des mouvements calculés en fonction de leur espace de travail qui est amplifié par le mode grossissement mais, cependant réduit par la taille du champ opératoire.

L'item dédié à l'aire de travail : « Workspace Range Master » suit la même évolution que « Economy of Motion ». L'aire de travail (workspace) est calculée en cm^2 . Un trop grand espace de travail entraîne une pénalité sur le score final du sujet. Le MSG évolue dans un espace de travail 9,03 alors que le groupe témoin travaille dans un espace de 9,71 ($p = 0,07$). Il est à noter également que pour l'item « Instrument out of view », le MSG ne perdait presque jamais ses instruments hors de vue, en dehors du champ opératoire avec un score moyen à 0,15 cm contre 9 cm en moyenne pour CG ($p=0,001^*$). Les gestes en micro-chirurgie sont fins, précis et de faibles amplitudes, en accord avec la taille du site opératoire. En chirurgie robotique, les amplitudes de mouvements sont également réduites ce qui permet d'envisager un geste efficace (64). Tant sur le simulateur (Figure 42) qu'en micro-chirurgie (Figure 43) ou en chirurgie robotique (Figure 44) le chirurgien opère dans un espace de travail réduit. L'espace dans lequel évoluent les mains du chirurgien est semblable dans les deux cas. Il est relativement restreint tant en micro-chirurgie où les gestes sont fins, précis et de faibles amplitudes qu'en chirurgie robotique où, plus l'espace de travail est petit, meilleures sont les performances.

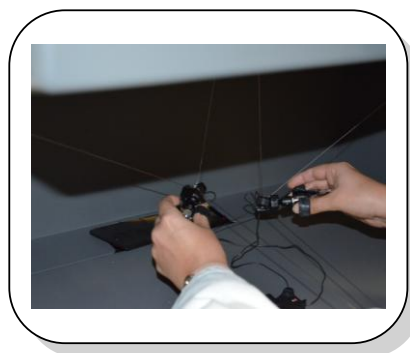


Figure 42: Espace de travail au dV-Trainer®

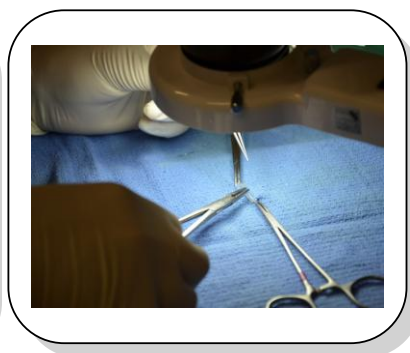


Figure 43: Espace de travail en micro-chirurgie



Figure 44 : Espace de travail au robot

IV.2. Psychologie de l'apprentissage et adaptation à l'interface

En analyse uni variée, « Economy of Motion » et « Time to Complete Exercise » sont les effets principaux de l'« Overall Score » pour le groupe MSG ($R = 89\%$). Les micro-chirurgiens sont plus rapides pour réaliser les exercices et c'est un des deux critères qui impactent fortement le score final.

La rapidité du geste peut s'apparenter à une meilleure maîtrise de l'outil. Si l'on se réfère aux travaux conduits sur l'ergonomie du travail (44,65), un outil-instrument, au contraire de l'outil-prothèse, facilite la réalisation de tâches, associé à un aspect de réalité augmentée qui accroît les capacités perspectives et motrices de l'utilisateur. Le microscope et le télémanipulateur répondent tous deux à cette définition d'outil-instrument. Le chirurgien qui utilise quotidiennement un microscope a donc déjà acquis une habileté motrice de manipulation du matériel intégrée dans un système mnésique particulier appelé mémoire procédurale (66,67). Ces informations, emmagasinées, sont inaccessibles à la conscience. Elles font intervenir le conditionnement du chirurgien qui se traduit en fin d'apprentissage par une automatisation de l'habileté telle, qu'elle est souvent associée à une difficulté à verbaliser les connaissances acquises. La réalisation d'un geste nécessite alors une ressource attentionnelle faible, il devient quasi automatique.

Lorsque l'on remplace le microscope par la console du robot ou par le simulateur dV-Trainer®, le micro-chirurgien se retrouve partiellement en territoire connu. Inconsciemment, il va faire appel à sa mémoire procédurale pour relier la gestuelle qui lui est familière sur le microscope à la nouvelle gestuelle robotique qui lui est apparentée. Le chirurgien pourra alors se concentrer sur la réalisation de l'exercice, ce qui va pouvoir mobiliser toute sa dextérité chirurgicale.

Au contraire, le chirurgien témoin, ne possédant pas cette mémoire procédurale, se retrouve confronté à l'outil-instrument au stade d'acquisition. Il doit donc se concentrer sur 2 acquisitions

simultanées : le contrôle de la machine et la réalisation de l'exercice. Dans ces conditions, le MSG peut potentiellement mieux réaliser les exercices et, en outre plus rapidement.

Par ailleurs, dans les deux cas, la vision du champ opératoire se fait par l'intermédiaire d'un viseur binoculaire, interposé entre le patient et le chirurgien. Dans un cas, il s'agit du viseur du dV-Trainer® (Figure 45), équivalent à celui du robot da Vinci® et, dans l'autre cas, il s'agit des oculaires du microscope (Figure 46). Tous deux permettent une vision en 3D du champ opératoire, vision 3D dont l'intérêt sur les performances chirurgicales et lors du training a été démontré dans la littérature (68,69). La vision de la profondeur de champ, passé l'apprentissage, facilite la chirurgie notamment les gestes de sutures ou de dissections vasculaires, tant en robotique qu'en micro-chirurgie. Cela permet d'obtenir à nouveaux des informations que l'on avait perdues en coelioscopie.

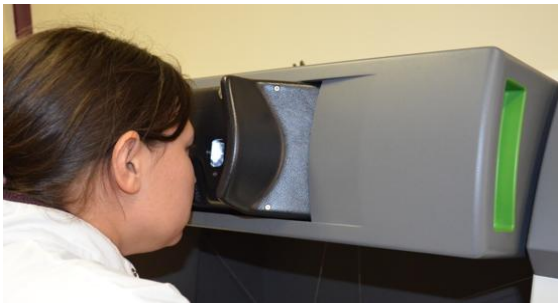


Figure 45 : Viseur binoculaire du dV-Trainer®



Figure 46 : Viseur binoculaire du microscope

Ce mode de vision nécessite une adaptation du comportement visuel et de la synchronisation des yeux qui sont intuitifs pour le MSG.

Le microscope permet au décours du geste une démultiplication de la vision qui est également disponible sur le robot da Vinci®. Sur le robot, le grossissement peut aller jusqu'à un rapport de 1/5 et, comme pour le microscope, il est directement réglé par le chirurgien en fonction du geste réalisé. Ceci implique donc des mouvements fins, précis, caractéristiques qui expliquent les bons résultats obtenus par le MSG pour les items « Economy of Motion », « Excessive Instrument Force » et « Instrument Out of View ».

IV.3. Technique et ergonomie

La manipulation des *joysticks* donne l'impression de se réapproprier les instruments au robot.

Le mouvement du poignet se transmet directement aux instruments et notamment au porte-aiguille avec les mêmes degrés de liberté. On peut trouver une certaine similarité entre la gestuelle pratiquée en robotique et celle utilisée en micro-chirurgie.

Par exemple, lorsque l'on réalise une suture au microscope, on positionne le fil dans l'axe de la pince pour réaliser plus aisément le nœud. Le même procédé s'applique en chirurgie robotique. Le porte-aiguille peut tourner autour du fil pour réaliser la double boucle et les deux instruments sont dans le même axe.

Autre exemple : la gestion des excès de longueur de fils. En coelioscopie, on a tendance à tirer simplement sur le fil car le champ opératoire est plus large, alors qu'en robotique ou en micro-chirurgie, on utilise un mouvement de poulie de la pince pour faire coulisser le fil ce qui permet une traction sans perdre de vue ses instruments.

La position des doigts et des bras est très proche en micro-chirurgie et en chirurgie robotique. Il existe, dans les deux cas, une zone d'appui des avant-bras pour stabiliser le travail des mains. Cela diffère de la position des mains du chirurgien en coelioscopie ou en chirurgie ouverte. Cet appui permet de diminuer les tremblements et augmente la précision du geste réalisé. L'appui du poignet n'augmente pas la précision du geste réalisé (70). La force de la préhension a également un impact sur la précision du geste. Une étude sur l'ergonomie a démontré que la position en appui des avant-bras sur un support, instruments saisis entre pouce et index donnait les meilleurs résultats en terme de réduction des tremblements et en terme de précision du geste que toutes autres positions (70).

Sur le dV-Trainer[®] (Figure 47) comme en micro-chirurgie (Figure 48) et en chirurgie robotique (Figure 49), *joysticks* et instruments sont maintenus dans la pince pollici-digitale : pouce-index ou pouce-majeur, outil humain le plus hautement perfectionné dans la précision de la gestuelle fine (71). La préhension se fait grâce à une opposition terminale pulpo-pulpaire. Le pouce et l'index ou le majeur s'opposent par l'extrémité de leur pulpe ce qui réalise une pince ronde très efficace dans la finesse du geste. Au contraire, en coelioscopie, les instruments sont tenus à pleines mains et ce sont les mouvements du poignet qui s'appliquent à l'extrémité des instruments coelioscopiques.



Figure 47 : Pince pollici-digitale joysticks dV-Trainer®

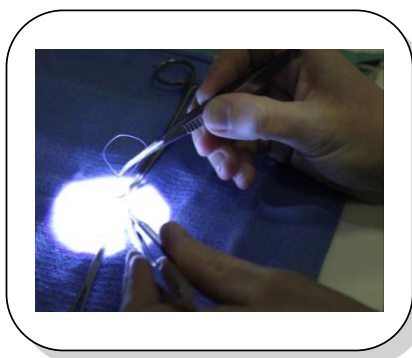


Figure 48 : Pince pollici-digitale micro-chirurgie



Figure 49 : Pince Pollici-digitale joysticks en robotique

Par ailleurs, dans les deux cas, micro-chirurgie et robot, l'axe yeux-mains est rétabli. En effet, le chirurgien a le regard dirigé vers le même axe que ses mains, ce qui n'est pas vrai en coelioscopie où le regard se porte vers le moniteur localisé en hauteur et les mains travaillent instruments orientés vers le bas.

La position assise représente un confort indéniable pour le chirurgien (72). La position assise du chirurgien à la console est similaire à celle du chirurgien devant son microscope. Dans les deux cas, le chirurgien opère, bien installé, assis sans contorsion, avec la possibilité d'adapter les paramètres de réglage de l'outil à son confort (hauteur de la console, du microscope, position du binoculaire..).

IV.4. Retour de force

Une autre similitude entre la micro-chirurgie et la chirurgie robotique est l'absence de retour de force. Ceci constitue probablement une des meilleures explications sur les performances des micro-chirurgiens. Dans notre étude, l'évaluation du critère « Excessive Instrument Force » montre de meilleurs résultats dans le groupe MSG que le CG ($p=0,003^*$).

En effet, les micro-chirurgiens utilisent lors de la réalisation de sutures vasculaires des fils extrêmement fins (décimales 9/0 ou 10/0). Si un excès de force est appliqué sur de tels fils, ils cassent avant que le chirurgien ait ressenti cet excès de tension. Sur le robot, le retour de force n'existe pas. La tension des fils lors de la réalisation de suture et la force appliquée sur les tissus sont contrôlées visuellement par le chirurgien. Cela impose une évaluation, une adaptation et une compensation visuelles. Un excès de tension se traduit également par une cassure du fil ou une déchirure des tissus. Ceci impose des gestes exempts de brusqueries et une bonne compensation visuelle de l'évaluation de la force exercée lors des deux pratiques.

L'exercice « Ring and Rail » est l'exercice qui teste le plus spécifiquement le feedback visuel. Le MSG a de bien meilleurs résultats que le CG pour cet exercice ($p=0,005^*$). L'exercice « Ring and Rail » impose

des gestes exempts de brusqueries et une bonne compensation visuelle de l'évaluation de la force exercée lors d'un geste, caractéristique bien maîtrisée par le MSG.

IV.5. Point de vue économique

Le dernier intérêt pédagogique que présente la micro-chirurgie est son faible coût d'apprentissage. Après un investissement largement réutilisable et mutualisable, comprenant des microscopes et des instruments de micro-chirurgie, les coûts d'apprentissage journalier sont moindres. Ils comprennent des fils de micro-chirurgie et plots d'entraînement à la micro-suture et ensuite, des modèles animaux (rats). Ceci permet de réaliser un apprentissage progressif et de difficultés croissantes, avec suture de structures inertes puis de l'aorte puis de la carotide, puis de l'artère de la queue de rat.

IV.6. Limites de l'étude

Il existe des limites à notre étude, la différence de taille entre les deux groupes comparés. Elle s'explique simplement par le fait que les chirurgiens ayant la pratique de la micro-chirurgie sont assez peu nombreux comparativement aux autres chirurgiens généraux.

V. Conclusion et perspectives

En conclusion, nous pouvons dire que le MSG réalise de meilleures performances sur le dV-Trainer[®] que le CG.

Un entraînement en micro-chirurgie améliorerait donc la gestuelle de base en chirurgie robotique.

Un tel entraînement est peu coûteux et pourrait être aisément implémenté dans un curriculum de chirurgie robotique.

Cependant afin de confirmer ces résultats, nous allons initier une nouvelle étude visant à comparer les performances de deux groupes de chirurgiens. Un premier groupe bénéficierait d'un training de chirurgie robotique classique axé sur un apprentissage sur le simulateur dV-Trainer[®] et sur le robot da Vinci[®] et un deuxième groupe qui recevrait en complément de cette formation un training en micro-chirurgie.

3^{ÈME} PARTIE :

TÉLÉCHIRURGIE

ET

TELEMENTORING

Introduction

La téléchirurgie est définie comme un geste chirurgical à distance assisté par ordinateur. Cette modalité opératoire appartient à la télé médecine. Les télémanipulateurs da Vinci® ou Zeus®, comme nous l'avons déjà dit en introduction, ont été les premiers à introduire une distance entre le chirurgien et l'opéré. D'un côté, nous avons le chirurgien assis à la console du robot, de l'autre côté nous avons le patient et les bras du robot. Le chirurgien commande les bras par l'intermédiaire des joysticks et des commandes aux pieds. Entre les deux entités, un câblage réseau permet la transmission des informations du chirurgien vers le patient (commandes des bras articulés et des instruments) et du patient vers le chirurgien (informations vidéo). Cette distance à l'heure actuelle est de quelques mètres. Mais, différentes expériences ont déjà eu lieu, notamment la plus célèbre « l'opération Lindbergh » qui a permis la réalisation d'une cholécystectomie chez une patiente à Strasbourg, par un chirurgien à New York. Pour ce faire, France Telecom avait mis à disposition des fibres optiques dédiées à l'intervention et tout un réseau d'ingénieurs afin de s'assurer de la bonne transmission des informations vidéo, audio et des commandes du robot. Malgré l'optimisation des voies de transmission, la distance entre New-York et Strasbourg avait généré une latence constante de transmission des informations de 155ms, sans gêne selon l'avis du chirurgien (73). Les moyens déployés par France Telecom ne sont pas applicables de manière routinière à tout type d'intervention de téléchirurgie. Il convient de trouver des modes de transmissions moins onéreux et plus facilement accessibles.

Plus la distance entre le chirurgien et le patient augmente, plus les contraintes en termes de réseau prennent de l'importance. La transmission peut se faire via les transmissions satellitaires qui restent cependant très onéreuses et parfois lentes en fonction du type de satellite transmetteur. Le réseau Internet peut constituer un axe de recherche du fait de son accessibilité et de son faible coût. Cependant, la transmission brute du flux vidéo (le plus volumineux) et du flux manipulation (commande des *joysticks*, de la caméra...) ne peut, nous allons le voir, s'envisager directement sur le réseau Internet. Il convient de trouver un juste équilibre entre la latence et le débit de transmission. Nous allons envisager ces deux paramètres du point de vue chirurgical et étudier l'impact de ces éléments sur le comportement chirurgical.

Réseau

Nous prendrons ici l'exemple d'un réseau concret pour illustrer la problématique du réseau : l'organisation du réseau du CHU de Nancy et son ouverture vers l'extérieur.

Le réseau informatique VDI (Voix-Données-Images) IP (Internet protocole) du CHU de Nancy (Figure 50) fédère l'ensemble des pôles géographiques (Hôpitaux de ville, Hôpitaux de Brabois). Sur chacun de ces sites, ont été construits des cœurs de réseaux haut débit de type artère 10 Giga Ethernet. Les hôpitaux de ville et de Brabois (distance 5 Kms à vol d'oiseau) sont reliés entre eux par deux liaisons louées de type fibre noire (non éclairée par un opérateur), c'est la DSI (Direction des Services Informatiques) du CHU qui assure le rôle d'opérateur et applique les protocoles et les débits en fonction de l'usage.

La périphérie du réseau est constituée de 150 locaux techniques qui hébergent les commutateurs d'extrémité dont le rôle est d'activer le câblage capillaire de l'ensemble des prises utilisateurs de l'établissement. Ces commutateurs d'extrémité sont doublement reliés au cœur de réseau par fibre optique activée en Giga Ethernet.

Ce réseau IP du CHU assure le transport de l'information VDI pour 14 000 prises Ethernet connectant 4500 ordinateurs, 9000 postes de téléphonies, 300 serveurs et 1200 bornes Wifi. Il s'agit d'un réseau Intranet qui communique ensuite avec le réseau Internet.

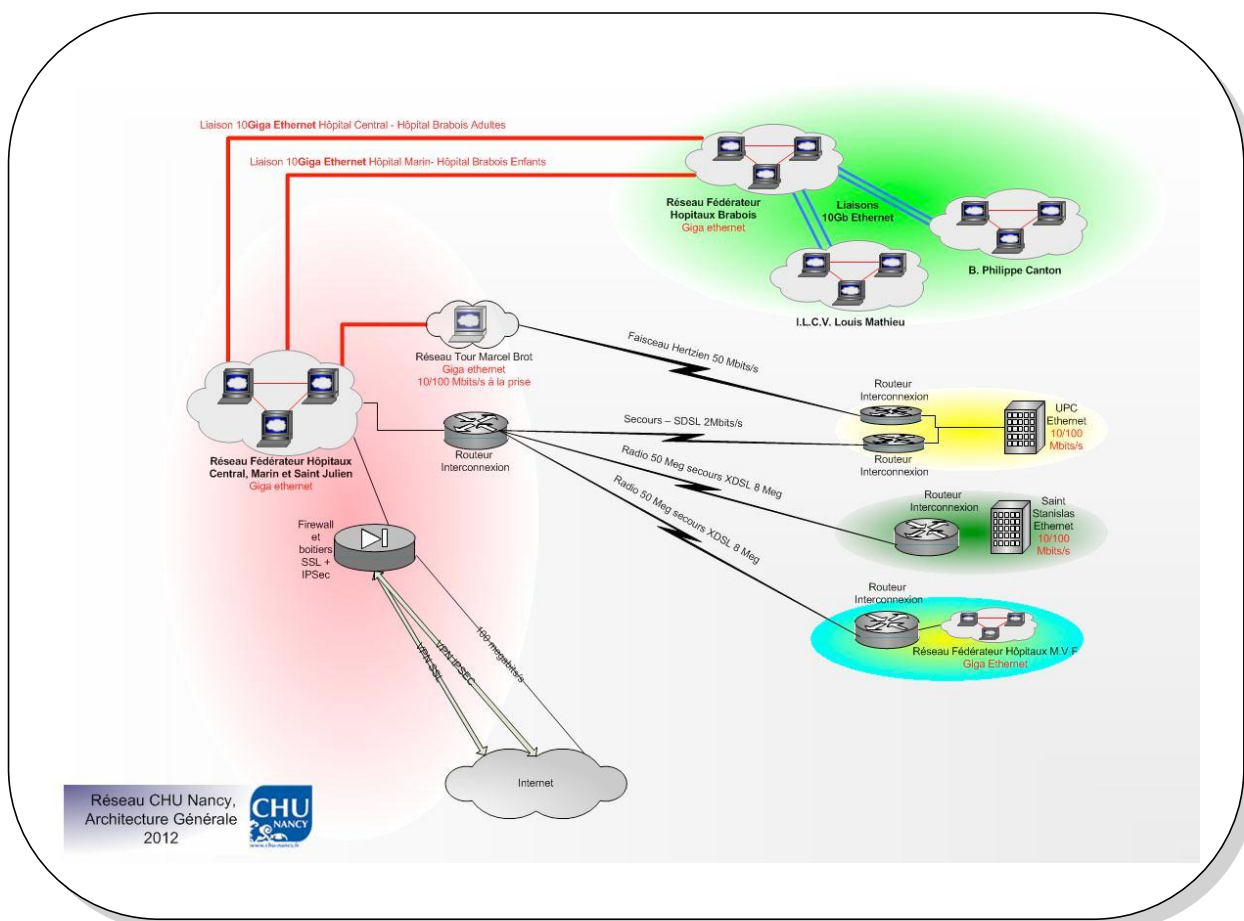


Figure 50 : Organisation générale du réseau au CHU de Nancy
(image fournie par Eric Guesney, Responsable Réseaux et Télécoms)

StanNet est le fournisseur Internet du CHU de Nancy. Il s'agit d'un réseau métropolitain qui relie 69 sites sur l'agglomération du Grand Nancy. Ce réseau de fibres optiques est mis à la disposition des établissements de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche par le Centre Interuniversitaire de Ressources Informatiques de Lorraine (CIRIL). La communication entre le CHU de Nancy et StanNet se fait actuellement par une communication de 100 Mbits/s. Ceci représente une faible connexion qui est rapidement saturée. Prochainement le débit doit être augmenté à 1 Gbits/s.

