Assistance à l'Apprentissage de la Dextérité en Laparoscopie

Ninon Candalh-Touta

▶ **To cite this version:**

Ninon Candalh-Touta. Assistance à l'Apprentissage de la Dextérité en Laparoscopie. Robotique [cs.RO]. Sorbonne Université, 2018. Français. NNT : 2018SORUS297 . tel-01966556v2

HAL Id: tel-01966556

https://theses.hal.science/tel-01966556v2

Submitted on 2 Mar 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE DE DOCTORAT
DE SORBONNE UNIVERSITE

Spécialité : Robotique

ED 391 : « Sciences Mécaniques, Acoustiques, Electronique et Robotique de Paris »

réalisée à

Institut des Systèmes Intelligents et Robotique

présentée par

Ninon CANDALH-TOUTA

supervisée par : Jérôme SZEWCZYK

co-supervisée par : Philippe POIGNET

Sujet de la thèse :

Assistance à l'Apprentissage de la Dextérité en Laparoscopie

soutenue le 1er Octobre 2018

devant le jury composé de :

Prof.	Tanneguy REDARCE	Rapporteur
Prof.	Pierre JANNIN	Rapporteur
Prof.	Vanda LUENGO	Examinatrice
Prof.	Brice GAYET	Examinateur
Prof.	Philippe POIGNET	Co-directeur de thèse
Prof.	Jérôme SZEWCZYK	Directeur de thèse

à ma mère, mon père, mes sœurs et à l'enfance éternelle...

Remerciements

Ce travail a été soutenu par des fonds publics français gérés par l'ANR dans le cadre du programme d'investissements d'avenir (Labex CAMI) sous la référence ANR-11-LABX-0004.

Je voudrais tout d'abord remercier les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer cette thèse. Un merci un peu particulier à Pierre Jannin pour avoir eu un regard bienveillant sur mon travail tout au long de cette thèse et Brice Gayet pour m'avoir invitée au bloc opératoire. J'ai été très fière que mon jury soit présidé par une femme, merci donc à Wanda Luengo d'avoir accepté cette invitation.

Merci à Jérôme Szewczyk et Philippe Poignet pour m'avoir si bien dirigée durant cette thèse. Je ressors grandie de ces trois années et demi à travailler à leurs côtés. Leurs compétences et leurs personnalités se sont parfaitement complétées et tout cela n'a fait que m'enrichir tous les jours.

Je voudrais remercier Colette Chambaz, Isabelle Pasquier et Djamel Taleb de l'école de médecine des fers à Moulin pour m'avoir permis d'assister à des cours de coelioscopie et pour avoir pris le temps de répondre à mes questions. Merci à Thierry Bensignor pour son aide et notamment pour m'avoir exposé de manière claire les problématiques actuelles de la laparoscopie, David Fucks pour m'avoir accueillie au bloc opératoire et Nabil Zemeti pour sa bienveillance à mon égard et pour son accueil chaleureux à Montpellier.

Merci à l'équipe administrative de l'ISIR : Michèle Vié, Sylvie Piumi, Awatef Barra, Adela Kabaklija, Anne-Claire Cheminant et Yves Germain, pour leur aide si précieuse. C'est une belle équipe qui est toujours là pour nous et qui nous aide au quotidien afin de rendre notre vie de doctorant plus facile.

Merci à la brillante équipe technique sans qui tous les magnifiques projets du laboratoire n'existeraient pas. Merci à Ludovic Billard pour son professionnalisme, à la gentillesse et l'efficacité de Laurent Fabre, à la disponibilité de Philippe Gautier et à Sébastien Dignoire pour ses magnifiques pièces 3D. Merci à Jimmy Da Silva pour sa patience, son efficacité et son amitié. Bien sûr un grand merci à David Reversat pour m'avoir épaulée tout au long de ce projet, notamment en canalisant mes énergies négatives. Et merci à Florian Richer pour m'avoir fait grandir et changer mon regard sur mes relations avec les gens.

Merci à Véronique Perdereau, Viviane Pasqui et Giovani Legnani pour m'avoir

recruté dans le master *Mechatronic System for Rehabilitation* qui m'a permis de découvrir ce nouveau monde si passionnant.

Merci aux membres du *Leon Root Motion Analysis Laboratory* : Howard Hillstrom, Andrew Kraszewski, Andreas Kontaxis, Iba Thaqi-Xama, Maury Mir, Stacey Kung, William Vista, Stephen Bartalini, Sherry Backus, Aviva Wolff, Mandy Gibbons et Julien Berhouet, pour m'avoir pris sous leurs ailes il y a 5 ans maintenant.