Le réseau StanNet est lui-même en lien avec le réseau national RENATER. RENATER représente le sigle de Réseau National de Télécommunication pour la Technologie, l'Enseignement et la Recherche (Figure 51). Ce réseau national assure une interconnexion entre différentes grandes villes sur le territoire français à un débit de 10 Gigabits/s.

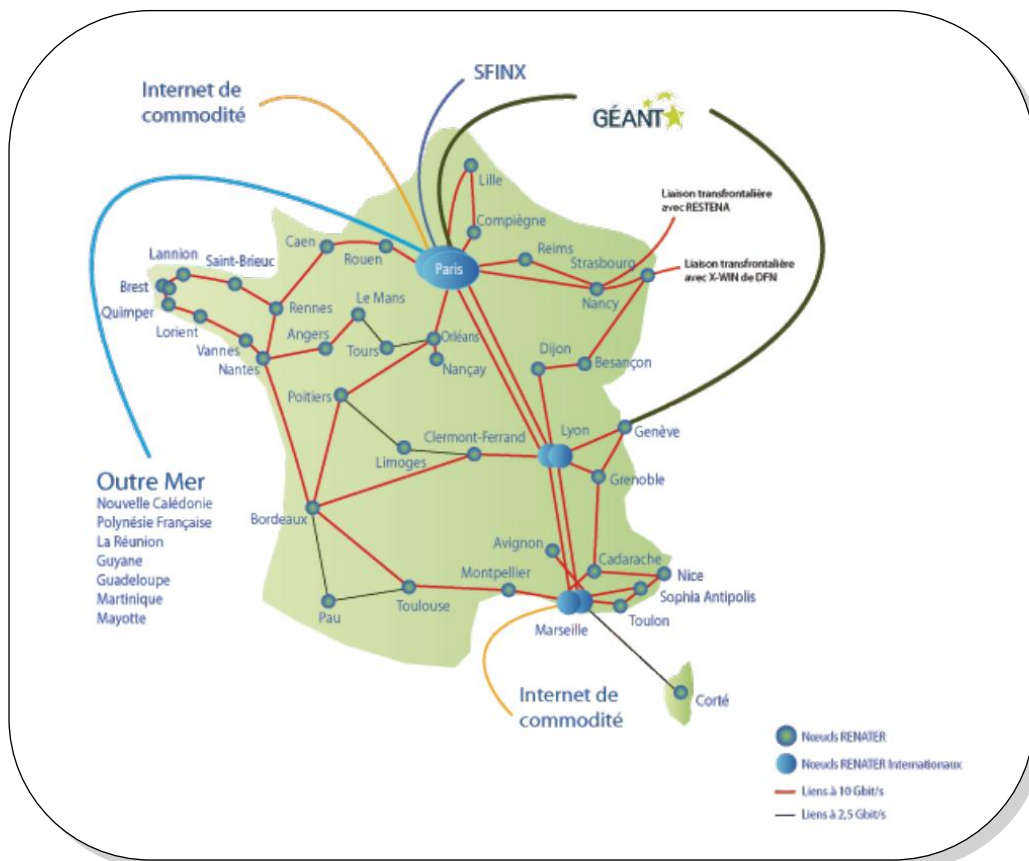


Figure 51 : Réseau RENATER (<http://www.renater.fr/infrastructure-nationale>)

Si l'on se pose le problème théorique d'un transfert d'une intervention en direct d'un geste de Téléchirurgie entre le site de Brabois et le site de Central (hôpital de ville), le geste peut théoriquement être réalisé puisque l'on dispose d'un réseau à 10 Gigabits/s pour un transfert consommant 540 Mbits/s. Cependant, le problème provient du partage du réseau et de son engorgement. Il convient en effet, d'assurer une Qualité de Service (QoS) continue au cours de l'ensemble de la transmission sans bloquer les utilisateurs habituels du réseau. Ceci pourrait être envisageable techniquement sur le CHU de Nancy car il existe une connaissance et une maîtrise de la « consommation-réseau » sur le site. Cependant, cela ne constituerait pas une simple formalité et nécessiterait un important travail ingénieur pour garantir la transmission dans le temps et la synchronisation voix-véo-gestuelle. Une partie de la bande passante du réseau nécessiterait probablement d'être dédiée à la transmission.

Si l'on envisage le problème au niveau national d'une expérience de téléchirurgie, on pourrait emprunter le réseau RENATER. Cependant, externaliser l'expérience entre Nancy et une autre ville en France serait encore plus aléatoire qu'une expérience Nancéienne au sein du CHU. Effectivement, le problème réside toujours dans l'engagement de service à un débit de 540 Mbits/s sur toute la durée de la procédure sur un réseau que l'on ne maîtrise pas. La Qualité de Service (QoS) doit pouvoir être assurée constante dans le temps. Par ailleurs, pour rejoindre le réseau RENATER nous devons

emprunter un réseau à 100 Mbits/s (connexion entre CHU – StanNET). Cette connexion à elle seule empêcherait le transfert des données.

À l'heure actuelle au CHU de Nancy, une vidéo conférence et une transmission d'un flux vidéo en direct issu du robot da Vinci[®] vers une salle d'enseignement ne pose aucun problème. Ce transfert se fait à un débit de 20 Mbits/s. Il est tout à fait envisageable d'avoir un engagement de service pour une transmission à ce débit et d'assurer cette transmission dans le temps avec une bonne fluidité et une bonne synchronisation. Ceci est régulièrement réalisé pendant plusieurs jours dans le cadre de l'enseignement du DIU de chirurgie robotique.

Si l'on arrive à transformer le débit issu des deux caméras du robot de 540 Mbits/s en un débit de 20 Mbits/s, alors on pourrait envisager une transmission du signal sans problème.

Ceci amène donc la question de l'introduction de la compression d'image dans la téléchirurgie à longue distance. En effet, si la transmission du flux vidéo n'est pas plus consommatrice en termes de débit qu'une vidéo conférence ou une transmission en direct d'un geste chirurgical au robot, la QoS (Qualité de Service) pourrait être garantie. Il conviendrait également de s'assurer de la bonne synchronisation du flux des images et des joysticks en tenant compte du temps de compression nécessaire pour l'image.

Je remercie Mr Eric GUESNEY pour son expertise et ses explications sur le réseau Ethernet du CHU de Nancy.

I. Problématique de la distance

Les paramètres de réalisabilité de la téléchirurgie à longue distance représentent une équation faisant intervenir le délai, le volume d'information à transmettre et les infrastructures réseaux. Le réseau du CHU de Nancy a été pris comme exemple pour illustrer les contraintes liées aux réseaux.

La latence et le volume des informations à transmettre sont donc intimement liés.

- si on veut transmettre rapidement il faut un petit volume d'information à transmettre
- si on veut transmettre beaucoup d'informations il faut du temps et donc un délai de transmission
- si l'on veut transmettre loin, cela implique également une latence
- les capacités du réseau interviennent pour pondérer le tout

Pour réduire la latence au maximum, il faut diminuer le volume des informations et donc introduire la notion de compression de vidéo chirurgicale. En effet, la vision binoculaire obtenue à la

console est constituée de l'influx de 2 caméras tri-CCD. Chaque caméra a un débit de 270 mégabits par secondes soit un volume total d'information à 540 Mbits/s.

Ceci implique un important volume de données à transmettre ce qui mobilise des capacités très importantes en termes de bandes passantes. La compression semble donc nécessaire car, pour une application routinière de la téléchirurgie à longue distance, il pourrait utiliser un équivalent du réseau Internet plus économique, plus réaliste qu'un réseau de type satellite ou fibre optique dédiée.

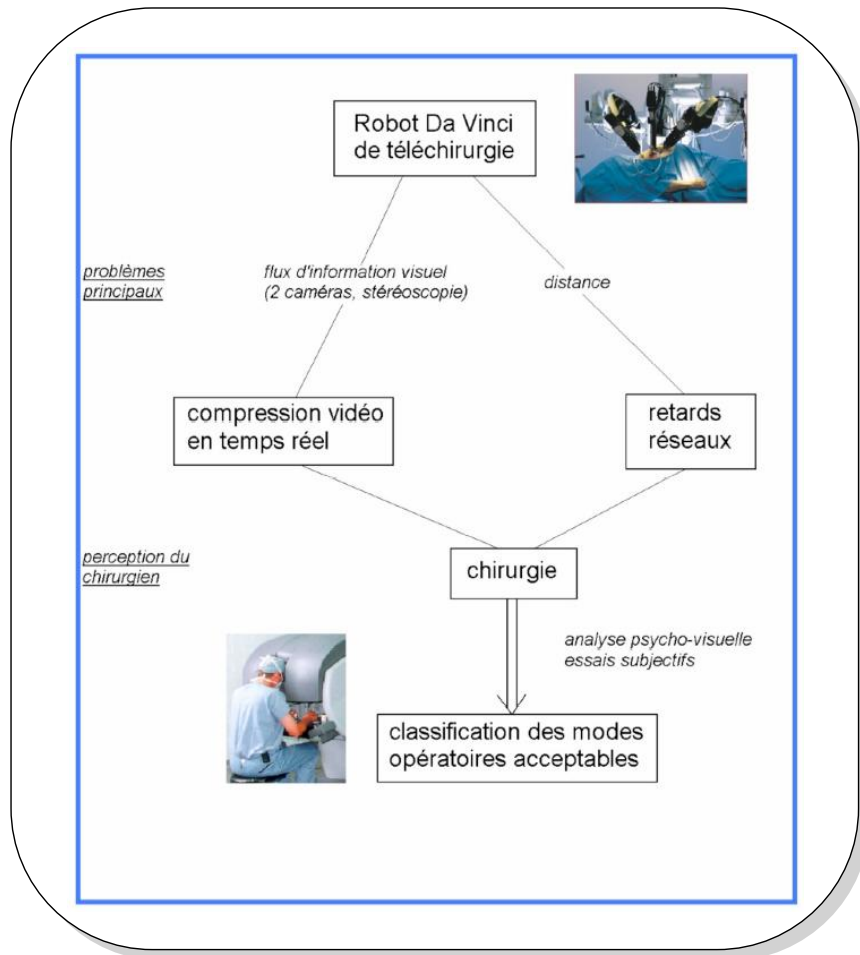


Figure 52 : Problématique de la téléchirurgie à longue distance

Dans ce cadre, le projet RALTT a permis de financer et développer plusieurs études.

Un premier axe de travail a étudié l'impact sur le chirurgien de l'introduction d'un délai entre un geste réalisé et sa perception sur un moniteur de type coelioscopique (axe droit de la Figure 52).

Un deuxième axe de travail s'est intéressé à la possibilité d'introduire une compression d'image pour diminuer le flux d'informations à transmettre, et à l'impact de cette compression sur la perception du chirurgien (axe gauche de la Figure 52).

Le fait d'augmenter la distance entre le chirurgien et le patient induit trois points distincts :

- Soit la nécessité d'un réseau dédié apte à transmettre quasi en temps réel les informations,

- Soit une augmentation du délai de transmission des informations entre les deux sujets (le chirurgien et le patient). Ce délai est dû au retard induit par le réseau. Si l'on accepte cette option, il convient de déterminer le délai maximal tolérable pour les chirurgiens,
- Soit la nécessité de diminuer le volume des informations à transmettre en introduisant une compression des vidéos (éléments les plus volumineux).

Il existe plusieurs axes techniques pour rendre réaliste la technique de la téléchirurgie, il convient donc de déterminer sur la pratique du chirurgien l'impact de la latence et de la compression.

D'où l'initiation des deux études qui suivent, l'une testant l'impact du délai sur les performances chirurgicales et l'autre évaluant l'introduction d'une compression vidéo sur la vision chirurgicale.

Chapitre 1 :

Impact de la latence

en Téléchirurgie à longue distance

Cette étude a fait l'objet d'une communication orale avec indexation dans PUB MED lors d'un congrès de l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (74). Elle a été réalisée dans le cadre de mon Master II de recherche, travail préliminaire à cette thèse des universités en collaboration avec un ingénieur, Frédéric Quiaios. Il s'est occupé de la partie conception informatique de la plateforme et de la programmation du délai.

I. Introduction

Prenons un exemple autre que la téléchirurgie qui nous concerne quotidiennement sans que l'on y prenne garde, le délai de transmission d'une communication téléphonique. Dans ce cadre, il existe une norme qui définit une transmission de qualité en fonction du délai. Cette norme accepte un délai de transmission maximal de 150 ms afin de garantir une bonne qualité d'audition de la communication (75). Au-delà, la qualité est altérée et devient pour un délai excédant 700 ms une transmission de conversation de type militaire, non compatible avec une communication « normale ».

De telles normes sur les délais n'existent pas en téléchirurgie à longue distance. Le chirurgien lorsqu'il réalise un geste a l'habitude de visualiser immédiatement l'impact de ce geste sur la scène opératoire. S'il sectionne un fil de ligature à proximité d'une artère, il doit bien uniquement sectionner le fil et ne pas pousser son ciseau trop loin et léser l'artère. Si l'on imagine introduire un délai dans cette transmission, il convient également de s'assurer de la stabilité dans le temps du délai.

Il n'existe aucun consensus à l'heure actuelle pour déterminer le délai maximal acceptable par les chirurgiens au décours d'une procédure. Nous avons initié une étude d'impact du délai sur la qualité du geste chirurgical en réalisant des exercices en Dry Lab, en coelioscopie. Réaliser de tel geste sur le robot da Vinci® n'était pas envisageable compte tenu de la difficulté d'accès aux commandes de la machine. Nous avons introduit un délai entre la réalisation de l'exercice et la réception de l'acte sur le moniteur. Nous avons ensuite analysé l'impact et le ressenti du délai sur les performances des chirurgiens. Notre but était de déterminer le délai maximal tolérable.

Cependant, tout chirurgien, lorsqu'il réalise un geste en coelioscopie ou au robot, visualise en instantané ce geste et son impact sur le moniteur. Le délai n'est pas une contrainte habituelle en chirurgie. Nous avons donc voulu étudier l'impact de ce délai sur le geste chirurgical et sur les performances du chirurgien.

Nous avons mis au point un « home trainer » permettant la réalisation d'exercices de type Dry Lab en coelioscopie. Nous avons créé 4 exercices qui impliquent une gestuelle apparentée à de vrais temps opératoires (manipulation d'aiguille, réalisation d'un nœud, dissection de tissus). Entre le geste réalisé par le chirurgien et la perception de ce geste sur le moniteur, nous avons intégré un délai variable entre 150 et 350 ms représentant la latence. Secondairement, les performances des chirurgiens ont été évaluées et rapportées aux délais introduits.

II. Matériel et Méthode

II.1. Sujets

15 chirurgiens (moyenne d'âge 41 ans et extrême de 30 à 61 ans) ont réalisé l'expérience : 2 urologues, 1 gynécologue et 12 chirurgiens digestifs. Ils avaient tous la pratique de la chirurgie coelioscopique. Trois d'entre eux avaient plus de 15 ans d'expérience en chirurgie coelioscopique et 4 chirurgiens utilisaient très couramment le robot da Vinci®.

II.2. Plateforme d'essai

Nous avons conçu une plateforme d'essai (Figure 53) composée d'une boîte d'entraînement (home trainer) de 33 x 44 x 48 cm qui simulait le patient, d'une caméra de coelioscopie standard de 10 mm et 0° (VBoxTM, VIMS® – France) et d'instruments de coelioscopie standards pour réaliser des exercices représentatifs de gestes coelioscopiques.



Figure 53 : Plateforme d'essai

(1 : boîte d'entraînement, 2 : moniteur, 3 : ordinateurs)

Les images 2D acquises par la caméra étaient visualisées sur un moniteur de 28 x 37 cm. Une compression vidéo s'imposait au vu du volume d'informations à transmettre. Afin de simuler la latence induite par le réseau, nous avons intercalé entre la caméra et le moniteur, trois ordinateurs dédiés chacun à une tâche (Figure 54). L'acquisition et la compression des images étaient réalisées par le premier ordinateur équipé d'une carte d'acquisition vidéo « Opsrey 230 card » (*Vieswcast*, Tx USA) et d'un encodeur « *Moonlight Encoder Package* » (*Elecard*, Russia). Le flux vidéo était secondairement envoyé vers le deuxième ordinateur grâce à une carte de type « Fast Ethernet » 10/100Mbps (*Robotics Corporation*, Schaumburg, IL – USA) dans le réseau par UDP. Le deuxième ordinateur permettait l'introduction d'un délai grâce à un buffer. Ce buffer représente une zone tampon de stockage temporaire (mémoire tampon) des données qui sont réintroduites dans le réseau après un délai souhaité. La précision du buffer avait au préalable été contrôlée par un software. Le troisième ordinateur réalisait la décompression des images grâce à un décodeur NetStream 4000 (*Sigma Design*, California, USA). La vidéo était ensuite restituée sur le moniteur pour permettre la poursuite de l'exercice réalisé.

Le kit *Microsoft DirectShow SDK* (*Software Development Kit*) est associé à une application appelée *GraphEdit* qui permet de réaliser le traitement numérique. Cette plateforme d'essai incluait un délai intrinsèque de 120 ms dont nous avons tenu compte dans les retards appliqués aux exercices.

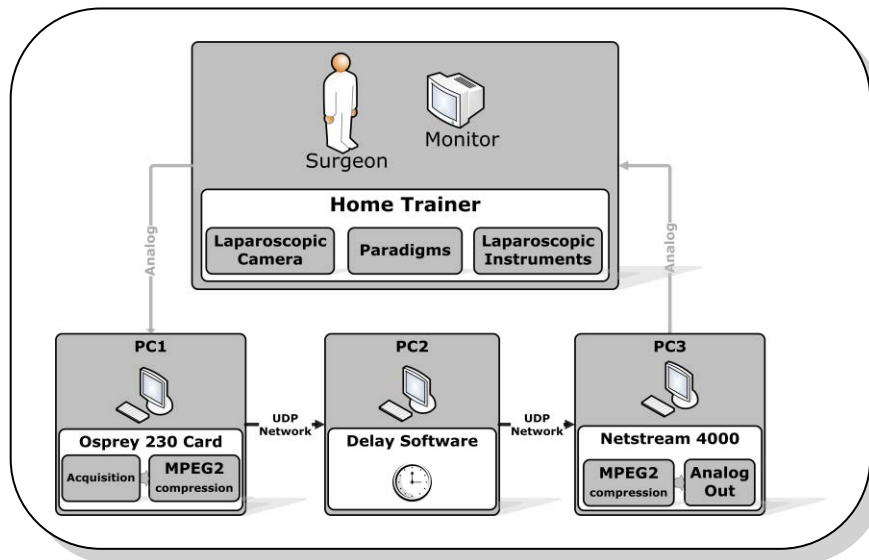


Figure 54 : Plateforme d'essai: de la caméra au moniteur en passant par les ordinateurs

II.3. Exercices

Nous avons créé quatre exercices qui simulent des gestes de chirurgie coelioscopique. Le critère principal retenu était le temps nécessaire à la réalisation de chaque exercice. Les instruments utilisés pour la réalisation des exercices étaient des pinces et des ciseaux de type EndoGrasp[®], EndoClinch[®], EndoClip[®] and EndoShear[®] (Tyco Healthcare[®]).

II.3.1. Exercice des écrous

L'exercice des écrous a été créé pour tester l'impact du retard sur la dextérité des chirurgiens. Sur un socle en plâtre sont plantées 6 vis de couleurs différentes (bleu, jaune, rouge, vert, orange, blanc). Dans un carré de 6 cm de côté sont placés 4 écrous de couleurs différentes (bleu, jaune, blanc, vert). L'exercice consiste à placer l'écrou sur la vis de couleur qui lui correspond (Figure 55). Tout écrou perdu au cours de l'exercice, mal positionné ou sorti du carré est considéré comme un échec, les autres comme une réussite. Lorsqu'un écrou est « ECHEC », le temps de la réalisation est doublé.



Figure 55 : Exercice des écrous

II.3.2. Exercice de l'aiguille

L'exercice de l'aiguille a été créé pour tester l'impact du retard sur la capacité des chirurgiens à réaliser un geste coordonné qui s'apparente à la réalisation d'un surjet (type de suture continue). Quatre petits monticules sont surmontés de 4 chas d'aiguilles. À côté est positionnée une aiguille plantée dans une mousse pour faciliter sa préemption (Figure 56). Grâce à 2 instruments, 1 pince type « Endoclinch » et 1 pince « Endograsp », le chirurgien doit se saisir de l'aiguille et la passer dans chaque chas en réalisant un transfert de l'aiguille entre ces 2 mains. L'impact de la profondeur est important dans cet exercice.

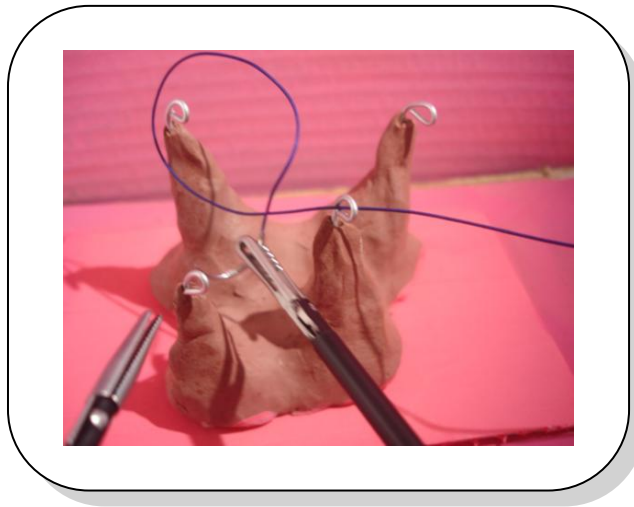


Figure 56 : Exercice de l'aiguille

II.3.3. Exercice du sang

Cet exercice simule la dissection que l'on peut être amené à réaliser pour mettre en évidence un vaisseau qui saigne (Figure 57). Un petit cathéter est enfoui entre des compresses. Il est connecté à une perfusion de sérum colorée en rouge. Le chirurgien doit disséquer les compresses afin de mettre en évidence le cathéter et de stopper l'« hémorragie » en clipant le cathéter.

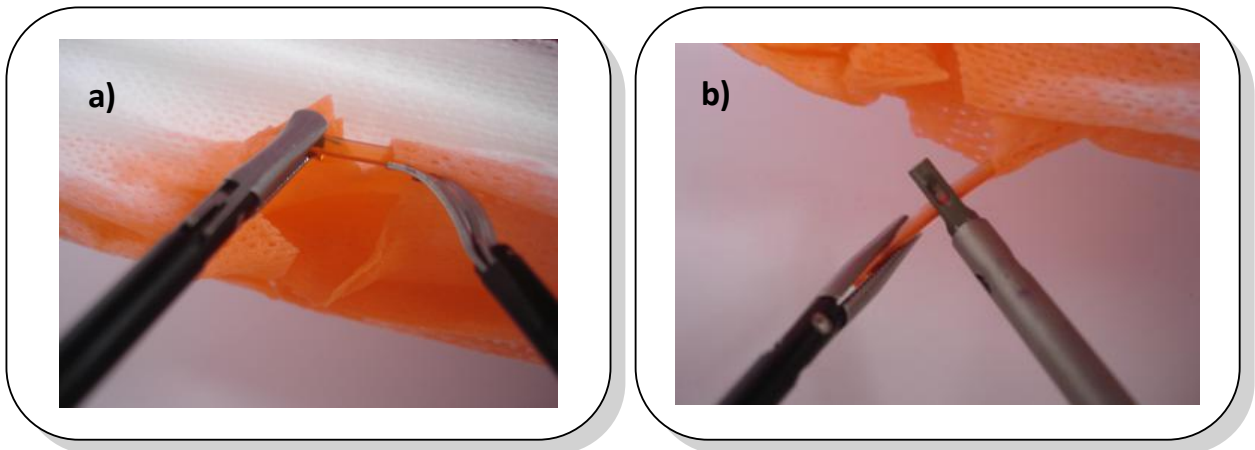


Figure 57 : Exercice du sang. a) dissection du cathéter ; b) mise en place d'un clip

II.3.4. Exercice du nœud

Cet exercice consiste à réaliser un double nœud après avoir passé l'aiguille au travers d'une zone pré déterminée par une cible sur une mousse (Figure 58). Cette mousse présente un certain degré de liberté qui simule la mobilité des tissus.

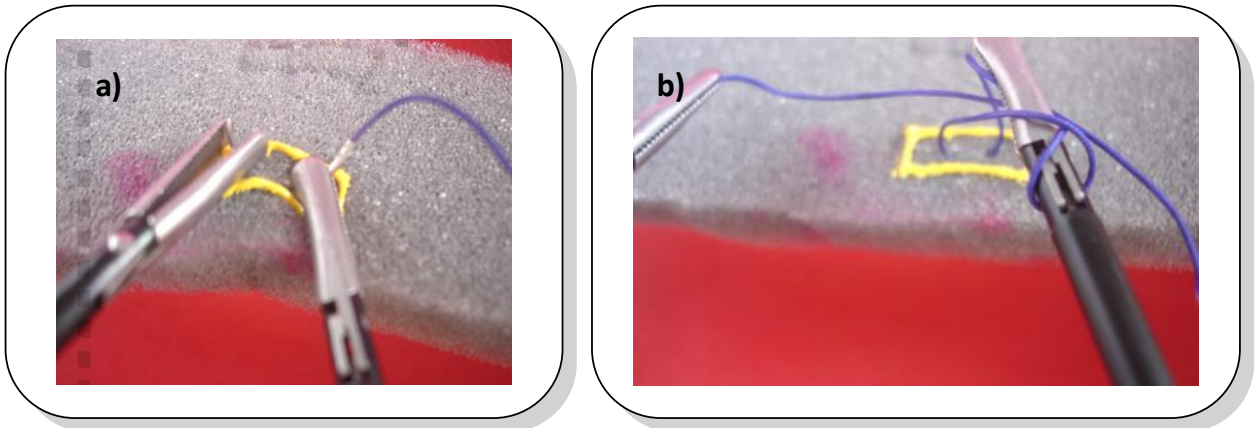


Figure 58 : Exercice du nœud. a) passage de l'aiguille. b) réalisation du nœud

Nous avons classé les exercices en fonction de leurs caractéristiques chirurgicales (Tableau 14) :

- Mobilité : se définit en fonction du nombre d'éléments mobiles
- Main : se définit par le nombre de mains nécessaires pour réaliser l'exercice
- Profondeur : se définit par l'impact de la vue en 2D ou 3D (l'exercice fait-t-il intervenir le concept de profondeur ?
- Réaliste : l'exercice s'apparente-t-il à une vraie gestuelle de chirurgie ?

Tableau 14 : Classification des exercices en fonction de leurs caractéristiques

Exercices	Mobilité	Mains	Profondeur	Réaliste
Écrous	une	une	3D	Non
Aiguille	une	deux	3D	Oui
Sang	une	deux	2D	Oui
Nœud	deux	deux	2D	Oui

II.4. Protocole

Dans un premier temps, ces quatre exercices ont été réalisés une première fois sans qu'aucun retard (ROD = Retard de Oms Début) ne soit appliqué afin de familiariser les chirurgiens avec le home-trainer et les exercices. Puis, il a été demandé aux chirurgiens de remplir le pré-questionnaire ; ces mêmes exercices ont ensuite été à nouveau réalisés sans aucun retard à la fin de l'expérience (ROF = Retard de Oms Fin). Entre les exercices sans retard du début et de la fin de l'expérience, une courbe d'apprentissage a été réalisée pour les exercices avec retard.

Entre ces deux séries sans retard, chaque chirurgien a réalisé 2 séries de 10 exercices soit un total de 20 exercices avec retard (soit 4 exercices auxquels ont été appliqués 5 retards : 150, 200, 250, 300, 350 ms). L'ordre des retards et des exercices a été déterminé aléatoirement pour chaque individu et répertorié sur une feuille de route. Seul l'ingénieur qui modifiait le programme connaissait le retard appliqué, afin d'éviter tout biais dans l'évaluation subjective du chirurgien. Après chaque exercice avec retard, le chirurgien estimait la compatibilité du retard avec la réalisation d'un vrai geste chirurgical. Il choisissait entre quatre items : Item 1 : aucune difficulté pour réaliser l'exercice ; Item 2 : un certain inconfort existe, mais qui peut être compensé sans problème ; Item 3 : il est impossible de réaliser un geste opératoire mais il est possible d'aider quelqu'un à distance; Item 4 : il est impossible de travailler avec ce retard.

A la fin de l'expérience, nous avons demandé aux chirurgiens d'évaluer l'ensemble des exercices de l'expérience et les exercices grâce à une échelle visuelle allant de 1 à 4. Ils devaient les classer du plus difficile (= 1) au plus facile (=4).

II.5. Calcul des notes

Pour interpréter les résultats, il convient pour chaque exercice d'effectuer une moyenne des scores des deux séries d'exercices sans retard et en déduire une courbe d'apprentissage par exercice.

On obtient la note Réf

$$\text{Réf} = (\text{ROD} + \text{ROF}) / 2$$

ROD = exercice Retard de 0 ms au Début, ROF = exercice Retard de 0 ms à la Fin.

Ensuite la « note » de chaque exercice avec retard sera comparée à cette référence :

$$\text{Note finale (\%)} = (\text{note de l'exercice avec retard} / \text{référence}) \times 100$$

La principale difficulté est d'établir un lien entre la note finale d'un exercice et sa signification médicale. En effet, la note prend en compte essentiellement les temps de réalisation des exercices et des critères de précision. En chirurgie, l'augmentation de la durée opératoire n'est pas un critère discriminant, jusqu'à un certain point. Après discussion, un seuil à 200 % nous a semblé correct. Ceci

représente une durée d'intervention multipliée par 2. Nous restons dans ce cas dans des proportions médicalement et économiquement acceptables.

III. Résultats

Les résultats concernant la perception du délai par les chirurgiens après chaque exercice « retardé » est présenté dans la Figure 59. Celle-ci représente l'évaluation subjective de l'impact du délai sur le geste chirurgical et la possibilité de réaliser cet exercice pénalisé par le délai.

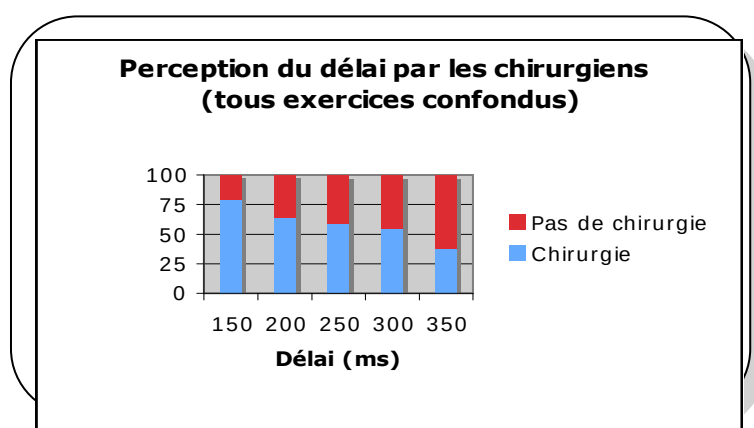


Figure 59 : Perception de l'impact du délai sur un éventuel geste

Nous avons calculé les courbes de régression du pourcentage de chirurgien estimant la possibilité de réaliser un geste chirurgical rapporté au délai et à l'exercice (Figure 60).

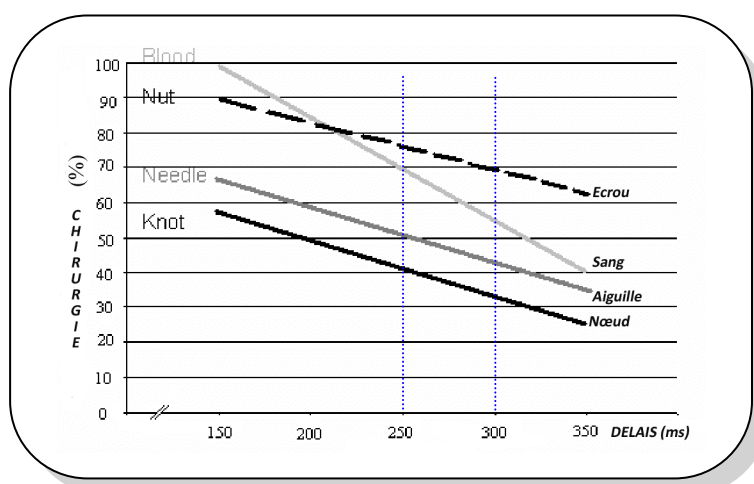


Figure 60 : Courbes de régression : chirurgie envisageable / délai pour chaque exercice

Les résultats obtenus pour chaque exercice sont résumés dans les tableaux ci-dessous : écrou (Tableau 15), aiguille (Tableau 16), sang (Tableau 17) et nœud (Tableau 18) par tous les chirurgiens en termes de : temps de réalisation de l'exercice rapporté au délai, nombre d'échec (exercices interrompus) et évaluation subjective du délai (CP = chirurgie possible ; CI = chirurgie impossible).

Tableau 15 : Résultats de l'exercice Écrou pour tous les chirurgiens

ECROU			
Délai	Durée (s) (moyenne + sd) (et % / ref)	Nbres exercices interrompus (/60)	Moyenne appréciation subjective délai
Ref : 0 ms	49±11 (100)	7	
150 ms	81±16 (165)	9	CP
200 ms	85±37 (173)	11	CP
250 ms	94±26 (192)	6	CP
300 ms	96±12 (196)	6	CP
350 ms	123±53 (251)	7	CP

Tableau 16 : Résultats de l'exercice des aiguilles pour tous les chirurgiens

AIGUILLE			
Délai	Durée (s) (moyenne + sd) (et % / ref)	Nbres exercices interrompus (/60)	Moyenne appréciation subjective délai
Ref : 0 ms	83±56 (100)	0	
150 ms	180±112 (217)	0	CP
200 ms	164±102 (198)	1	CI
250 ms	150±72 (181)	1	CP
300 ms	165±81 (199)	2	CI
350 ms	189±150 (208)	0	CI

Tableau 17 : Résultats de l'exercice du sang pour tous les chirurgiens

SANG			
Délai	Durée (s) (moyenne + sd) (et % / ref)	Nbres exercices interrompus (/60)	Moyenne appréciation subjective délai
Ref : 0 ms	56±34 (100)	0	
150 ms	87±63 (155)	0	CP
200 ms	91±30 (162)	0	CP
250 ms	90±37 (160)	1	CP
300 ms	115±41 (205)	0	CP
350 ms	178±79 (317)	3	CI

Tableau 18 : Résultats de l'exercice du nœud pour tous les chirurgiens

NŒUD			
Délai	Durée (s) (moyenne + sd) (et % / ref)	Nombres d'exercices interrompus (/60)	Moyenne appréciation subjective délai
Ref : 0 ms	101±58 (100)	0	
150 ms	201±103 (199)	1	CP
200 ms	180±142 (178)	3	CI
250 ms	190±109(188)	1	CP
300 ms	193±94 (191)	3	CP
350 ms	231±91 (228)	2	CI

Le Tableau 19 récapitule également les niveaux de difficultés estimées des exercices par les chirurgiens.

Tableau 19 : Classement des exercices en termes de difficulté de réalisation

Exercices	Ecrou	Sang	Aiguille	Nœud
Exercice le plus difficile	20 %	7%	33%	40%
Exercice le plus facile	46%	30%	15%	7%

La courbe d'apprentissage était effective pour tous les sujets et pour tous les exercices. Le temps de réalisation des exercices était très dépendant des sujets. Ceci explique les larges standard déviations dans nos résultats. Certains sujets ont demandé à arrêter des exercices avec retard car ils les jugeaient trop difficiles voire impossibles à réaliser. Il est à noter que le délai a un impact sur le temps de réalisation des exercices, car pour tous les exercices et tous les délais, le temps de réalisation retardé a toujours été plus important que le temps de réalisation sans retard.

IV. Discussion

Notre étude met en évidence un seuil de 350 ms qui ne semble pas compatible avec un geste chirurgical. En effet, lors de l'évaluation subjective du délai, pour ce délai de 350 ms, plus de 50% des chirurgiens estime qu'il n'est pas compatible avec un geste chirurgical. Ceci est corroboré par les moyennes d'appréciation subjective des délais qui sont toutes incompatibles avec un geste pour 350 ms. Lorsque l'on reprend les courbes de régressions, entre 300 et 350 ms toutes les courbes sont passées sous la barre des 50% sauf pour les écrous. Ceci s'explique car l'exercice des écrous est jugé le plus facile par presque 50% des sujets ayant participé à l'étude. Cela est parfaitement visible par sa position haute dans les courbes de régression. Il nécessite un temps plus court de réalisation et met en jeu moins de manipulation. L'impact du retard est moins important que pour des exercices jugés plus difficiles comme celui de l'aiguille et du nœud.

Nous avons pu constater deux types de stratégies développées par les chirurgiens pour s'adapter au retard. Certains chirurgiens réalisaient des gestes très lents pour atteindre la cible très progressivement, alors que d'autres adoptaient la stratégie inverse qui consistait à réaliser des gestes normaux (donc rapides) avec une adaptation à proximité de la cible. Cependant, il s'agit d'un constat non étayé par une analyse précise de la gestuelle des chirurgiens. Cette carence d'information sur la gestuelle représente probablement un des biais de notre étude. L'impact du délai est probablement différent sur ces deux stratégies.

L'exercice du nœud était considéré par les chirurgiens comme un des plus difficiles à réaliser. Ceci explique que le seuil de 200% sur les courbes de régression soit atteint pour un délai moindre par rapport aux autres exercices. Dans cet exercice, le contrôle visuel est primordial pour bien positionner l'aiguille sur le porte-aiguille, bien piquer dans la cible et réaliser les nœuds. Faire un nœud est une procédure assez complexe en coelioscopie. Les gestes réalisés sont assez courts, non linéaires, avec des changements d'orientation pour aller récupérer l'extrémité du fil et réaliser les nœuds. Lors des déplacements linéaires et longs (par exemple pour prendre un écrou) la précision et le contrôle visuel sont moins importants. Une autre donnée qui complexifie le geste est la mobilité des cibles. Dans les exercices des écrous, de l'aiguille et du sang, les cibles étaient immobiles et offraient une référence spatiale fixe dans la scène. Dans l'exercice du nœud, la cible est mobile : elle est localisée sur une mousse non fixée. La mobilité de la cible représente la mobilité des tissus lors d'une suture digestive.

La difficulté, lorsqu'apparaît un retard dans la transmission du flux vidéo, concerne le contrôle des éléments mobiles. Ceci est donc particulièrement vrai dans les exercices de l'aiguille (le passage des chas impose un changement continu d'instrument pour se saisir de l'aiguille) et du nœud (contrôle de la position de l'aiguille et du fil lors de la réalisation du double nœud). Lors d'un geste chirurgical soumis à un éventuel retard, les séquences les plus complexes sont celles qui vont être plus rapidement limitatives. En effet, les temps de dissections vasculaires (risques hémorragiques) ou de sutures digestives (risque de fistules et péritonite en cas de malfaçon) vont limiter au maximum le retard maximal envisageable.

Le chirurgien acceptera et pourra s'adapter à un délai long dans les moments peu critiques mais refusera de prendre des risques inconsidérés pour son patient lors des gestes potentiellement dangereux. Ceci explique que nous avons retenu la limite de 300 ms comme délai maximal acceptable.

Notre expérience n'a cependant pas pris en compte la capacité d'adaptation des chirurgiens. En effet, toute nouvelle technique, la coelioscopie, la chirurgie robotique nécessite un apprentissage chirurgical qui permet souvent au chirurgien de s'adapter dans des délais plus ou moins importants. Nous avons vu que l'introduction d'un délai a automatiquement entraîné une augmentation du temps de réalisation des exercices. Cependant dans notre protocole, la période d'entraînement était relativement courte et notamment pour les exercices avec retard. Il est probable qu'avec un entraînement approprié les chirurgiens parviennent à améliorer leur performance et leur dextérité pour les exercices avec délai.