Merci à Luka Matik pour avoir été un stagiaire exemplaire, sans qui ma dernière partie de thèse n'aurait pas existé.

Je voudrais maintenant m'adresser à l'équipe AGATHE qui m'a fait me sentir comme dans une famille : Nathanaël Jarrassé pour avoir été mon confident, Wael Bachta pour m'avoir épaulée lorsque la motivation me manquait, Ludovic Saint-Bauzel pour le soutien au cours de cette dernière année, Agnès Roby-Brami pour m'avoir fait part de son expertise, Lucas Roche pour avoir été ce parfait *Work Boyfriend* dont je n'aurais jamais osé rêver, Fabien Vérité pour ses mauvais conseils que j'ai toujours suivis, ma belle Manelle Merad pour sa précieuse amitié, Simon Bouvel et Ragou Ady pour me laisser faire partie des grands moments de leurs vies, Lucas Joseph pour ses compétences en Latex et pour avoir été un repère depuis le M2, Etienne Masson-Bachasson de Montalivet pour m'avoir fait redécouvrir Angela de Saian Supa Crew et bien sûr Thomas Howard pour m'avoir prise sous son aile en début de thèse et dans la vie de manière générale. J'ajoute un merci à tous ceux qui ont pu occuper et décorer le bureau J05.

Bonne chance à Mégane Millan et Eléonore Ferrier-Barbut dans l'élaboration de leurs thèses qui seront brillantes j'en suis persuadée.

Merci à l'ISIR d'avoir été ma maison pendant trois années et demi.

Merci à Solenne Page, Vincent Padois, Kévin Bailly, Catherine Achard, Emmanuel Guigon, Sinan Haliyo, Pascal Morin, Nicolas Perrin, Frédéric Plumet et Anis Sahbani pour avoir à un moment ou à un autre rendu ma vie plus légère en me faisant rire notamment.

Merci à mon groupe de doctorants/ingénieurs/stagiaires sans qui ces années m'auraient parue si longues : Justine Saint-Aubert, Thomas Daunizeau, Ryan Lober, Valentin Marcel, Antoine Hoarau, Jonathan Aigrain, Arthur Bouton, Carlos Vina, Anis Najar, Omar Islas Ramirez, Ariana Saracino, Raphaël Rose-Andrieu, Carlos Maestre, Jean-Baptiste Cazeneuve, Alberto Ortega Cabezon, Philipp Schlehuber-Caissier, Benjamin Cohen-Lhyver et Flavien Lebrun.

Merci à Adrienne Gouzien pour avoir rendu mes week-ends plus amusants, Basil Duvernoy pour m'avoir communiqué sa belle énergie dans ma dernière ligne droite, Houda Sakout, Roxane Tchernia, Sandrine Duong et Stéphanie Noubs pour leur amitié de longue date et Camille Carvalho pour avoir grandi à mes côtés.

Merci à François Capitain, Natacha Batreau, Etienne Debart, Stéphane Bayle et Adrienne Ollé pour cette année de théâtre qui m'a permis d'évacuer tout ce stress et de beaucoup rigoler.

Merci à Alex Vasquez pour être venu du Venezuela juste pour moi, et aujourd'hui

nous ne pouvons plus nous quitter. Et bien sûr merci à ma colocataire/meilleure amie, Camille Fradet, pour son soutien infaillible depuis maintenant 6 ans.

Pour finir je voudrais remercier ma famille qui me soutient depuis 27 ans. Merci à Yann, Jonathan et Sarah Falouss pour être ces cousins si géniaux et un merci plein de tendresse à Catherine Candalh-Falouss pour être toujours là pour nous et nous donner tout cet amour sans concession. Merci à Lily Candalh-Touta pour être la meilleure des grandes sœurs, toujours là à m'écouter, me conseiller si bien et élargir ma culture, à ma confidente, Fanette Candalh-Touta, la personne à qui je raconte les plus folles de mes histoires malgré les kilomètres qui nous séparent maintenant, à mon père, Marc Touta, pour m'avoir ouvert l'esprit à tant de choses, ma culture elle vient de là et un grand merci ne sera toujours pas suffisant et enfin merci à ma mère, Patricia Candalh, qui a rendu ma vie si facile et qui est la personne qui compte le plus à mes yeux, je vous aime tous les quatre très fort...

Table des matières

Introduction ix

1 Problématique 1
- 1.1 La laparoscopie . . . 1
- 1.2 L'apprentissage de la laparoscopie sur patient . . . 2
  - 1.2.1 Difficultés . . . 2
  - 1.2.2 Conséquences . . . 3
- 1.3 L'apprentissage en dehors du bloc opératoire . . . 3
  - 1.3.1 Les simulateurs de laparoscopie . . . 5
  - 1.3.2 Limitations de l'entraînement sur simulateur . . . 7
- 1.4 Notre approche . . . 8
  - 1.4.1 Phases de l'apprentissage . . . 9
  - 1.4.2 Les pistes proposées . . . 9

2 Amélioration du set-up : Guidage kinesthésique 13
- 2.1 Etat de l'art . . . 13
  - 2.1.1 Guidage total et guidage correctif . . . 14
  - 2.1.2 Guidage par augmentation d'erreur . . . 16
  - 2.1.3 Adaptation du guidage . . . 17
  - 2.1.4 Conclusion . . . 17
- 2.2 Expérience sur le retour kinesthésique pour l'apprentissage d'une trajectoire . . . 18
  - 2.2.1 Matériels et Méthode . . . 18
  - 2.2.2 Résultats . . . 23
  - 2.2.3 Discussion . . . 29
- 2.3 Conclusion . . . 30

3 Amélioration du set-up : Guidage sensoriel 31
- 3.1 Etat de l'art sur l'utilisation de retours multi-sensoriels dans l'apprentissage . . . 31
  - 3.1.1 Rééducation . . . 31
  - 3.1.2 Musique . . . 32
  - 3.1.3 Apprentissage chirurgie laparoscopique . . . 34
  - 3.1.4 Conclusion sur l'état de l'art . . . 35
- 3.2 Suivi de trajectoire . . . 36

3.2.1 Matériels et Méthode . . . 36
3.2.2 Résultats expérimentaux de l'apprentissage . . . 38
3.2.3 Discussion . . . 44
3.2.4 Conclusion . . . 45
3.3 Tâche de découpe . . . 46
3.3.1 Matériels et Méthode . . . 46
3.3.2 Résultats . . . 50
3.3.3 Discussion . . . 52
3.3.4 Conclusion sur le tâche de découpe . . . 54
3.4 Conclusion du chapitre . . . 54
3.5 Perspectives . . . 55

4 Personnalisation de l'apprentissage 57
4.1 Introduction . . . 57
4.2 Capacités Psychomotrices . . . 58
4.2.1 Proprioception . . . 58
4.2.2 Double-tâche . . . 63
4.2.3 Conclusion . . . 66
4.3 Division des difficultés . . . 66
4.3.1 Découpe . . . 68
4.3.2 Matériels et Méthode . . . 68
4.3.3 Résultats . . . 72
4.3.4 Discussion . . . 74
4.3.5 Conclusion sur la division des difficultés . . . 76
4.4 Conclusion du chapitre . . . 76
4.5 Perspectives . . . 77

5 Conclusions et Perspectives 79

A Questionnaire 83

B Publications 85

Introduction

La chirurgie laparoscopique est devenue un standard pour certaines procédures (appendectomie, cholécystectomie, etc) tant elle présente de nombreux avantages pour le patient d'un point de vue esthétique et rémission post-opératoire. La laparoscopie est une chirurgie minimallement invasive de la région abdominale et pelvienne. Le chirurgien opère à l'intérieur du corps à travers des incisions d'environ 5mm par lesquelles il insère des trocarts pour faire passer de longs instruments et la caméra endoscopique. Malheureusement, la chirurgie laparoscopique s'accompagne aussi de difficultés d'ordre mécanique (réduction du mouvement à quatre degrés de liberté), visuel (perte de perception de profondeur) et ergonomique (altération des retours haptiques).

L'apprentissage de cette chirurgie est alors long et difficile pour les internes en école de médecine mais également pour les chirurgiens experts apprenant de nouvelles procédures. Traditionnellement, l'apprentissage se déroule au bloc opératoire. Les internes assistent le chirurgien en naviguant la caméra par exemple. L'apprentissage sur patient réel est cependant stressant et ne laisse pas la possibilité de répéter les gestes. Selon la procédure, la courbe d'apprentissage peut-être très lente avec des conséquences sanitaires et financières significatives. Par exemple, atteindre la maîtrise de la prostatectomie radicale nécessite un minimum de 200 interventions [18] et la cholécystectomie, 100 opérations [16]. Dans ces conditions, l'apprentissage en dehors du bloc opératoire devient nécessaire. Des simulateurs de laparoscopie, passifs et de réalité virtuelle, ont alors été développés et ont suscité un grand intérêt dans le cadre de l'apprentissage. En effet, il a été montré que les compétences acquises sur simulateurs étaient transférables au bloc opératoire. Ils permettent également une décomposition des tâches et des gestes que les internes peuvent répéter jusqu'à leur maîtrise.