Par ailleurs, un deuxième élément permettrait très probablement d'augmenter la capacité d'adaptation des chirurgiens. Le protocole a été réalisé en 2D, c'est à dire en vision coelioscopique. Cependant, le problème du volume d'informations à transmettre se pose pour la chirurgie robotique dans le cadre de la téléchirurgie à longue distance. Ceci implique donc un retard mais également une vision 3D qui en elle-même simplifie le geste chirurgical puisqu'elle diminue le problème d'appréciation de la profondeur. Réaliser l'expérience en 3D impose cependant une re-synchronisation des deux images retardées, phénomène plus aléatoire et consommateur de temps dans le montage.

Un dernier élément également important à prendre en compte est la nécessité d'avoir un délai constant. En effet, si le sujet doit maîtriser un court délai au décours d'un geste et que, brusquement, ce délai devient beaucoup plus long, le chirurgien court qui avait adapté son geste au délai court aura un geste démesuré et dangereux au moment du changement du délai car la retranscription de son acte sera retardée sur le moniteur.

Chapitre 2 :

Impact de la compression video en Téléchirurgie à longue distance

I. Introduction

En introduction, nous avons envisagé le réseau Internet comme possibilité pour faire transiter les informations relevant d'un éventuel geste de téléchirurgie à longue distance ou *telementoring*.

En effet, l'opération « Lindbergh » avait mobilisé une connexion optique dédiée et mise à disposition par France Telecoms. Une quarantaine de personnes et notamment de très nombreux ingénieurs travaillaient pour assurer une « Qualité de Service » (QoS) continue durant toute l'intervention entre New York et Strasbourg. Comme nous l'avons déjà souligné, ceci n'est pas applicable au quotidien. Un réseau peu onéreux et facile d'accès doit plutôt être envisagé pour démocratiser la pratique qui reste confidentielle à l'heure actuelle. Le réseau Internet peut sembler une alternatives aux fibres dédiées qui est peu onéreux, avec une bonne couverture notamment sur la France et qui peut se concevoir dans un premier temps sur des réseaux protégés. Afin d'avoir un ordre d'idée sur le réseau Internet « général », il est constitué de fibres optiques offrant le plus souvent une transmission théorique de 100 Mégabits/s. Le réseau qui arrive chez les particuliers connectés à l'ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*, traduit en français par Liaison Numérique Asymétrique) est à un débit théorique de 20 Mbits/s. Cependant ces flux théoriques ne représentent pas toujours la valeur réelle du débit.

Le flux vidéo issu du robot da Vinci[®] est de 2x270 Mbits/s. Il convient d'en diminuer le volume. Ceci n'est réalisable qu'en appliquant une compression à la vidéo.

La compression d'image ou de vidéo se définit comme une action visant à diminuer les informations contenues dans cette image ou cette vidéo en codant ses données et en supprimant les données redondantes ou non visible à l'œil humain. Ceci fait appel aux caractéristiques de l'œil humain.

II. Historique de la compression

A l'heure actuelle, les enjeux de la compression sont majeurs. Les informations circulant sous formes numériques (images, vidéos...) nécessitent des moyens de stockage et de transfert dépassant les capacités actuelles, à l'état natif des données. Historiquement, les premiers travaux sur la compression ont débuté dans les années 60 sans grand résultat jusqu'au début des années 80 où une collaboration entre Philips et Sony a permis la mise au point du Compact Disc Audio (CD), permettant de stocker un volume important d'informations audio (60 à 74 min de musique) sur un petit disque de 11,5 à 12 centimètres de diamètre grâce à la transformation d'une information analogique en numérique. Le début de la numérisation a permis de développer secondairement la compression et notamment, la compression des images dans un premier temps, suivie de la compression des vidéos. Cette dernière a été plus longue à se mettre en route compte tenu du volume d'informations cumulé dans une vidéo. Dans cette problématique de compression, il est nécessaire d'avoir une normalisation des systèmes de codages et décodages, normalisation qui a été obtenue grâce à la création du « *Motion Picture Expert Group* » (MPEG) sous l'auspice de l'Organisation Internationale de Standardisation (ISO) en 1988. L'ISO travaille également en étroite collaboration avec l'*Internationale Electrotechnical Commission* (IEC).

Il existe deux types de compressions, celle « sans perte » qui se définit comme la possibilité de diminuer le volume d'information, puis de le restituer ad integrum mais avec une réduction toutefois modérée des informations, et la compression « avec perte » qui permet des taux de compression bien plus importants mais induit une altération irréversible de l'image ou de la vidéo. Dans le cadre de la téléchirurgie à longue distance, compte tenu de la nécessité de réduire fortement le volume d'information à transmettre en provenance de l'endoscope du robot, seule la compression avec perte peut, ici, s'envisager.

Pour réaliser la compression et la décompression des vidéos, des systèmes appelés CODEC (**C**ompression-**D**écompression) sont nécessaires. Ils sont utilisés pour l'envoi d'informations mais également pour le stockage de ces mêmes informations afin de diminuer le volume à garder en mémoire. Les CODECS intègrent l'information numérique, ils la compressent, et assurent l'envoi des paquets dans le réseau. En zone de réception, le même système assure la décompression de l'information et la restitution de l'information numérique. Ces systèmes travaillent conjointement sur le même type de format de compression. Un même CODEC peut être compatible avec plusieurs algorithmes de compression, mais une information codée avec un algorithme ne pourra être décodée qu'avec ce même algorithme.

De nombreux encodeurs « avec perte » sont disponibles, notamment les standards MPEG qui sont utilisés dans des applications grand public comme la télévision numérique. La première norme

mise au point était la norme MPEG-1 ISO/CEI 11172-1 à 5. Ce standard s'appliquait aux CD vidéo et audio. Ensuite, la norme a évolué et un nouveau standard a été mis au point, le MPEG-2, essentiellement développé pour la vidéo et la télévision. C'est, à l'heure actuelle, le standard utilisé pour la Télévision Numérique Terrestre (TNT). Cependant cette norme continue à évoluer et d'autres standards ont fait leur apparition.

III. Techniques de compressions

III.1. Organisation d'une vidéo

Une vidéo est composée de plusieurs images. Ces images peuvent être découpées en pixels. Un pixel est défini comme le plus petit élément constitutif d'une image numérique. Le terme provient de la contraction de deux termes anglais **P**icture-**e**lement.

⇒ Dans une image noire et blanche, on attribuera 2 valeurs possibles au pixel. En effet, on a deux possibilités :

- noir = 0
- blanc = 1

Ici on code chaque pixel sur 1 bit.

Si on code chaque pixel sur 2 bits on aura un codage de ce type

- noir = 00
- gris foncé = 01
- gris clair = 10
- blanc = 11

On gagnera donc deux nuances par rapport à un codage noir/blanc.

⇒ Dans une image en niveaux de gris, classiquement, on retient 256 niveaux de gris : du niveau 0 (noir) au niveau 255 (blanc). Chaque pixel sera déterminé selon son niveau de gris. Pour avoir un contraste satisfaisant à 256 niveaux de gris, chaque pixel sera codé sur 8 bits. Le codage se fait sur ce mode :

- | | |
|--------------------|------------------------------|
| Niveau 0 de gris | = 0000 0000 (c'est du noir) |
| Niveau 1 de gris | = 0000 0001 |
| Niveau 2 de gris | = 0000 0010 |
| Niveau 4 de gris | = 0000 0011 |
| | |
| Niveau 255 de gris | = 1111 1111 (c'est du blanc) |

Il faut noter qu'il est possible de coder les pixels avec 4 bits mais on perd en discrimination des détails puisque l'on n'aura plus que 16 niveaux de gris. Des pixels proches l'un de l'autre auront le même code alors qu'ils sont distincts à l'œil.

⇒ Dans une image en couleur, chaque pixel est caractérisé par une matrice. Il existe plusieurs types de matrices pour caractériser un pixel, cependant les plus couramment utilisées sont : la **matrice RVB** (RougeVertBleu) qui code le pixel en fonction de sa couleur et la **matrice YUV** (Y= luminance, U = chrominance blanc-rouge et V la chrominance blanc-bleu) qui code le pixel en fonction de la luminance et la chrominance. Ceci augmente donc les informations à transmettre pour une image couleur par rapport à un niveau de gris. En effet, dans une image couleur, chaque pixel est représenté par 3 composantes qui sont elles-mêmes codées sur 8 bits soit chaque pixel est codé sur 8×3 soit 24 bits. Le système de codage est donc plus volumineux et plus complexe que celui des images en niveau de gris.

Rappelons qu'un geste de chirurgie robotique ne peut, à l'heure actuelle, s'envisager qu'avec une vision en couleur et de la notion de profondeur qui nous est fournie par la vision stéréoscopique (grâce aux deux flux vidéo synchronisés). Il est en effet extrêmement complexe d'opérer avec une vision en nuances de gris. Nous nous trouvons donc dans le cas de figure d'un gros volume d'informations à transmettre.



Figure 61 : Exemple d'une même image en noir-blanc, niveau de gris et couleur

Prenons l'exemple d'une fibre optique, la transmission du codage se fait sous la forme d'un signal lumineux au travers de la fibre. On envoie donc des suites de 0 et 1 qui représentent chaque pixel de l'image. Le 1 correspond à « un signal lumineux » dans la fibre optique qui est éclairée et le 0 correspond à « pas de signal lumineux » dans la fibre optique. Le type de transmission est binaire. Il existe le même type sur les fibres en cuivre, avec un signal électrique ou pas, pour le code binaire. Ceci

est indépendant de la compression, il s'agit simplement du codage d'une image numérique. Il faut ensuite se souvenir qu'une vidéo est composée d'une succession d'images qui sera codée pour permettre la transmission dans la fibre optique.

On définit un réseau (quelque soit le support) par son débit en Bit/s.

Une fibre de 100 Mbits/s est capable de transmettre 100 000 000 signaux 0 ou 1 en une seule seconde. Pour un débit de 10 Gigabits/s, elle transmet 10 000 000 000 bits/s.

Avec ce mode de codage des images on comprend qu'il va être possible de réduire le nombre d'informations que l'on va transmettre. En effet, si les dix premiers pixel ont le même code, il sera plus simple de dire que le premier code se répète dix fois, plutôt que d'énumérer dix fois le premier code.

Pour ce faire, il faut hiérarchiser le découpage des images dans une séquence vidéo. Nous avons une séquence d'image et chaque image est découpée en tranches, elles-mêmes re-découpées en pixels.

La compression, nous allons le voir, va donc faire intervenir les similitudes dans une image ou une vidéo pour une part et les caractéristiques de l'œil humain pour une autre part.

III.2. Caractéristique de l'œil humain

III.2.1. Anatomie

La vision est possible par la présence de trois entités :

- l'œil : récepteurs de l'influx nerveux (nous en avons deux avec un axe légèrement différent ce qui permet une vision stéréoscopique comme pour la caméra du da Vinci®)
- le nerf optique et le chiasma optique transporteurs de l'information
- le cerveau et ses aires visuelles l'analyseur des données

Nous allons décrire succinctement les éléments capitaux pour la vision de l'œil humain. Nous aurons besoin de :

- la pupille qui est le diaphragme qui laisse passer le stimulus lumineux ; elle varie de diamètre en fonction de l'intensité lumineuse,
- la rétine qui tapisse la face postérieure de l'œil et qui permet la transformation de l'influx lumineux en un influx nerveux ; elle présente une zone particulière : la macula. La rétine représente donc le récepteur sensoriel de l'œil. Parmi les 10 couches cellulaires qui constituent la rétine, on retrouve deux types de cellules qui nous intéressent plus particulièrement, les cônes et les bâtonnets. Ce sont les récepteurs des informations visuelles (76). La répartition des cônes et des bâtonnets n'est pas homogène (Figure 62) (77). Au niveau de la partie postérieure de la rétine, on met en évidence une dépression située sur l'axe optique, la macula, qui correspond à une zone rétinienne à forte concentration de cônes.

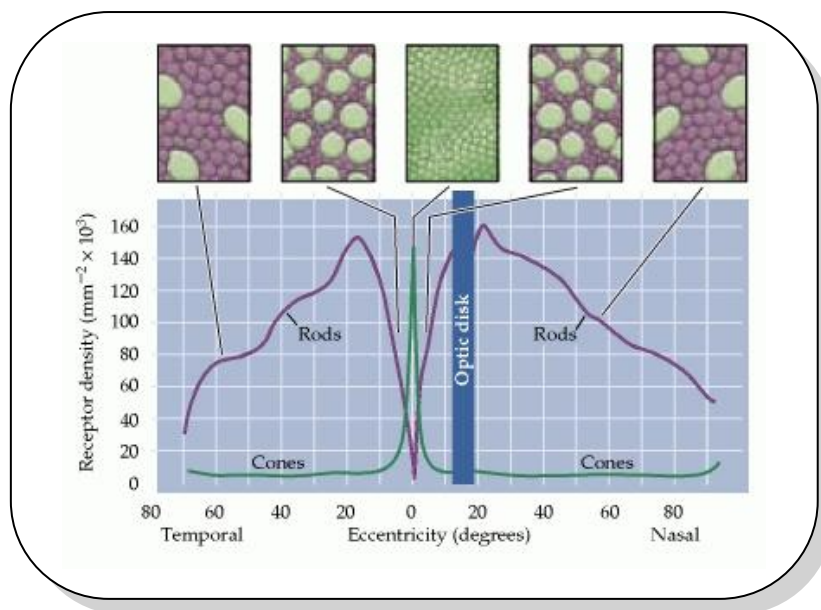


Figure 62 : Répartition des cônes et bâtonnets dans la rétine

- Les bâtonnets sont plus nombreux et beaucoup plus sensibles à la lumière que les cônes. Ils sont répartis sur l'ensemble de la rétine et assurent la vision nocturne. Ils permettent de voir dans la pénombre mais ne permettent pas de distinguer la couleur. La nuit, la vision se fait dans des tonalités de gris. C'est la vision **scotopique**.
- Les cônes : sont essentiellement répartis à proximité de la fovéa. Ils assurent la vision des couleurs et la vision diurne. C'est la vision **photopique**. Cette vision fournit une meilleure acuité visuelle et une meilleure résolution temporelle que la vision scotopique.

Il existe trois types de cônes qui en fonction des pigments qui les composent sont chacun sensibles à une couleur: vert, bleu et rouge. La fovéa correspond à la zone de vision la plus nette de jour. On voit avec la rétine mais on regarde avec la macula.

Ces récepteurs photosensibles sont connectés avec les protoneurones intra-rétiniens des voies optiques, les cellules bipolaires elles-mêmes connectées avec les deutoneurones qui s'assemblent pour former le nerf optique. Ce dernier transmet l'information au cortex visuel sur un mode rétinotopique. La rétinotopie désigne l'organisation spatiale de la projection ordonnée de l'image rétinienne sur le cerveau.

Du point de vue chirurgical, nous avons impérativement besoin d'un champ visuel net et en couleurs grâce à la fovéa et à sa forte concentration en cônes.

III.2.2. Physiologie de la vision

L'image visuelle est un stimulus sensoriel chargé d'information qui sera capté par un récepteur (l'œil et la rétine), puis transmis par l'intermédiaire d'une voie optique (le nerf optique) à un décodeur et un intégrateur (le cortex visuel). Le stimulus est caractérisé par une longueur d'onde, une intensité, un contraste et éventuellement un mouvement.

Les limites de la vision :

- Le message visuel composé de lumière correspond à une radiation électromagnétique. La lumière visible par l'œil humain, c'est à dire, captée par les photorécepteurs à une longueur d'ondes de 400 (violet) à 800 nm (rouge),
- Une quantité de lumière minimale est nécessaire pour visualiser un objet,
- L'œil est peu sensible aux hautes fréquences (),
- L'acuité visuelle peut être définie par la capacité du système visuel à discriminer les détails fins d'un objet dans le champ visuel. Elle est variable en fonction des individus.

Exemple : on doit pouvoir visualiser un détail de 1mm à une distance de 3m,

- Le seuil différentiel de couleur traduit la capacité du système visuel à discriminer 2 plages de couleurs très voisines,
- La résolution temporelle traduit la capacité du système visuel à séparer des images se succédant à intervalle régulier. Notre seuil est assez bas, en effet, lors de la projection d'une vidéo, il suffit d'un certain nombre d'images visualisées les unes derrière les autres pour donner l'impression d'une vidéo et non pas de la superposition d'images. En général, les vidéos sont constituées de 25 images par seconde. Ce phénomène fait en partie intervenir la persistance rétinienne : une image vue reste superposée aux images que l'on est en train de voir pendant une durée de 0,025 seconde. Cela est dû au temps de traitement biochimique de l'information optique. Ceci nous permet de faire d'une succession d'images assez rapprochées une animation.

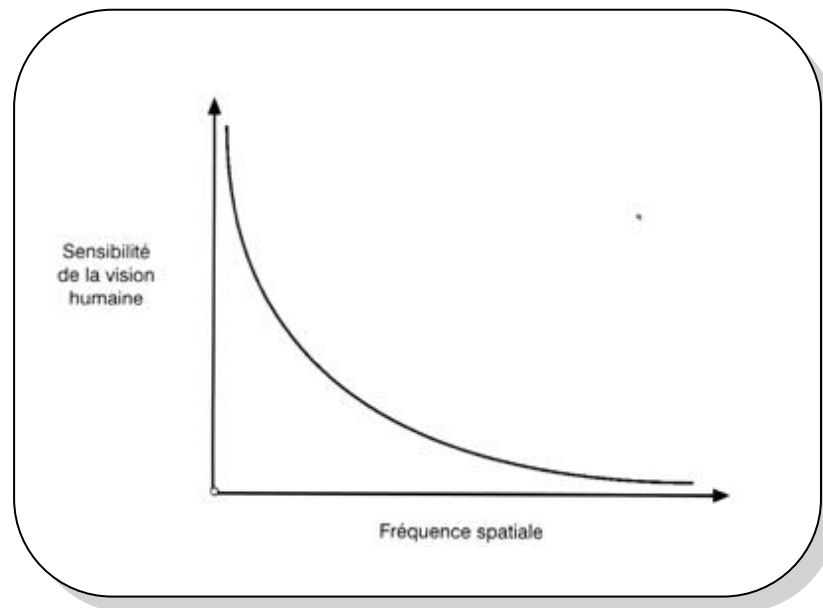


Figure 63 : Sensibilité de l'œil rapportée à la fréquence spatiale d'une image

III.3. Différents modes de compression

III.3.1. Compression sans perte

Cette technique de compression permet une restitution ad-integrum des informations compressées. Il existe plusieurs techniques de compression sans perte.

- Codage par répétitions : exemple RLE : cela revient à détecter et coder les répétitions dans une image.
- Codage par dictionnaire : les motifs récurrents sont associés à une entrée dans un dictionnaire
- Codage entropique : il se base sur les statistiques de l'image. On retrouve soit le codage type Huffman soit le codage arithmétique. Le codage entropique utilise les statistiques sur la source (l'image) pour construire un code, c'est à dire une application, qui associe à une partie de la source un mot code dont la longueur est variable en fonction des propriétés statistiques de la source. Les mots codes les plus courts seront utilisés pour les symboles sources les plus fréquents et au contraire, les mots codes les plus longs pour les symboles sources les plus rares.

Ce type de compression sans perte permet d'assurer une réduction du volume à transmettre dépassant difficilement 10 à 15 % du volume total. Si l'on reprend notre hypothèse sur la problématique réseau qui voulait que l'on parvienne à réaliser un transfert de la vidéo d'un geste

robotique à un débit de 20 Mbits/s pour un débit initial à 540 Mbits/s, il semble clair que la compression sans perte ne peut pas être envisagée ici.

III.3.2. Compression avec perte

La deuxième technique est la compression avec perte. Ici, la restitution de l'image ou de la vidéo ne se fait pas ad integrum, mais permet des niveaux de compression beaucoup plus intéressants en termes de réduction des volumes avec une qualité qui peut être jugée acceptable.

Cette compression avec perte fait appel à une compression spatiale appliquée à l'image. Si l'on parle de vidéo, est ajouté à cette compression spatiale, une compression temporelle faisant intervenir les redondances entre les images. Cette compression temporelle fait intervenir des vecteurs de mouvements qui permettent de prédire les modifications dans une vidéo. Il n'y a pas de limite théorique à la compression avec perte, cette limite existe simplement sur l'aspect de l'image restituée. Nous devrions donc pouvoir trouver le débit adapté au réseau. Cependant, nous devons nous assurer que les vidéos sont exploitables par les chirurgiens.

La compression avec perte se définit par une compression spatiale qui agit sur l'image et une compression temporelle qui s'applique sur les redondances inter-images.