Malheureusement, les restrictions budgétaires et réglementaires ne permettent pas d'avoir des séances d'entrainement efficaces en dehors de la salle d'opération. Les sessions d'entrainement sont peu nombreuses et standardisées. Les méthodes d'apprentissage sont peu centrées sur l'élève et dépendent surtout de l'expert pour lequel aucune formation à l'enseignement n'a été proposée. Enfin, les étudiant(e)s ont peu de retour sur la qualité de leurs gestes durant la séance.

Le mémoire qui suit porte sur l'amélioration de la formation à la chirurgie laparoscopique sur simulateur en dehors du bloc opératoire. Notre approche s'inscrit dans le cadre d'un modèle d'apprentissage en trois phases : cognitive (théorie et observations), intégrative (répétition de gestes simples) et automatique (tâches complexes et développement de stratégies). Dans le cadre de notre recherche, nous nous sommes intéressés à la phase intégrative, définie dans la littérature comme la phase la plus importante et qui, pourtant, est négligée par manque de temps et de moyens.

Dans un premier temps, nous avons relevé, dans la littérature et en observant des sessions d'entrainement sur simulateur, les difficultés impactant l'apprentissage actuel. Nous présentons dans le chapitre 1 le déroulement des séances d'entrainement sur simulateur et en quoi ces séances manquent d'efficacité. Cela nous permet, par ailleurs, de définir les pistes explorées dans la suite du mémoire.

Tout d'abord, il est apparu dans nos recherches que, durant les séances d'entrainement, les élèves étaient peu guidés dans leurs gestes et qu'ils n'avaient pas de retour quantitatif sur leur performance. Il nous a alors semblé intéressant, dans le chapitre 2, d'explorer la piste du guidage kinesthésique comme aide à l'apprentissage du geste. Un dispositif d'entrainement standard a été enrichi d'un bras manipulateur afin d'aider à corriger la position de la pointe de l'instrument que l'élève manipule. Ce retour kinesthésique au niveau de la main de l'étudiant(e) se comporte alors comme un guide virtuel.

Au regard de résultats récents sur le guidage du geste en laparoscopie par retours sensoriels multimodaux, nous avons souhaité explorer aussi d'autres modes d'assistance moins invasifs que la comanipulation. Dans le chapitre 3, des retours sensoriels, de type visuel et vibro-tactile, ont été implémentés pour guider les gestes des élèves. Cette fois-ci, les apprenants sont actifs dans la correction de leur gestes et disposent d'un retour sur leur performance en temps réel.

Enfin, puisque l'élève est très peu considéré lors des séances d'entrainement où les exercices pratiqués sont standardisés, nous avons proposé, au chapitre 4, des pistes pouvant mener à des apprentissages personnalisés. Sur ce sujet, la littérature pointe certaines capacités psychomotrices comme étant directement liées à la performance en laparoscopie. Ces capacités peuvent servir d'indicateurs et aussi donner lieu à des exercices dédiés. Tout d'abord, nous avons voulu compléter l'existant et faire ce rapprochement pour deux autres capacités (proprioception et double-tâche, a priori très pertinentes). Nous nous sommes penchés, pour finir, sur la décomposition en difficultés techniques élémentaires de la tâche de laparoscopie elle-même, pour palier au problème d'absence de gradualité des séances d'entrainement classiques.

Chapitre 1

Problématique

Le développement de la chirurgie laparoscopique a permis d'améliorer le traitement et la convalescence des patients. En revanche, elle pose de nombreux problèmes pour les chirurgiens et les internes qui doivent développer de nouvelles capacités et apprendre de nouvelles procédures par rapport à la chirurgie ouverte.

Dans ce chapitre, nous mettons en avant les différentes exigences de l'apprentissage de la chirurgie laparoscopique. Nous exposons également notre approche du problème et comment elle peut s'intégrer aux séances d'entrainement actuelles.