III.3.3. Technique de compression spatiale

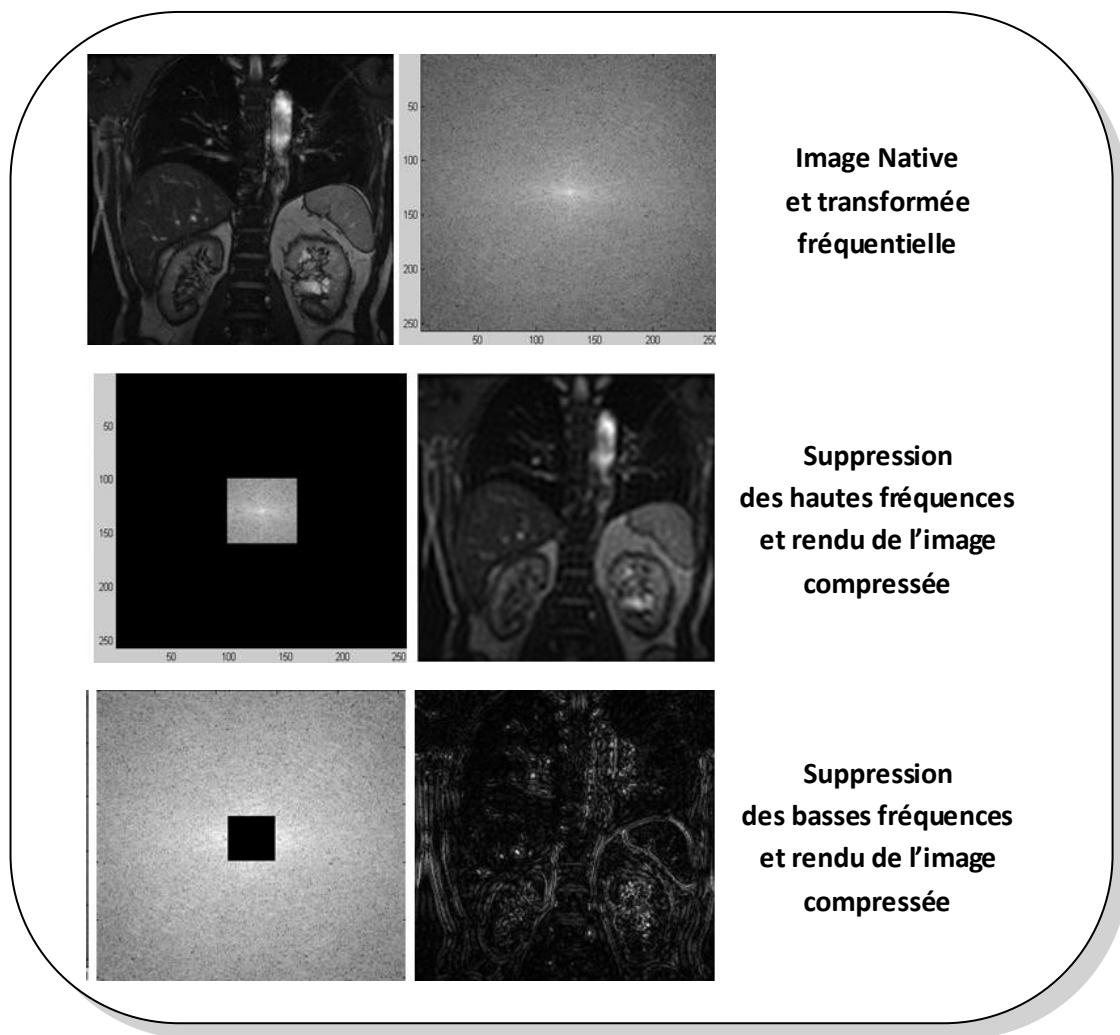
Dans la technique de compression spatiale, on peut intervenir à plusieurs niveaux, certains très basiques et d'autres très évolués :

- Diminuer la résolution : on réalise un sous-échantillonnage (c'est le fait de diminuer la taille de la matrice, on a moins de bits à envoyer et on occupe donc moins de place)
- Diminuer le nombre de nuance : on réalise une sous-quantification (on diminue donc le nombre de bits à transmettre)

Ces deux modes d'actions sont abruptes et non intelligents.

Mais on peut ensuite avoir une action plus subtile et moins délétère pour la qualité de l'image (Figure 64).

- Utilisation de l'information fréquentielle : on isole les différentes fréquences de l'image [les hautes fréquences correspondent aux zones de forts contrastes (contour et bruit) et les basses fréquences correspondent aux zones homogènes (le fond)]. On part du principe que l'œil humain ne peut pas distinguer les hautes fréquences surtout à grandes distances. Et on va donc diminuer la transmission des hautes fréquences. Sur cet exemple illustrant l'impact des suppressions des hautes et basses fréquences (Figure 64), il semble clair que l'on perd plus d'informations essentielles lorsque l'on touche aux basses fréquences que lorsque l'on supprime les hautes fréquences.



**Figure 64 : Exemple de transformée fréquentielle
et de rendu après suppression des hautes et basses fréquences**

Cette compression spatiale est valable pour différents algorithmes de compression tels MPEG2, MPG 4 et notamment H.264.

Les éléments variables entre ces différentes normes se font, pour la compression spatiale, sur l'étape de transformation au niveau fréquentiel :

- Pour MPEG 2 : La transformation est de type Transformation en Cosinus Discret (DCT) pour passer dans le domaine fréquentiel. L'algorithme « coupe » l'image en bloc de 8 pixels et le schéma de compression s'applique au bloc.
- Pour MPEG 4 : La transformation est également de type DCT. Mais les blocs sont de tailles variables. Le but est de réunir les blocs qui présentent des similitudes. Il existe donc une dépendance statistique entre un pixel et son voisin en raison de zones homogènes dans l'image. Le bloc ici peut posséder 16 pixels voir plus.
- Pour H.264 : les blocs adjacents à un bloc peuvent intervenir dans la prédiction de ce bloc. Il existe de nombreuses caractéristiques à chaque algorithme.

III.3.4. Technique de compression temporelle

Elle a pour but de diminuer la redondance d'information entre plusieurs images entre elles.

Lorsque l'on code une succession d'images qui compose une vidéo, on fait intervenir la compression temporelle. Afin de diminuer les redondances temporelles d'une séquence, on va utiliser le codage différentiel et la compensation de mouvement.

En effet, dans une vidéo faisant défiler 25 images par minute, il existe des redondances entre les différentes images. Nous avons par exemple un paysage fixe avec un sujet en mouvement dans l'image i . Le sujet en mouvement n'est pas au même endroit dans le paysage entre l'image i et l'image $i+1$. Cependant, de nombreux éléments sont identiques entre deux images successives voir même plusieurs images successives (Figure 65). Une des solutions va pouvoir être de ne coder que les différences entre les deux images. Dans ce dessein, le mouvement peut être déterminé par des vecteurs de mouvements.



Figure 65: Compression temporelle.

- 1) images successives avec mouvement.**
- 2) détermination des zones Fixes (orange) et Mobiles (verte) entre l'image initiale et les suivantes.**

Dans une même image, nous allons avoir différentes zones :

- les zones d'images Fixes (zones F). À ce niveau, la compression spatiale va s'appliquer à réaliser une compression offrant une bonne définition spatiale de l'image (a) avec des détails bien visibles. Cette image (a) va ensuite servir à prédire l'image (a+1) au niveau des zones F (exemple de la maison dans la Figure 65).
- les zones d'images Mobiles (zones M). Cette zone concerne une portion de l'image i en mouvement. Entre l'image (a) et l'image (a+1), on va avoir une translation de l'élément en mouvement (exemple du sujet qui court dans la Figure 65: Compression temporelle). À ce niveau, on va privilégier la résolution temporelle à la résolution spatiale. Une analyse du mouvement va donc être nécessaire.

- À noter qu'entre une image (a) et une image (a+1), l'information de différence va être appelée « signal d'erreur ».

La Figure 66 présente un exemple chirurgical concret, où nous envisageons un exemple issu d'une vidéo réalisée au cours d'une procédure chirurgicale au robot. On visualise sur cette figure 2 images consécutives extraites d'une vidéo de tumorectomie rénale. À l'œil nu, il ne semble pas exister de différence entre l'image (a) et l'image (a+1) et on pourrait même envisager qu'il s'agit d'une seule et même image. Par un procédé de soustraction d'image $(a) - (a+1)$, on peut déterminer informatiquement quelle est la différence entre les deux images. Cette différence est appelée source d'erreur.

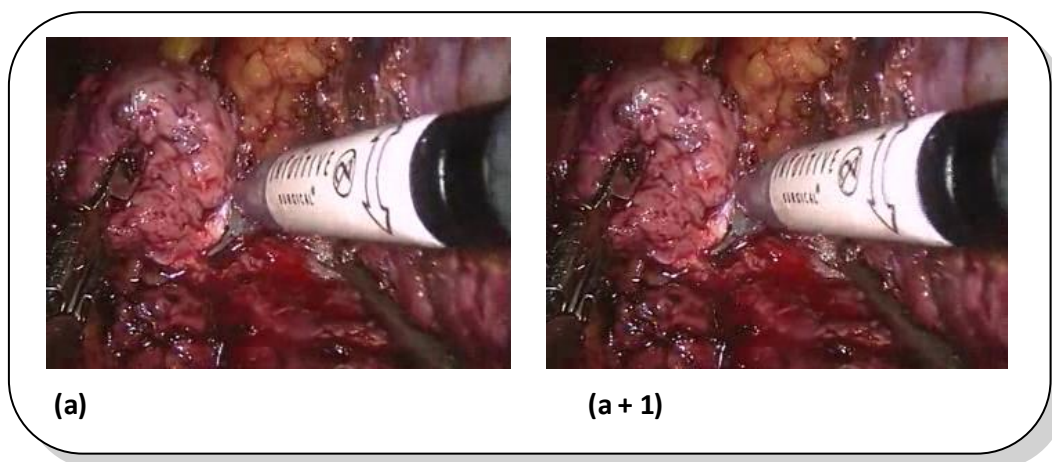


Figure 66 : Vue per-opératoire d'une tumorectomie. Image (a) et (a+1)

La source d'erreur, c'est-à-dire, la différence entre les 2 images consécutives (a) et (a+1) de la Figure 66, est représentée Figure 67. On notera que l'élément où ressort une différence plus importante est localisé sur le ciseau qui, dans la vidéo, est l'élément le plus mobile puisque le chirurgien est en train de sectionner le parenchyme rénal.



Figure 67 : Source d'erreur entre l'image (a) et (a+1)

On va donc utiliser cette redondance entre deux images consécutives pour diminuer la quantité d'information à transmettre. Cela fait intervenir le codage différentiel. Il utilise une image dite de référence I (I pour Intra) et on va ensuite comparer l'image qui suit I+1 à cette image de référence I pour déterminer les éléments qui se sont modifiés entre les deux. On va ensuite appliquer une méthode de prédiction adaptative du contenu d'une image en mouvement. Il s'agit d'anticiper le mouvement d'un élément à partir des images antérieures. On doit donc réaliser une estimation du mouvement. Cette estimation sera d'autant plus optimale que la vitesse sera modérée et le mouvement homogène. L'estimation sera appliquée sur les blocs de pixels appartenant aux zones M (mobiles). On essaie de prédire, de l'image précédente, la position de ce bloc dans l'image actuelle. Il existe deux méthodes de prédiction avec compensation de mouvement :

- Méthode des équations récursives : consiste à extrapoler le mouvement (méthode peu robuste non développée ici).
- Méthode des vecteurs de mouvements : ils mettent en correspondances les éléments en mouvement dans une image et les précédentes (la plus utilisée notamment dans les algorithmes de type MPEG).

On obtient donc après l'image de référence I, une image prédite P. Dans une vidéo compressée, on intercalera périodiquement une image I puis, on en déduira les images P suivantes.

Cependant, ces images I et P ne sont pas suffisantes pour pouvoir compresser efficacement une vidéo. En effet, dans certaines scènes, des éléments nouveaux peuvent intervenir. Mais ces éléments nouveaux ne pourront pas être prédits des images I antérieures puisqu'ils ne sont pas encore apparus dans ces images passées. Ils appartiennent aux images futures. Apparaissent à ce niveau le troisième type d'images qui va être intégré : l'image bidirectionnelle ou image B. Cette image B va également être une image prédite mais prédite d'une image I ou P passée ou future par rapport à

elle-même. Elle ne peut pas être prédite par rapport à une autre image B ce qui limite les possibilités de transmission d'erreurs.

Il faut cependant, lors de la réception des images par le décodeur, qu'en cas d'image B prédite d'une image I ou P future, ces images I ou P futures arrivent avant l'image B qui leur correspond (Figure 68).

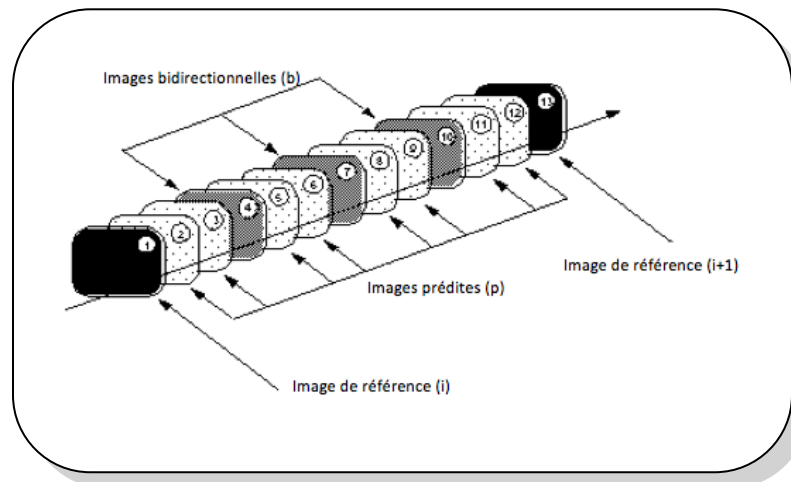


Figure 68 : Séquence de vidéo compressée selon MPEG

Lors de la transmission d'une séquence vidéo compressée, on va répertorier des GOP (Group Of Picture). Ces GOP débuteront toujours par une image i de référence qui sera la première à encoder. On retrouvera ensuite une succession d'image p et b . Les images p apparaissent à intervalles réguliers et les images b seront intercalées entre les images p . Hormis la présence d'une première image i dans le GOP, l'organisation des images est très variable et dépendante des algorithmes de compression.

III.4. Algorithme de compression type MPEG

Les algorithmes de compression appartenant à la famille MPEG ont évolué au cours des années. Le premier algorithme créé le MPEG 1 a été finalisé en 1992. Il s'appuyait sur la compression spatiale et temporelle. Puis s'est développé le MPEG 2 en 1996, standard robuste et couramment utilisé. Cet algorithme a été mis au point pour la télévision et notamment pour la TNT actuellement et le stockage sur DVD. Le dernier développé est le standard H.264 qui est apparu en 2003.

Cet algorithme est actuellement largement utilisé pour les connexions Internet haut débit, pour la téléphonie, le stockage en ligne de vidéo (par exemple : You Tube), pour le stockage sous forme de Blu-Ray et HD DVD.

Le principe de compression de H.264 est toujours basé sur la compression d'un GOP. Mais il existe des différences dans le codage spatial et temporel entre MPEG 2 et H.264.

D'une part, au niveau spatial, en MPEG 2, l'image est découpée en bloc de 8 pixels et la chaîne

de codage s'applique au bloc. En H.264, l'image est découpée en blocs de taille variable. On essaie de réunir des blocs homogènes entre eux. Ceci permet de délimiter des blocs de 16 pixels et plus.

Au niveau temporel, la compensation de mouvement de H.264, basée sur les blocs, a été largement améliorée par rapport à celle utilisée pour MPEG 2 par le biais des vecteurs de mouvements. En H.264, il existe des vecteurs plus rapides ou plus lents qui ont la possibilité de s'adapter au mouvement alors que pour MPEG 2, tous les vecteurs étaient homogènes.

Par ailleurs, on retrouve des améliorations :

- il existe d'autres types d'images (en plus des images I, P, B) qui sont les images « SP frame » et « SI frame ». elles augmentent la qualité de compression de H.264,
- les blocs sont très variables en taille et en forme et s'adaptent plus finement au contenu spatial et en mouvement des images,
- l'image codée peut être prédite à partir de plusieurs images de références,
- la quantification de la chrominance est plus fine que la quantification de la luminance,
- le mode de compression H 264 diminue l'effet bloc qui est un artéfact de la compression,
- il existe une adaptabilité au réseau.

Cet algorithme permet d'obtenir un gain en qualité associé à une diminution du débit. Il présente donc de meilleures performances que MPEG 2. Cependant, le système de traitement est plus complexe et nécessite une plus grande mémoire pour le codage et décodage.

Par ailleurs, on a différents besoins en vitesse de compression/décompression :

On pourra avoir besoin d'une compression lente et une décompression rapide, c'est le cas des DivX. Il n'y a pas d'urgence à compresser mais la restitution doit être rapide. Et on pourra avoir besoin d'une vitesse de compression rapide avec tout le temps nécessaire pour décompresser, c'est le cas de photos prises de Mars par satellite et envoyées sur terre pour étude et analyse. Dans le cas de la téléchirurgie, l'impératif temps existe tant à la compression qu'à la décompression. Il convient de trouver des algorithmes efficaces et peu consommateurs en terme de temps dans le processus.

III.5. Compression d'images dans le milieu médical

L'introduction de ces méthodes de réductions du volume des informations médicales était indispensable compte tenu de l'accroissement des données à partager, stocker et archiver. Ceci s'est accru avec l'avènement de la télémedecine, télémedecine qui est à l'heure actuelle en plein essor, sous différentes formes :

- Les systèmes d'archivages en imagerie médicale : le développement et le perfectionnement des outils radiologiques (IRM, scanner, TEP Scanner) qui permettent à l'heure actuelle, l'acquisition de milliers d'images pour un seul examen ont fait apparaître des impératifs d'archivages des informations qui n'existaient pas ou peu lorsque l'examen était présenté sur des planches de radiologie.

La problématique d'un système d'archivage était déjà évoquée depuis les années 70 en Europe déjà sous le terme de « Picture Achieving and Communication Systems » PACS. Les premières implantations ont eu lieu en 1980 aux Etats-Unis, puis sont arrivées en Europe. Le vrai essor de cette technologie a débuté vers les années 90.

Les impératifs de volumes à stocker ont imposé l'utilisation de la compression d'image couramment utilisée dans le milieu médical depuis plusieurs années par l'intermédiaire des (PACS) (78)(79). Assez rapidement aux vues du volume des informations à archiver et transmettre, aux vues des coûts que cela impliquait, il est apparu indispensable d'envisager une compression avec perte (80) (81) (82). Ceci a ouvert la « porte » à la télémedecine, qui est également très utilisée dans le cadre du diagnostic d'image.

- Le télédiagnostic qui est largement utilisé en radiologie, se développe d'autant plus dans les régions à faible démographie médicale et à faible densité de population (83) (84).
- Le télé-enseignement avec diffusion de cours dans les universités, vidéoconférences et également vidéotransmissions d'interventions chirurgicales lors des congrès. Ces dernières bien que courantes lors de congrès nécessitent actuellement des moyens importants et onéreux (6 à 8 lignes téléphoniques simultanées, éventuellement associées à des transmissions satellitaires...).

La collaboration des intervenants scientifiques et médicaux a été indispensable pour faire naître ces différents projets dans le domaine médical.

Dans le domaine chirurgical, et en chirurgie mini-invasive, le souci premier est de privilégier la qualité de l'image transmise. Les caméras proposées tant en coelioscopie qu'en robotique sont des caméras au minimum 3 CCD voire même pour la dernière génération du robot da Vinci® des caméras

Full HD (haute définition).

Le problème majeur est de tester l'introduction de la compression d'image en chirurgie, où l'impact du rendu de l'image chirurgicale est primordial sur le geste chirurgical lui-même. Les algorithmes de codage tirent parti des caractéristiques psychosensorielles de l'œil humain pour ne pas compresser les informations qui ne sont pas perçues ou redondantes. Le principe fondamental de la compression vidéo est de réduire autant que possible les redondances d'information dans les données, sans que la perte d'informations qui en résulte soit visible de manière flagrante pour l'œil humain.

Toute la difficulté réside dans le dosage du taux de compression, en effet, plus il est important et plus la dégradation de la qualité des images sera importante. Cette dégradation de la qualité a été évaluée dans cette étude selon un protocole détaillé dans la thèse de Nedja NOURI et qui ne sera pas exposé ici. Il a été mis au point grâce à une collaboration entre des spécialistes de la compression, des spécialistes de l'audio-visuel ayant une grande expérience des tests de la qualité des vidéos tant subjectifs qu'objectifs.

Note : Les détails de ce type de compression sortent du cadre de ma thèse et sont en partie confidentielle à cause d'une protection industrielle envisagée par le CRAN.

III.6. Test de la compression avec perte dans le monde chirurgical

L'évolution s'est poursuivie avec l'avènement de la télémedecine et les transferts d'images pour les actes de télédiagnostic.

Dans la sphère chirurgicale, les travaux sur la compression de vidéos chirurgicales robotiques deviennent indispensables en vue de gestes de téléchirurgie à longue distance. Il convient donc dans un premier temps de tester l'impact de la compression sur le ressenti des chirurgiens vis à vis de ces vidéos « dénaturées ».

Dans le cadre du projet RALTT, un travail préliminaire a été réalisé par Christophe BURLOT lors de son Master II. Il a étudié l'impact de la compression vidéo type MPEG 2 sur 7 chirurgiens experts en chirurgie robotique. Ce travail a permis de déterminer un niveau de compression acceptable pour les chirurgiens et qui serait compatible avec un geste chirurgical. L'algorithme MPEG 2 avait été utilisé car il représentait une norme mature, Il est encore à l'heure actuellement utilisé pour la télévision numérique. Cependant, nous avons mené une deuxième étude en comparant deux algorithmes :

MPEG 2 et H.264. Le but de cette étude était de déterminer le seuil de compression maximal tolérable pour une application de téléchirurgie à travers une évaluation de la qualité de vidéos encodées en utilisant les algorithmes précédemment cités. Cette évaluation permettrait de répondre à la faisabilité d'une transmission de vidéo compressée avec perte dans le cadre d'un geste de télétransmission voire de téléchirurgie réalisé sans saturer les réseaux de communication.

La poursuite de la collaboration s'est faite avec Nedia NOURI et ses encadrants sur l'évaluation de l'impact des vidéos compressées pour les chirurgiens. Le protocole de test a été mis au point par Mr D. ABRAHAM spécialiste en essais subjectifs et N. NOURI et sont détaillés dans sa thèse. Ils font à l'heure actuelle l'objet d'une étude en vue de déposer un brevet et ne seront donc pas exposés ici.

La distance étant un élément incompressible en téléchirurgie à longue distance, il convient de travailler sur le volume d'informations à transmettre. En effet, nous l'avons déjà mentionné, du volume d'information à transmettre va dépendre le réseau nécessaire à la transmission. Ce volume ne peut être diminué qu'en utilisant la compression des vidéos, car ces dernières représentent l'information la plus volumineuse.

Cependant la compression n'est pas un élément habituellement utilisé en chirurgie, même si le monde chirurgical apprécie les avancées technologiques qu'elle a permis notamment en radiologie en rendant très facilement accessible l'imagerie et notamment les scanners et IRM sur de simples ordinateurs. Au bloc opératoire, le chirurgien lorsqu'il visualise son geste sur un moniteur en coelioscopie ou sur la console en chirurgie robotique, désire disposer de la meilleure qualité d'image, pour apprécier au mieux le champ opératoire. Il faut donc établir dans un premier temps l'impact de la compression vidéo sur le chirurgien. Il faut déterminer les niveaux de compressions qui n'altèrent pas l'appréciation du chirurgien. Avant de soumettre au chirurgien une image compressée lors d'un geste chirurgical sur un patient, il faut envisager dans un premier temps une évaluation subjective de la qualité des vidéos compressées par les chirurgiens. Les modalités des tests ne doivent pas impacter directement le geste opératoire. Nous avons donc soumis à des chirurgiens des vidéos compressées à des niveaux variables de compressions.

Une étude préliminaire visait à évaluer l'impact de la compression de vidéos chirurgicales selon l'algorithme MPEG 2 sur la perception des chirurgiens. Le standard MPEG 2 avait été choisi car il représente une norme mature et stable, actuellement utilisée dans le cadre de la Télévision Numérique Terrestre. Cette étude a été menée par Christophe Burlot ingénieur chercheur au CRAN dans le cadre de son Master II de recherche.

III.7. Étude préliminaire sur l'impact de la compression vidéo MPEG 2 sur les chirurgiens

Cette étude a été réalisée grâce à la participation de 7 chirurgiens ayant une activité de chirurgie robotique.

Quatre vidéos ont été sélectionnées pour cette étude. Elles reprenaient des séquences de gestes couramment réalisés lors d'un geste chirurgical mini-invasif :

- une scène 1 : avec un instrument en mouvement dans le champ opératoire,
- une scène 2 : coagulation à la pince bipolaire,
- une scène 3 : dissection d'un espace graisseux,
- une scène 4 : Tamponnement d'une zone hémorragique avec une compresse.

Les résultats ont permis de mettre en évidence un seuil du débit de compression maximal tolérable est de 3,2 Mbits/s (soit compressé avec un taux de 85) pour la scène 1 qui représentait un mouvement d'un instrument dans le champ opératoire et de 2,9 Mbits/s (soit compressé avec un taux de 93) pour la scène 4 qui permettait de voir une compresse dans le champ opératoire. Ces deux scènes 1 et 4 étaient les plus discriminantes.

Ces valeurs de 2,9 et 3,2 Mbit/s pour les deux scènes montrent une homogénéité des observations car les deux débits sont très proches.

Il a donc été confirmé la possibilité d'introduire une compression avec perte dans la vision chirurgicale.

Les résultats ont permis de conclure qu'à partir d'un débit de 3,2 Mbits/s, aucun chirurgien n'observait de baisse de qualité des images compressées qui serait rédhibitoire vis-à-vis d'un éventuel geste et notamment d'un geste de téléchirurgie.

Les scènes, choisies pour leur représentativité de gestes chirurgicaux se sont révélées de valeur discriminante inégale :

Deux scènes sur quatre (scène 1 et scène 4) ont été discriminantes dans l'évaluation de l'impact de la compression.

Les scènes non statiques comme la scène 1 faisant intervenir un mouvement d'instrument dans le champ opératoire ou avec repère de netteté comme la scène 4 représentant un tamponnement avec une compresse, étaient plus sensibles à la compression. La compresse peut être assimilée à une trame quadrillée nette qui est très sensible à la compression.

Cette étude est une étape dans la validation de la compression des flux issus du robot da Vinci® dans l'optique d'une transmission du flux vidéo par Internet. Elle présente cependant des limites.

En effet, deux scènes sur quatre ont été non contributives pour la détermination d'un taux de compression maximal acceptable. Ceci est à tempérer par les résultats obtenus sur les deux scènes discriminantes. Le taux maximal de compression sans perte de qualité retrouvé est très proche dans les deux cas, garant de la fiabilité du seuil déterminé. En effet pour la scène 1 on avait un taux de compression à 3,2 Mbits/s et pour la scène 4 un taux de 2,9 Mbits/s.

III.7 Conclusion

Cette étude ouvre des perspectives nouvelles pour une application future de téléchirurgie. Elle montre qu'il est possible de réduire considérablement l'importance des moyens de transmission nécessaires pour une diffusion de données source correspondant à 2 fois 270 Mbits/s.

Elle permet d'ores et déjà d'envisager d'utiliser le réseau Internet pour des applications de télé-enseignement comme la transmission d'interventions chirurgicales en « live ».

III.8. Étude de la compression H.264

Après l'étude préliminaire qui avait été conduite par Mr Christophe Burlot, nous avons envisagé une étude similaire qui visait à évaluer et à comparer l'algorithme H.264 au MPEG 2 sur le ressenti des chirurgiens. Nous avons choisi cet algorithme H.264 car il est actuellement un des algorithmes les plus aboutis et les plus performants. La méthodologie a été reprise et améliorée en introduisant quatre vidéos qui semblaient plus adaptées (scènes avec les mouvements d'instruments).

Ce travail a été réalisé en collaboration avec Mlle Nedja NOURI, doctorante au CRAN pour la partie compression.

III.8.1. Matériel et méthodes : Sujets

Nous avons pour cette étude fait appel à des chirurgiens ayant une activité soit de chirurgie robotique, soit de chirurgie coelioscopique et soit des chirurgiens en formation. Ils avaient tous une expérience de chirurgie coelioscopique les rendant tout à fait aptes à juger de la qualité de ces images chirurgicales. Nous avons donc réuni un panel de 16 sujets. On dénombrait X femmes et X hommes, dont la moyenne d'âge était de 35 ans (extrêmes de 25 à 52). Il y avait 6 chirurgiens digestifs, 1 urologue, 3 chirurgiens thoraciques et 6 internes en formation. La notion de représentativité de la population testée est difficile à mettre en place dans ce genre d'étude.

III.8.2. Protocole de test

Nous soumettons donc les vidéos compressées à l'appréciation des chirurgiens qui leur attribuaient une note par rapport à un référentiel natif non compressé. Le détail du protocole de test ne sera pas exposé ici car il a été soumis à une demande de brevet, suite aux travaux de Nedia Nouri.

Les notes attribuées étaient comprises entre 0 et 100. Plus la note était élevée et proche de 100, plus l'impact de la compression sur la qualité était important. Alors la qualité de la vidéo compressée est jugée mauvaise par rapport à la vidéo native.

III.8.2.a) Séquences vidéos

Quatre séquences de gestes chirurgicaux ont été sélectionnées dans cette étude. Ils étaient issus d'une vidéo native du robot da Vinci® obtenue au décours d'un geste chirurgical.

III.8.2.a.i) Séquence 1 : Dissection du Told

Une première séquence représente une dissection au crochet coagulateur du Told gauche, c'est à dire d'un espace graisseux situé en arrière du colon descendant (Figure 69). On remarque par ailleurs un lacis de vaisseaux assez net sur le rétro péritoine. Cet espace est caractérisé par une différence de contraste assez nette entre la graisse du méso colon gauche et la graisse rétro péritonéale. Ceci permet au chirurgien de bien disséquer le Told sans entrer dans l'un ou dans l'autre des espaces. En effet, entre les deux, on retrouve la zone d'accolement du péritoine pariétal et péritoine viscéral. Nous avons choisi cette séquence car elle représente un espace relativement homogène et uniforme du point de vue graisseux mais avec une tonalité de jaune bien distincte. On retrouve, par ailleurs des mouvements d'instruments : un forceps (pince à préhension) et un crochet coagulateur. Au début de la scène, il existe un temps de coagulation à la pince « bipolaire » avec apparition de fumée. Ensuite on a des mouvements amples et rapides des instruments. Les scènes statiques en chirurgie sont extrêmement rares. On a en permanence des instruments en mouvement ou qui servent à exposer le champ opératoire dans les temps de dissections. La cavité abdominale présente une composante graisseuse assez importante qui justifie également du choix de cette séquence.

Cette séquence nous permet d'analyser l'impact de la compression sur :

- les mouvements amples et rapides des instruments
- la visualisation de l'extrémité du crochet lors du mouvement.
- la différence de tonalité entre l'espace rétro péritonéal et la graisse du méso colon

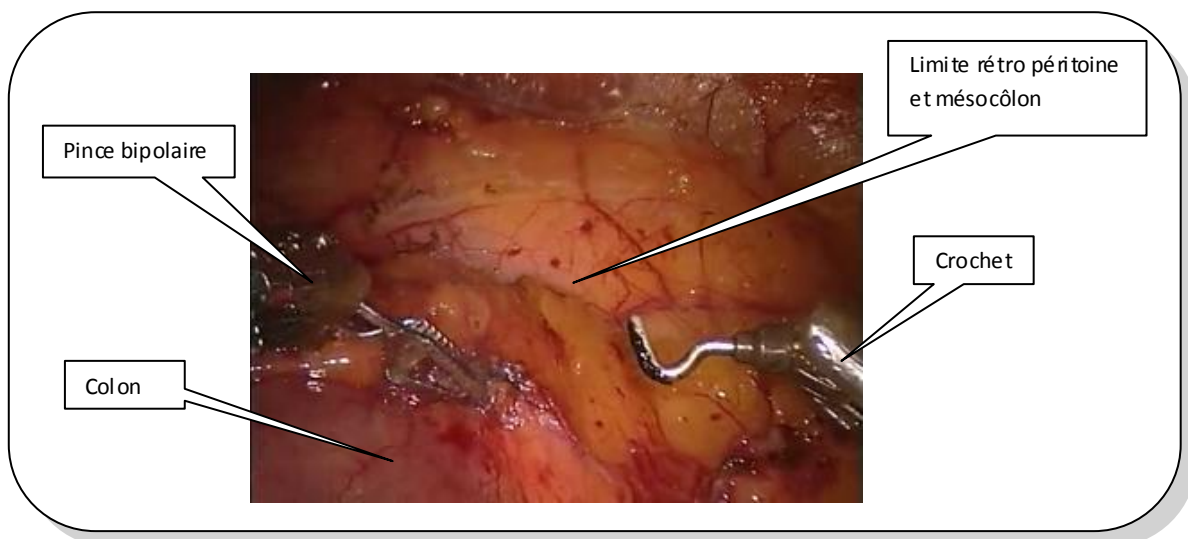


Figure 69 : Dissection du Told

II.8.2.a.ii) Séquence 2 : Exposition du pédicule rénal sur lacs

La deuxième séquence représente un pédicule rénal disséqué et mis sur lacs (Figure 70). Hormis le pédicule rénal mis sur lacs (une veine-lac bleu et deux artères-lacs rouges), on visualise dans le même temps sur cette vidéo deux compresses, un crochet coagulateur et une pince en mouvement. Chaque lac qui passe autour d'un vaisseau est fermé par un Luer Lock (clip résorbable) blanc qui contraste avec le lac. Cette séquence vidéo représente une étape de chirurgie potentiellement dangereuse due à la proximité des vaisseaux rénaux. Le contraste entre les veines et les artères est un élément important visuellement pour un chirurgien. La proximité des vaisseaux et les risques hémorragiques qui lui sont associés justifient du choix de la séquence. Par ailleurs, en termes de contraste et de texture, les éléments de couleurs et la bonne différenciation entre les vaisseaux et le tissu graisseux environnant sont de bons éléments pour tester la compression.

Cette séquence nous permet d'analyser l'impact de la compression sur :

- le mouvement des lacs de couleurs qui ont une composante élastique,
- le mouvement des clips,
- la trame de la compresse,
- le contraste des vaisseaux avec l'espace graisseux.

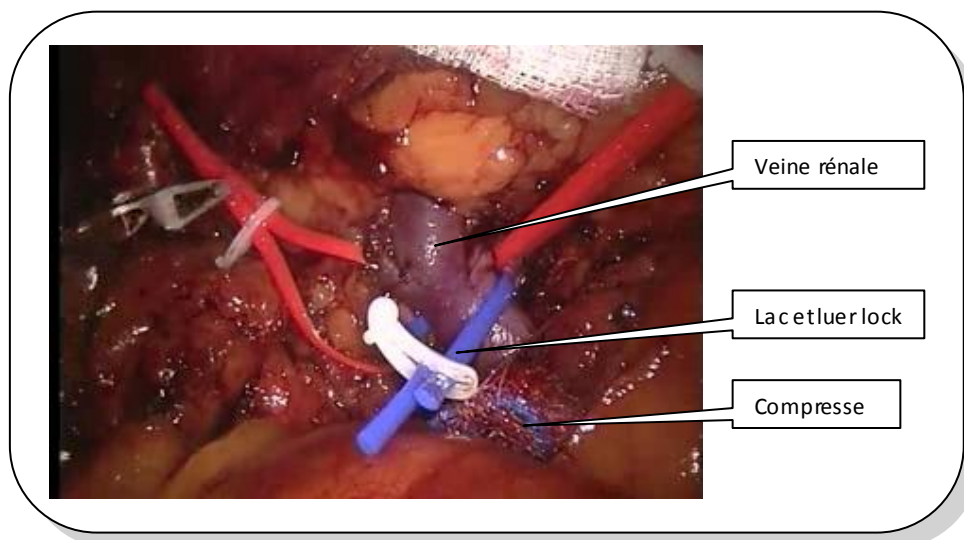


Figure 70 : Exposition du pédicule rénal

II.8.2.a.iii) Séquence 3 : Tumorectomie d'une lésion rénale

Cette séquence représente l'exérèse d'une tumeur rénale (Figure 71). Outre la tumeur qui présente un aspect assez homogène, on visualise une pince à préhension et un ciseau. Ce dernier présente la particularité d'avoir un logo Intuitive Surgical® écrit en noir sur fond blanc sur l'extrémité de l'instrument. Le reste de l'environnement présente un contraste modéré essentiellement dans les tons rouges en raison d'une suffusion hémorragique. Lors d'un geste chirurgical mini-invasif, la présence de sang dans le champ opératoire obscurci la vision. Cela diminue la luminosité de la scène comme si le sang captait la source lumineuse.

De plus, l'espace, ici, n'est pas graisseux puisque l'on visualise essentiellement le parenchyme rénal qui se localise plutôt dans les tons brun – rouge.

Par ailleurs, le chirurgien sectionne et libère la tumeur. Ceci induit des mouvements répétés et rapides de l'extrémité des ciseaux complètement distincts du mouvement plus ample fait lors de la dissection d'un espace graisseux comme pour la séquence 1.

Cette séquence nous permet d'analyser l'impact de la compression sur :

- les mouvements rapides et plutôt saccadés du ciseau
- les inscriptions parfaitement visibles sur le ciseau
- la luminosité du champ opératoire

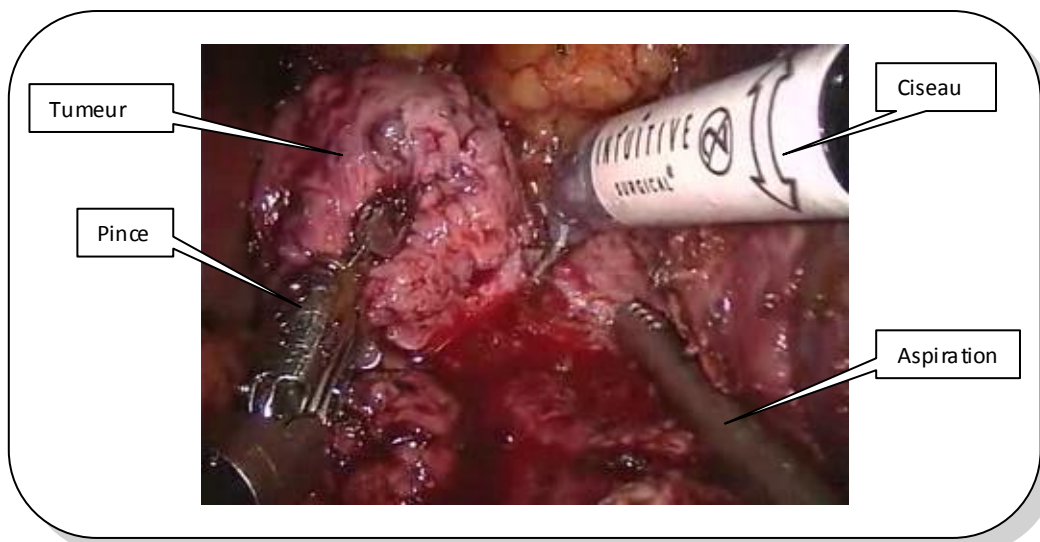


Figure 71 : Tumorectomie d'une lésion rénale

II.8.2.a.iv) Séquence 4 : Passage d'une aiguillée de Monocryl

Cette séquence fait intervenir le passage d'une aiguillée de Monocryl 2/0 au travers du parenchyme rénal afin de procéder à la fermeture d'un calice après néphrectomie partielle (Figure 72). Trois instruments sont visibles : Un porte-aiguille qui tient le fil et permet la réalisation de la suture, une pince à préhension et une canule d'aspiration qui permet d'aspirer les sécrétions hémorragiques. On visualise également un fil de Monocryl qui présente la particularité d'être de couleur violette et assez fin car il s'agit d'un 2/0. On visualise également l'aiguille et le mouvement de l'aiguille ainsi que son extrémité après passage au travers du parenchyme rénal. En haut du champ, on retrouve la trame d'une compresse imbibée de sang.

La réalisation d'une suture est un geste qui est associé à une certaine technicité même si le robot grâce à ces instruments articulés facilite la gestuelle. Par ailleurs, récupérer l'extrémité de l'aiguille et la saisir avec une pince peut être relativement mal aisé surtout si l'on ne la visualise pas correctement.

Cette séquence nous permet d'analyser l'impact de la compression sur :

- le mouvement du fil
- la visualisation de l'aiguille et de son extrémité après passage au travers du parenchyme
- le mouvement des instruments même si cette séquence est plus statique que les précédentes

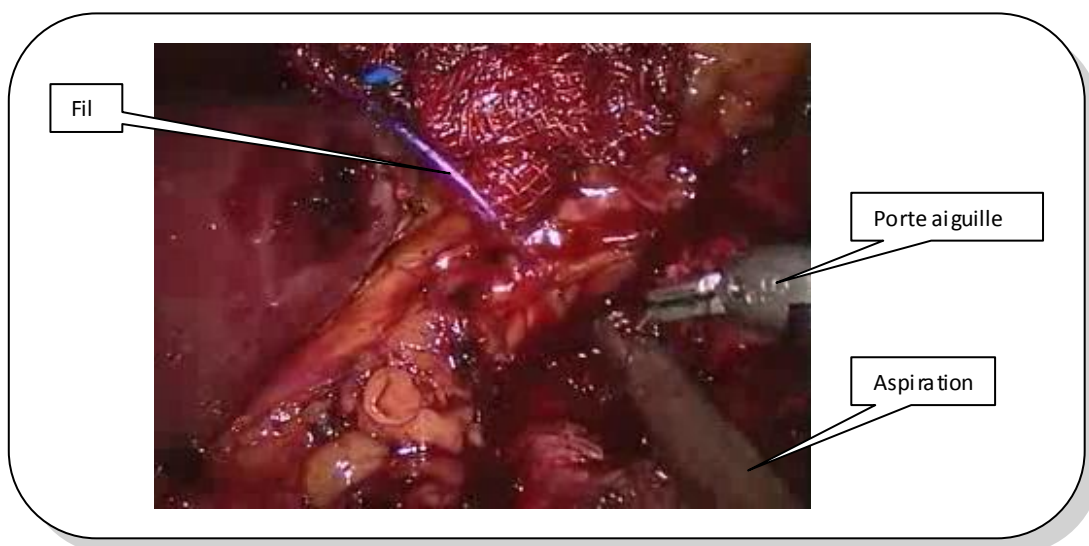


Figure 72 : Passage d'une aiguillée de Monocryl

II.8.3.b) Technique de compression

Les 4 séquences vidéo natives utilisées étaient extraites de films de gestes chirurgicaux réalisés en chirurgie robotique avec le da Vinci[®]. Elles ont été soumises à une compression faisant intervenir les deux algorithmes H2.6.4. et MPEG 2. Les débits étaient compris entre 0,35 et 3 Mbits/s. Pour rappel, plus le débit est faible et plus le niveau de compression est élevé. Le débit à 0,35 Mbits/s représente une très forte compression puisque l'on transforme un débit initial de 270 Mbits/s à ce débit de 0,35 Mbits/s soit un taux de compression de 770:1. Le débit à 3 Mbits/s représente une compression moins importante car on transforme une vidéo de 270 Mbits/s en une vidéo de 3 Mbits/s soit un taux de compression de 90:1.

III.8.3. Résultat préliminaire pour l'exercice Dissection du Told

L'étude étant encore en cours, les résultats ici présentés concernent la séquence Dissection du Told (Figure 73) pour la compression H.264.

Les 16 chirurgiens ont réalisé l'intégralité du test d'évaluation de la qualité des vidéos. Deux d'entre eux présentaient un comportement d'évaluation non fiable avec des notes incohérentes sur des répétitions de séquences. Ils ont été exclus de l'étude. Les résultats représentent les notes données par les chirurgiens en fonction des débits de compression et des séquences étudiées.

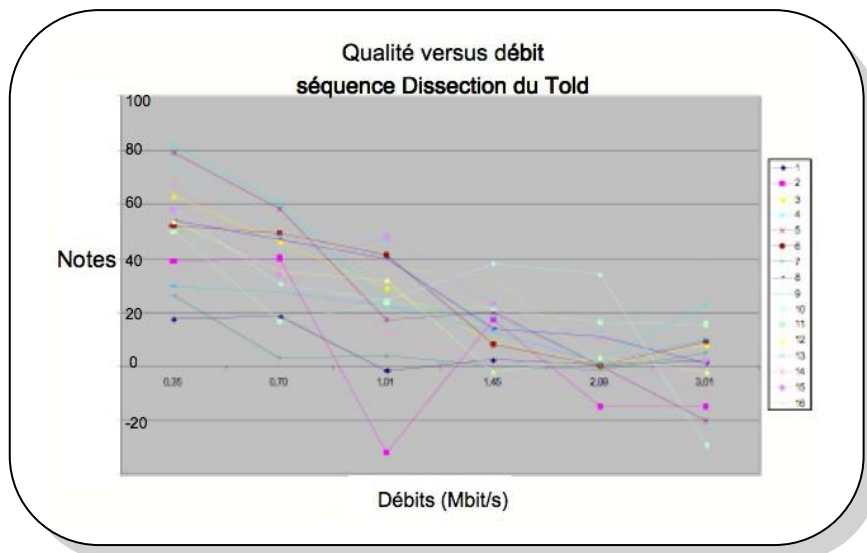


Figure 73 : Résultat global de l'évaluation qualité versus débit pour la séquence dissection du Told

À partir des résultats globaux obtenus grâce à l'évaluation qualitative des séquences dissection du Told pour chaque chirurgien et pour chaque débit de compression, et après exclusion des sujets incohérents, on réalise une moyenne de ces notes rapportées au débit présenté en Figure 74.

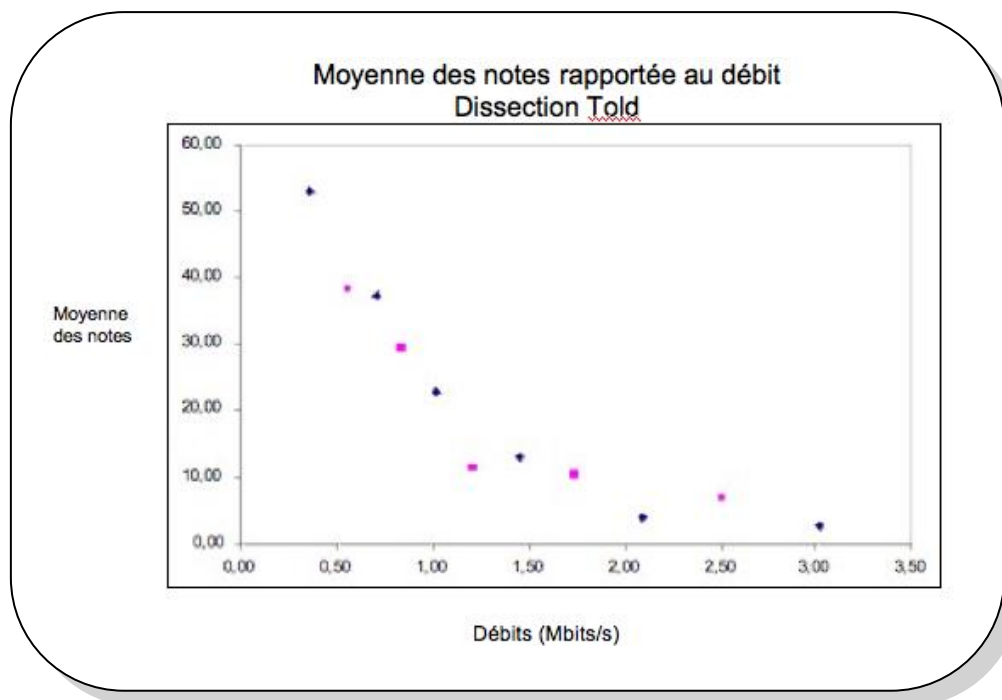


Figure 74 : Moyenne des notes rapportées au débit pour la séquence dissection du Told

III.8.4. Exploitation par rapport aux résultats préliminaires

Les résultats préliminaires ont permis de démontrer qu'il est possible d'envisager l'intégration d'une compression d'image avec perte dans la vision chirurgicale. On obtient un taux de compression avec un débit maximal tolérable de 2 Mbits/s pour H.264, soit une compression à un taux de 1:135, alors qu'il était authentifié à 3 Mbits/s pour MPEG 2 dans l'étude menée par Christophe Burlot.

Les résultats obtenus montrent que, comme cela était déjà démontré dans la littérature scientifique, l'algorithme de compression H.264 donne, pour un même débit, un meilleur rendu qualité que l'algorithme MPEG 2 (85) (86). Cela est donc, également vrai, lorsque les vidéos sont soumises à l'appréciation d'une population de chirurgiens.

Nous reprenons ici la simulation d'une intervention en téléchirurgie à longue distance au CHU de Nancy, entre l'hôpital Central (hôpitaux urbains) et l'hôpital de Brabois, que nous avons évoqué en introduction de cette troisième partie. Nous obtiendrions donc ici un flux vidéo compressé en H.264 à 2 fois 2 Mbits/s (car 2 flux vidéo transmis au débit de 2Mbits/s), auquel seraient ajoutés le flux de la transmission des commandes du robot et la transmission vocale (faible volume). Rappelons nous avons en engagement en termes de qualité de service (QoS) à 20 Mbits/s. Il reste encore un impératif, pour garantir le maximum de sécurité à l'intervention : s'assurer de la bonne synchronisation des deux

flux vidéo et des transmissions commandes et vocales. On s'approcherait donc d'un geste envisageable.

Dans la littérature, des interventions chirurgicales sur modèle animal ont été réalisées et ont permis de démontrer la faisabilité d'une intervention avec un débit de 2 fois 17 Mbits/s (34 Mbits/s, soit un taux de compression de 1:16 (87). Cependant, ce taux de compression a nécessité l'utilisation d'un réseau privé (VPN : *virtual private network - high speed dedicated network*) et n'était pas compatible avec une transmission par Internet. Malgré l'utilisation d'un réseau privé, le temps de latence total moyen pour chaque procédure était de 347+/- 46 ms. D'où l'intérêt de développer des moyens de compression des images qui faciliteraient et accélèreraient le transfert des informations.

Nous reprenons ici la simulation d'une intervention en téléchirurgie à longue distance au CHU de Nancy, entre l'Hôpital Central et l'Hôpital de Brabois, que nous avons évoqué en introduction. Le volume à transmettre serait un flux vidéo compressé en H.264 à 2 fois 2 Mbits/s (car 2 flux vidéo transmis au débit de 2Mbits/s), auquel serait ajouté le flux de la transmission des commandes de la caméra et des bras du robot (environ 500 Kbits/s) et la transmission vocale (équivalente à une transmission vocale). Rappelons que nous avons un engagement de qualité de service (QoS) à 20 Mbits/s. En termes de débits, nous gardons donc ici une marge de sécurité qui semble satisfaisante. Il reste encore un impératif, pour garantir le maximum de sécurité à l'intervention : s'assurer de la bonne synchronisation des deux flux vidéo et des transmissions commandes et vocales. On s'approcherait donc d'un geste envisageable.

Cependant, entre cette expérience et l'introduction réelle d'une compression d'image au cours d'un geste chirurgical, il existe encore un large pas à franchir. Tout chirurgien a déjà expérimenté un geste chirurgical mini-invasif avec une transmission vidéo de mauvaise qualité. Ceci peut être dû, pour un geste par coelioscopique, à un défaut d'optique, à un problème sur le câble de lumière froide, ou à un de problème de moniteur. Cette vision de mauvaise qualité est tolérable pour un geste courant, facile et sans risque hémorragique majeur. Elle devient bien plus intolérable pour une intervention jugée difficile et nécessitant un travail de dissection ou de suture complexe, ce qui est très souvent le cas pour les interventions en chirurgie robotique. Dans un geste chirurgical, le niveau de compression maximal tolérable doit être déterminé par les temps les plus sensibles à la compression, en terme de difficulté opératoire et en terme de difficulté de compression. Ce sont notamment les temps avec une dissection (pédicule vasculaire) ou une suture (suture digestive) minutieuse, où il existe un impératif de netteté afin de faciliter le geste technique. A ce niveau pourrait intervenir la notion de région d'intérêt. En effet, une manière intelligente de compresser serait de déterminer avec précision la région d'intérêt pour le chirurgien dans chaque scène, de compresser fortement la périphérie de cette scène et de compresser sans perte cette région d'intérêt.

D'autres études seront donc nécessaires pour vérifier la validité de cette évaluation de

l'impact de la compression sur le chirurgien et pour essayer de l'affiner au mieux. Dans un premier temps, il faut envisager d'introduire la compression au cours d'un acte chirurgical. Il semble préférable, pour des problèmes d'accès et de disponibilité, de réaliser les premiers tests sur des exercices coelioscopiques de type « Dry-Lab ». Il convient d'étudier l'impact des différents taux de compression sur les performances des chirurgiens. Ceci serait bien sûr associé à une évaluation subjective de la qualité des vidéos. Ensuite, on pourrait envisager une étude de l'impact de la compression sur un geste avec un modèle animal. Ceci ne représente pas complètement l'impact psychologique du confort visuel que l'on peut exiger pour un geste chirurgical sur un patient mais s'en approche, du fait du réalisme de l'intervention. Il y a en effet une distinction assez importante entre « j'estime pouvoir faire un geste à ce taux de compression » et « j'opère mon patient avec ce taux de compression ». Un travail sur les régions d'intérêts et l'application d'une compression intelligente pourrait être réalisé en dernière instance.

4^{ÈME} PARTIE :

CONCLUSION

ET

PERSPECTIVES

I. Pour l'enseignement de la chirurgie robotique

Notre premier axe de travail concernait l'enseignement et l'apprentissage de la chirurgie robotique.

Nous avons démontré l'intérêt du simulateur dV-Trainer® et de la micro-chirurgie dans l'apprentissage de la chirurgie robotique qui sont donc susceptibles d'être inclus dans un enseignement multi modal de chirurgie robotique.

À Nancy, cet enseignement existe sous la forme d'un DIU de chirurgie robotique. Nous proposons une formation basée sur les simulateurs de chirurgie robotique, la micro-chirurgie, le Dry-lab et le Wet-lab au robot. Ce programme standardisé et reproductible est parfaitement exportable.

I.1. Intérêt d'un enseignement multimodal de chirurgie robotique

Il semble évident qu'il est préférable de se former à une nouvelle technique avant de la pratiquer que de ne pas se former. Cependant, cela n'est en aucun cas démontré en chirurgie robotique même si nous en sommes convaincus à Nancy. L'étape suivante nécessite la standardisation de la formation en chirurgie robotique avec des programmes d'entraînement accessible à tous les futurs acteurs de cette chirurgie. Cette standardisation passerait par le développement de bases fondamentales pré-requises à la pratique de la chirurgie robotique, pouvant constituer les Fondamentaux en Chirurgie Robotique (FCR), basé sur le concept des FLS.

Nous avons rédigé un projet visant à démontrer les bénéfices d'un **Programme Multimodal de Formation et d'Évaluation en Chirurgie Robotique (ProMuFECDR)** sur la vitesse de l'apprentissage. Ce projet a été soumis dans le cadre d'un appel à projet de type PREPS (appel à projet visant à promouvoir la recherche sur la performance du système de soins) soumis au Ministère de la Santé.

Si cette formation prouve son intérêt, elle pourra aboutir à terme à une certification des compétences. Cette évaluation ne peut passer que par une comparaison des performances chirurgicales entre un chirurgien ayant suivi cette formation et un chirurgien de même niveau et de même expérience n'ayant bénéficié que de la formation minimale telle qu'elle est actuellement proposée. Elle nécessite un essai comparatif non randomisé en *cluster* des performances chirurgicales des deux groupes de chirurgiens. En effet, il est clairement démontré qu'il existe une courbe d'apprentissage en chirurgie robotique pour les procédures complexes (29). Ceci implique que les 10 ou 20 premiers patients (chiffres variant en fonction des interventions) d'un chirurgien qui débute en chirurgie robotique ne bénéficient pas de la même expertise et des mêmes chances que s'ils étaient

les 30^{ème} ou 40^{ème} patients de ce chirurgien. Nous voulons démontrer que l'acquisition des compétences par cette formation procure une expérience équivalente à la réalisation des premières procédures. Ainsi, nous éviterions aux premiers patients d'un chirurgien les aléas de la formation dudit chirurgien en termes de rapidité d'exécution, de dextérité, de perte de vue des instruments, d'absence de collision des instruments et de traumatisme des tissus.

I.2. Nouvelles évaluations du dV-Trainer®

À l'issue des conclusions obtenues en faveur de l'apprentissage avec le dV-Trainer®, nous voulons tester sa version la plus évoluée, qui propose à l'heure actuelle 35 exercices. D'importants efforts ont été réalisés par la firme *MIMIC Technologies*® pour augmenter le réalisme des exercices. On a notamment plusieurs exercices se rapportant à la réalisation de sutures.

Une étude est à l'heure actuelle en cours pour déterminer les exercices les plus pertinents parmi les 35 proposés pour l'entraînement sur le dV-Trainer®. Il constituera probablement une des bases de la thèse des universités de Cyril Perrenot. Ce travail préliminaire d'évaluation des exercices se déroulera en collaboration avec les équipes de confrères américains les Pr J. BULLER (Uniformed Services University, Washington), P. GIULIANOTTI (University of Illinois at Chicago) et M. STIFELMAN (New York University), chirurgiens largement impliqués en chirurgie robotique dans le monde.

Ces exercices les plus pertinents pourront secondairement être intégrés dans une formation et permettront d'évaluer de façon optimale les habiletés et compétences acquises par le chirurgien.

II. Recherche sur l'impact du délai en téléchirurgie

Dans cette thèse, nous avons étudié l'impact du délai sur un geste de coelioscopie. Nous avons démontré que le dV-Trainer® représente un outil fiable d'enseignement, et que les performances que l'on obtient sont corrélées à celles développées sur le da Vinci®.

Nous envisageons donc une étude sur le dV-Trainer® visant à évaluer l'impact du délai. Notre partenariat avec la firme *MIMIC Technologies*® nous a permis d'obtenir de leurs ingénieurs qu'ils mettent au point un programme se conduisant comme un *buffer* et permettant d'inclure un retard variable entre la réalisation du geste au niveau des *joysticks* et la réception de l'information à l'écran.

La méthodologie de l'étude inclut plusieurs paramètres :

- Le premier paramètre concerne le choix de l'exercice pour réaliser les tests. Nous le voulons le plus réaliste et le plus proche possible d'un geste chirurgical robotique. Les résultats

préliminaires de l'évaluation des nouveaux exercices du dV-Trainer® nous serons très probablement d'une aide précieuse.

- Le deuxième paramètre concerne les bornes basse et haute du délai à tester. En effet dans la littérature, le délai maximal tolérable est très variable en fonction des publications, et il n'est testé que sur 4 à 6 procédures en Wet lab. Les délais extrêmes testés vont de 300ms à 900 ms (87) (88).
- Le troisième paramètre concerne l'organisation expérimentale des tests
 - Propose-t-on un ordre séquentiel ou aléatoire pour la soumission des délais ?
- Le quatrième paramètre concerne l'évaluation de l'impact du délai sur les performances
 - Il se fera pour une part de manière objective grâce au score obtenu sur le simulateur mais également de manière subjective par le ressenti du chirurgien

Ce projet intègre la thèse des universités d'un interne d'origine chinoise Song XU, inscrit en première année.

ANNEXES

L'article "Paradigms and experimental set-up for the determination of the acceptable delay in Telesurgery" est paru dans Proceedings of the 29th Annual International en 2007 ;

L'article "The virtual reality simulator dV-Trainer is a valid assessment tool for robotic surgical skills" est paru dans Surgical Endoscopy en 2012 ;

L'article "Prior experience in micro-surgery may improve the surgeons performance in robotic surgical training" est soumis à Annales of Surgery.

Bibliographie

1. Litynski GS. Profiles in laparoscopy: Mouret, Dubois, and Perissat: the laparoscopic breakthrough in Europe (1987-1988). *JSLs*. 1999 juin;3(2):163-7.
2. Heinzelmann M, Simmen HP, Cummins AS, Largiadèr F. Is laparoscopic appendectomy the new « gold standard »? *Arch Surg*. 1995 juill;130(7):782-5.
3. Périssat J, Collet D, Belliard R, Desplantez J, Magne E. Laparoscopic cholecystectomy: the state of the art. A report on 700 consecutive cases. *World J Surg*. 1992 déc;16(6):1074-82.
4. Hubert J. [Robotic surgery in urology]. *Prog. Urol*. 2009 avr;19(4):244-7.
5. Hubert J, Renoult E, Mourey E, Frimat L, Cormier L, Kessler M. Complete robotic-assistance during laparoscopic living donor nephrectomies: an evaluation of 38 procedures at a single site. *Int. J. Urol*. 2007 nov;14(11):986-9.
6. Brunaud L, Ayav A, Zarnegar R, Rouers A, Klein M, Boissel P, et al. Prospective evaluation of 100 robotic-assisted unilateral adrenalectomies. *Surgery*. 2008 déc;144(6):995-1001; discussion 1001.
7. Giep BN, Giep HN, Hubert HB. Comparison of minimally invasive surgical approaches for hysterectomy at a community hospital: robotic-assisted laparoscopic hysterectomy, laparoscopic-assisted vaginal hysterectomy and laparoscopic supracervical hysterectomy. *J Robot Surg*. 2010 sept;4(3):167-75.
8. Hans S, Badoual C, Gorphe P, Brasnu D. Transoral robotic surgery for head and neck carcinomas. *Eur Arch Otorhinolaryngol* [Internet]. 2011 déc 6 [cité 2012 janv 17]; Available de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22143583>
9. Richmon JD, Agrawal N, Pattani KM. Implementation of a TORS program in an academic medical center. *Laryngoscope*. 2011 nov;121(11):2344-8.
10. Cheng W, Fontana GP, De Robertis MA, Mirocha J, Czer LSC, Kass RM, et al. Is robotic mitral valve repair a reproducible approach? *J. Thorac. Cardiovasc. Surg*. 2010 mars;139(3):628-33.
11. Kesavadas T, Stegemann A, Sathyaseelan G, Chowriappa A, Srimathveeravalli G, Seixas-Mikelus S, et al. Validation of Robotic Surgery Simulator (RoSS). *Stud Health Technol Inform*. 2011;163:274-6.
12. Sethi AS, Peine WJ, Mohammadi Y, Sundaram CP. Validation of a novel virtual reality robotic simulator. *J. Endourol*. 2009 mars;23(3):503-8.
13. Kenney PA, Wszolek MF, Gould JJ, Libertino JA, Moinzadeh A. Face, content, and construct validity of dV-Ttrainer, a novel virtual reality simulator for robotic surgery. *Urology*. 2009 juin;73(6):1288-92.
14. Dulucq J-L, Wintringer P, Perissat J, Mahajna A. Completely laparoscopic total and partial gastrectomy for benign and malignant diseases: a single institute's prospective analysis. *J. Am. Coll. Surg*. 2005 févr;200(2):191-7.
15. Soper NJ, Stockmann PT, Dunnegan DL, Ashley SW. Laparoscopic cholecystectomy. The new « gold standard »? *Arch Surg*. 1992 août;127(8):917-921; discussion 921-923.

16. Eyuboglu E, Ipek T. Laparoscopic floppy Nissen fundoplication: 16 years of experience from the historical clinic of Rudolph Nissen. *Hepatogastroenterology*. 2011 oct;58(110-111):1607–10.
17. Mucio M, Rojano M, Herrera JJ, Valdovinos MA, Córdova JÁ, Bravo C, et al. Novel surgical concept in antireflux surgery: long-term outcomes comparing 3 different laparoscopic approaches. *Surgery*. 2012 janv;151(1):84–93.
18. McKay GD, Morgan MJ, Wong S-KC, Gatenby AH, Fulham SB, Ahmed KW, et al. Improved short-term outcomes of laparoscopic versus open resection for colon and rectal cancer in an area health service: a multicenter study. *Dis. Colon Rectum*. 2012 janv;55(1):42–50.
19. Shea JA, Healey MJ, Berlin JA, Clarke JR, Malet PF, Staroscik RN, et al. Mortality and complications associated with laparoscopic cholecystectomy. A meta-analysis. *Ann. Surg.* 1996 nov;224(5):609–20.
20. Bowersox JC, Shah A, Jensen J, Hill J, Cordts PR, Green PS. Vascular applications of telepresence surgery: initial feasibility studies in swine. *J. Vasc. Surg.* 1996 févr;23(2):281–7.
21. Satava RM. Virtual reality and telepresence for military medicine. *Ann. Acad. Med. Singap.* 1997 janv;26(1):118–20.
22. Nathan C-AO, Chakradeo V, Malhotra K, D'Agostino H, Patwardhan R. The voice-controlled robotic assist scope holder AESOP for the endoscopic approach to the sella. *Skull Base*. 2006 août;16(3):123–31.
23. Jacobs LK, Shayani V, Sackier JM. Determination of the learning curve of the AESOP robot. *Surg Endosc*. 1997 janv;11(1):54–5.
24. Recommandation du CEDIT - Ref 00.01 [Internet]. [cité 2012 févr 21]. Available de: <http://ancien-credit.aphp.fr/servlet/siteCedit?Destination=reco&numArticle=00.01>
25. Gilbert JM. The EndoAssist robotic camera holder as an aid to the introduction of laparoscopic colorectal surgery. *Ann R Coll Surg Engl*. 2009 juill;91(5):389–93.
26. Wagner AA, Varkarakis IM, Link RE, Sullivan W, Su L-M. Comparison of surgical performance during laparoscopic radical prostatectomy of two robotic camera holders, EndoAssist and AESOP: a pilot study. *Urology*. 2006 juill;68(1):70–4.
27. Green PS, Hill JW, Jensen JF, Shah A. Telepresence surgery. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*. 1995 juin;14(3):324–9.
28. Bowersox JC. Telepresence surgery. *Br J Surg*. 1996 avr;83(4):433–4.
29. Guru KA, Kuvshinoff BW, Pavlov-Shapiro S, Bienko MB, Aftab MN, Brady WE, et al. Impact of robotics and laparoscopy on surgical skills: A comparative study. *J. Am. Coll. Surg.* 2007 janv;204(1):96–101.
30. Hasselgren P-O. Surgery in Sweden at the time of Halsted. *Arch Surg*. 2004 janv;139(1):100–12.
31. Cameron JL. William Stewart Halsted. Our surgical heritage. *Ann. Surg.* 1997 mai;225(5):445–58.
32. Fried GM. FLS assessment of competency using simulated laparoscopic tasks. *J. Gastrointest. Surg.* 2008 févr;12(2):210–2.
33. Xeroulis G, Dubrowski A, Leslie K. Simulation in laparoscopic surgery: a concurrent validity study for FLS. *Surg Endosc*. 2009 janv;23(1):161–5.

34. Sroka G, Feldman LS, Vassiliou MC, Kaneva PA, Fayez R, Fried GM. Fundamentals of laparoscopic surgery simulator training to proficiency improves laparoscopic performance in the operating room-a randomized controlled trial. *Am. J. Surg.* 2010 janv;199(1):115–20.
35. Fundamentals of Laparoscopic Surgery | ...the definitive laparoscopic skills enhancement and assessment module. | Fundamentals of Laparoscopic Surgery [Internet]. [cité 2010 nov 30]. Available de: <http://www.flsprogram.org/>
36. Munz Y, Almoudaris AM, Moorthy K, Dosis A, Liddle AD, Darzi AW. Curriculum-based solo virtual reality training for laparoscopic intracorporeal knot tying: objective assessment of the transfer of skill from virtual reality to reality. *Am. J. Surg.* 2007 juin;193(6):774–83.
37. Intuitive Surgical - Training [Internet]. [cité 2012 févr 21]. Available de: <http://www.intuitivesurgical.com/training/>
38. Ecole de Chirurgie de Nancy – Lorraine » DIU Chirurgie Robotique [Internet]. [cité 2012 févr 22]. Available de: http://www.ecoledechirurgie-nancy.fr/?page_id=22
39. Weinstein GS, O'malley BW Jr, Hockstein NG. Transoral robotic surgery: supraglottic laryngectomy in a canine model. *Laryngoscope.* 2005 juill;115(7):1315–9.
40. Liu H, Lu D, Wang L, Shi G, Song H, Clarke J. Robotic surgery for benign gynaecological disease. *Cochrane Database Syst Rev.* 2012;2:CD008978.
41. Capmas P, Bats A-S, Bensaid C, Bady J, Lécuru F. [Robotic surgery in endometrial cancer: A review.]. *Journal De Gynecologie, Obstetrique Et Biologie De La Reproduction* [Internet]. 2012 avr 3 [cité 2012 avr 27]; Available de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22480595>
42. Hoekstra AV, Jairam-Thodla A, Rademaker A, Singh DK, Buttin BM, Lurain JR, et al. The impact of robotics on practice management of endometrial cancer: transitioning from traditional surgery. *Int J Med Robot.* 2009 déc;5(4):392–7.
43. Camarillo DB, Krummel TM, Salisbury JK Jr. Robotic technology in surgery: past, present, and future. *Am. J. Surg.* 2004 oct;188(4A Suppl):2S–15S.
44. LEPLAT J. Activités collectives et nouvelles technologies. *Revue internationale de psychologie sociale.* 1991;(4):335–56.
45. Tan SY, Uyehara P. William Stewart Halsted (1852-1922): father of American surgery. *Singapore Med J.* 2010 juill;51(7):530–1.
46. Simulated Surgical Systems [Internet]. [cité 2012 févr 22]. Available de: <http://www.simulatedsurgicals.com/>
47. Mimic Technologies - Custom Haptic Devices, Skills Training for Robotic Surgery, real-time FE (Finite Element) modeling [Internet]. [cité 2012 févr 22]. Available de: <http://www.mimic.ws/>
48. Perrenot C, Perez M, Tran N, Jehl J-P, Felblinger J, Bresler L, et al. The virtual reality simulator dV-Trainer(®) is a valid assessment tool for robotic surgical skills. *Surgical Endoscopy* [Internet]. 2012 avr 5 [cité 2012 juin 14]; Available de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22476836>
49. Van Nortwick SS, Lendvay TS, Jensen AR, Wright AS, Horvath KD, Kim S. Methodologies for establishing validity in surgical simulation studies. *Surgery.* 2010 mai;147(5):622–30.

50. Grand dictionnaire terminologique [Internet]. [cité 2012 févr 23]. Available de: http://www.granddictionnaire.com/BTML/FRA/r_Motclef/index1024_1.asp
51. van Hove PD, Tuijthof GJM, Verdaasdonk EGG, Stassen LPS, Dankelman J. Objective assessment of technical surgical skills. *Br J Surg*. 2010 juill;97(7):972–87.
52. Martin JA, Regehr G, Reznick R, MacRae H, Murnaghan J, Hutchison C, et al. Objective structured assessment of technical skill (OSATS) for surgical residents. *Br J Surg*. 1997 févr;84(2):273–8.
53. Goff BA, Lentz GM, Lee D, Houmard B, Mandel LS. Development of an objective structured assessment of technical skills for obstetric and gynecology residents. *Obstet Gynecol*. 2000 juill;96(1):146–50.
54. Hogle NJ, Briggs WM, Fowler DL. Documenting a learning curve and test-retest reliability of two tasks on a virtual reality training simulator in laparoscopic surgery. *J Surg Educ*. 2007 déc;64(6):424–30.
55. Gallagher AG, Ritter EM, Satava RM. Fundamental principles of validation, and reliability: rigorous science for the assessment of surgical education and training. *Surg Endosc*. 2003 oct;17(10):1525–9.
56. Vassiliou MC, Ghitulescu GA, Feldman LS, Stanbridge D, Leffondré K, Sigman HH, et al. The MISTELS program to measure technical skill in laparoscopic surgery : evidence for reliability. *Surg Endosc*. 2006 mai;20(5):744–7.
57. Chipman JG, Schmitz CC. Using objective structured assessment of technical skills to evaluate a basic skills simulation curriculum for first-year surgical residents. *J. Am. Coll. Surg*. 2009 sept;209(3):364–370.e2.
58. Lendvay TS, Casale P, Sweet R, Peters C. VR robotic surgery: randomized blinded study of the dV-Trainer robotic simulator. *Stud Health Technol Inform*. 2008;132:242–4.
59. Lerner MA, Ayalew M, Peine WJ, Sundaram CP. Does training on a virtual reality robotic simulator improve performance on the da Vinci surgical system? *J. Endourol*. 2010 mars;24(3):467–72.
60. Seixas-Mikelus SA, Kesavadas T, Srimathveeravalli G, Chandrasekhar R, Wilding GE, Guru KA. Face validation of a novel robotic surgical simulator. *Urology*. 2010 août;76(2):357–60.
61. Seixas-Mikelus SA, Stegemann AP, Kesavadas T, Srimathveeravalli G, Sathyaseelan G, Chandrasekhar R, et al. Content validation of a novel robotic surgical simulator. *BJU Int*. 2011 avr;107(7):1130–5.
62. Hogle NJ, Chang L, Strong VEM, Welcome AOU, Sinaan M, Bailey R, et al. Validation of laparoscopic surgical skills training outside the operating room: a long road. *Surg Endosc*. 2009 juill;23(7):1476–82.
63. Lallas CD, Davis JW. Robotic Surgery Training with Commercially Available Simulation Systems in 2011: A Current Review and Practice Pattern Survey from the Society of Urologic Robotic Surgeons. *J Endourol* [Internet]. 2011 déc 22 [cité 2012 janv 10]; Available de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22192114>
64. Berlinger NT. Robotic surgery--squeezing into tight places. *N. Engl. J. Med*. 2006 mai 18;354(20):2099–101.

65. Rabardel P. Les hommes & les technologies: Approche cognitive des instruments contemporains. Armand Colin; 1995.
66. Tulving E. Multiple memory systems and consciousness. *Hum Neurobiol.* 1987;6(2):67–80.
67. Tulving E. How many memory systems are there? *American Psychologist.* 1985 avr;40(4):385–98.
68. Moorthy K, Munz Y, Dosis A, Hernandez J, Martin S, Bello F, et al. Dexterity enhancement with robotic surgery. *Surg Endosc.* 2004 mai;18(5):790–5.
69. Blavier A, Gaudissart Q, Cadière G-B, Nyssen A-S. Comparison of learning curves and skill transfer between classical and robotic laparoscopy according to the viewing conditions: implications for training. *Am. J. Surg.* 2007 juill;194(1):115–21.
70. Safwat B, Su ELM, Gassert R, Teo CL, Burdet E. The role of posture, magnification, and grip force on microscopic accuracy. *Ann Biomed Eng.* 2009 mai;37(5):997–1006.
71. NAPIER JR. The prehensile movements of the human hand. *J Bone Joint Surg Br.* 1956 nov;38-B(4):902–13.
72. Berguer R. Surgery and ergonomics. *Arch Surg.* 1999 sept;134(9):1011–6.
73. Marescaux J, Leroy J, Gagner M, Rubino F, Mutter D, Vix M, et al. Transatlantic robot-assisted telesurgery. *Nature.* 2001 sept 27;413(6854):379–80.
74. Perez M, Quiaios F, Andrivon P, Husson D, Dufaut M, Felblinger J, et al. Paradigms and experimental set-up for the determination of the acceptable delay in telesurgery. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.* 2007;2007:453–6.
75. -= guill.net -= [Internet]. [cité 2012 juin 13]. Available de: <http://www.guill.net/index.php?cat=3&pro=1&tcip=27>
76. Osterberg G. Topography of the layer of rods and cones in the human retina. *Acta Ophthalmol.* 1935;Suppl. 13(6):101–2.
77. Purves D, Augustine G, Fitzpatrick D. Anatomical Distribution of Rods and Cones - Neuroscience. Neuroscience [Internet]. 2nd edition. [cité 2012 juin 5]. Available de: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK10848/>
78. Carrino JA, Unkel PJ, Miller ID, Bowser CL, Freckleton MW, Johnson TG. Large-scale PACS implementation. *J Digit Imaging.* 1998 août;11(3 Suppl 1):3–7.
79. Lemke HU. Short history of PACS (Part II: Europe). *European Journal of Radiology.* 2011 mai;78(2):177–83.
80. Koff D, Bak P, Brownrigg P, Hosseinzadeh D, Khademi A, Kiss A, et al. Pan-Canadian Evaluation of Irreversible Compression Ratios (« Lossy » Compression) for Development of National Guidelines. *J Digit Imaging.* 2008 oct;22(6):569–78.
81. Erickson BJ, Manduca A, Persons KR, Earnest F 4th, Hartman TE, Harms GF, et al. Evaluation of irreversible compression of digitized posterior-anterior chest radiographs. *J Digit Imaging.* 1997 août;10(3):97–102.
82. Erickson BJ. Irreversible compression of medical images. *J Digit Imaging.* 2002 mars;15(1):5–14.

83. Al Habeeb A, Evans A, Ghazarian D. Virtual microscopy using whole-slide imaging as an enabler for teledermatopathology: A paired consultant validation study. *J Pathol Inform.* 2012;3:2.
84. Justo R, Smith AC, Williams M, Van der Westhuyzen J, Murray J, Sciuto G, et al. Paediatric telecardiology services in Queensland: a review of three years' experience. *J Telemed Telecare.* 2004;10 Suppl 1:57–60.
85. Kamaci N, Altunbasak Y. Performance comparison of the emerging H.264 video coding standard with the existing standards. *Multimedia and Expo, 2003. ICME '03. Proceedings. 2003 International Conference on.* 2003. p. I - 345–8 vol.1.
86. Ostermann J, Bormans J, List P, Marpe D, Narroschke M, Pereira F, et al. Video coding with H.264/AVC: tools, performance, and complexity. *Circuits and Systems Magazine, IEEE.* 2004 quarter;4(1):7 - 28.
87. Ngan CY, Morady R, Wang C, Harrison D, Browning D, Rayman R, et al. Robotic pyeloplasty using internet protocol and satellite network-based telesurgery. *Int J Med Robot.* 2008 mars;4(1):10–4.
88. Sterbis JR, Hanly EJ, Herman BC, Marohn MR, Broderick TJ, Shih SP, et al. Transcontinental telesurgical nephrectomy using the da Vinci robot in a porcine model. *Urology.* 2008 mai;71(5):971–3.

Résumé / Abstract

Chirurgie Robotique : de l'Apprentissage à l'Application

Résumé : Le développement croissant de la chirurgie robotique pose le problème de la formation. Cette nouvelle technologie tend à suppléer dans les procédures complexes la coelioscopie. Elle nécessite une adaptation du chirurgien. Il est, en effet, nécessaire de maîtriser à la fois le télémanipulateur et les procédures chirurgicales, qui ne sont pas de simples transpositions des gestes coelioscopiques.

Initialement, nous avons réalisé un historique du développement de la chirurgie mini-invasive coelioscopique et robotique, ainsi qu'un historique de l'apprentissage de la chirurgie.

Puis, nous nous sommes intéressés à l'apprentissage de la robotique. Les simulateurs de chirurgie coelioscopique sont très couramment employés dans l'apprentissage. En robotiques, ils ont fait récemment leur apparition sur le marché. Nous avons étudié la validité du simulateur dV-Trainer® dans l'apprentissage de la chirurgie robotique. Nous avons démontré l'intérêt de cet outil dans l'acquisition de la gestuelle et des automatismes propres au robot.

Nous avons par ailleurs étudié l'impact d'une formation en micro-chirurgie sur les performances développées en chirurgie robotique car, au cours d'une étude préliminaire nous avons constaté que les micro-chirurgiens présentaient de meilleures aptitudes sur le simulateur de chirurgie robotique que ceux sans expérience en micro-chirurgie.

Dans un troisième temps, nous nous sommes intéressés à la téléchirurgie à longue distance qui est impactée par deux contraintes que sont la latence de transmission et le volume des informations à transmettre. Une première étude a étudié l'impact du délai de transmission sur les performances des chirurgiens. Une deuxième étude a consisté à réaliser une évaluation subjective par des chirurgiens de la qualité de vidéos de chirurgie robotique compressées afin de déterminer un seuil de compression maximal acceptable.

Mots clés : Chirurgie robotique, formation en chirurgie robotique, Simulateur de chirurgie robotique, Téléchirurgie, Délai, Compression vidéo avec perte.

Telesurgery: from training to implementation

Summary: The huge expansion of minimally invasive robotic devices for surgery ask the question of the training of this new technology. Progress of robotic-assisted surgical techniques allows today mini-invasive surgery to be more accurate, providing benefits to surgeons and patients for complex surgical procedures. But, it resulted from an increasing need for training and development of new pedagogical strategies. Indeed, the surgeon has to master the telemanipulator and the procedure, which is different from a simple transposition of a laparoscopic skill.

The first part of this work treats about historical development of minimal invasive surgery from laparoscopy to robotic surgery. We also develop the evolution of training program in surgery.

Virtual simulators provide efficient tools for laparoscopy training. The second part of this work, study some possible solutions for robotic training. We assess the validity of a new robotic virtual simulator (dV-Trainer®). We demonstrate the usefulness of this tool for the acquisition of the basic gesture for robotic surgery.

Then, we evaluate the impact of a previous experience in micro-surgery on robotic training. We propose a prospective study comparing the surgical performance of micro-surgeons to that of general surgeons on a robotic simulator. We want to determine if this experience in micro-surgery could significantly improve the abilities and surgeons performance in the field of basic gesture in robotic surgery.

The last part of the study also looks to the future. Currently, telesurgery need sophisticated dedicated technical resources. We want to develop procedures for clinical routine used. Therefore, we evaluate the impact of the delay on the surgical procedure. Also, reducing data volume allow decreasing latency. An appropriate solution to reduce the amount of data could be found by introducing lossy compression for the transmission using the well-known MPEG-2 and H-264 standards.

Keys words: Robotic surgery, Robotic training, Robotic simulator, Telesurgery, Latency, Lossy video compression