1.1 La laparoscopie

Au cours du XX^{e} siècle, le développement de la chirurgie mini-invasive a permis de réduire le temps de convalescence [1], le nombre de traitements post-chirurgicaux, le nombre de complications [2] mais aussi d'améliorer les retombées esthétiques pour le patient en réduisant la taille des cicatrices [3] (Tableau 1.1).

La chirurgie laparoscopique est une chirurgie minimalement invasive de la région abdominale (Figure 1.1). Le chirurgien opère à l'intérieur du corps via des incisions d'environ 5 mm à travers lesquelles il insère des trocarts pour introduire les instruments et la caméra endoscopique.

Tableau 1.1 – *Comparaison chirurgie ouverte versus chirurgie laparoscopique.*

	Chirurgie ouverte	**Laparoscopie**
Nombre d'incisions	1	3 - 4
Taille de l'incision	15 cm	3 - 20 mm par incision
Nombre de cicatrices visibles	1 large	3 - 4 petites
Séjour à l'hôpital (jours)	3 - 7	1 - 3
Douleurs post-opératoire	Modérées	légères ou minimes
Temps de convalescence (arrêt de travail)	6 semaines	10 jours

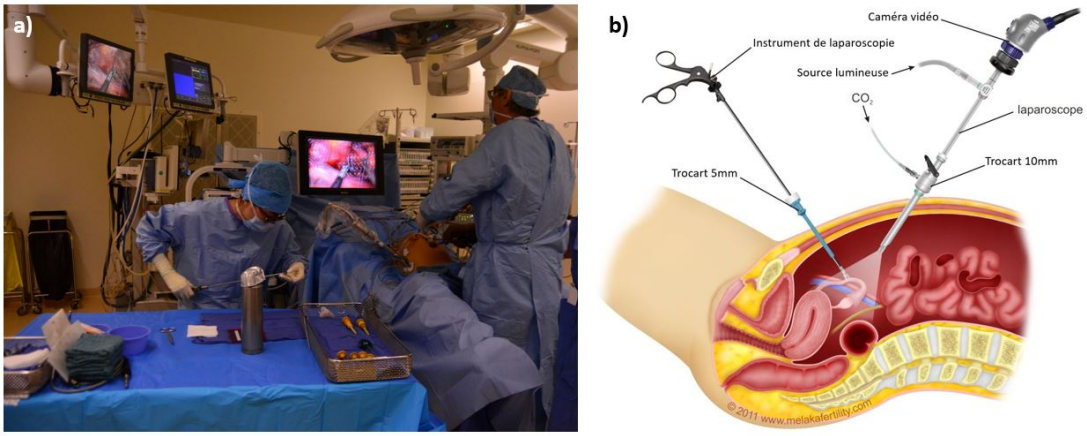

FIGURE 1.1 – *a) Chirurgie laparoscopique au bloc opératoire (Brice Gayet, Institut Mutualiste Montsouris) ; b) vue shématique de la laparoscopie [4].*

Cette chirurgie, malgré ses nombreux avantages par rapport à la chirurgie ouverte en termes d'esthétique post-opératoire et de temps de convalescence, s'accompagne de difficultés techniques significatives [5][6] :

- difficultés mécaniques : réduction du mouvement à 4 degrés de liberté, inversion des mouvements et effet "bras de levier" ;
- difficultés visuelles : perte de perception de la profondeur et décalage du champ de vision ;
- difficultés ergonomiques : altération des retours haptiques et posture statique.

Par ailleurs, les chirurgiens et les étudiants se plaignent fréquemment de douleurs musculo-squelettiques dans le dos, la nuque et les épaules en particulier du côté du membre dominant [7]. Il est vrai que la longueur des instruments et la présence de trocarts peuvent provoquer une fatigue excessive au niveau du poignet et de la main ainsi qu'une raideur dans les épaules [8]. Enfin, l'image à deux dimensions provoque une fatigue des yeux et l'ergonomie des poignées des instruments un engourdissement des doigts [9].

1.2 L'apprentissage de la laparoscopie sur patient

1.2.1 Difficultés

L'apprentissage de la chirurgie, de manière générale, se fait par simple observation intensive des techniques chirurgicales au bloc opératoire complétée d'un dialogue avec le chirurgien [10]. Ainsi, d'un point de vue purement éducatif, nous sommes dans de mauvaises conditions pour avoir un apprentissage efficace. Aussi, le bloc opératoire est un environement stressant pour l'élève qui n'a, par ailleurs, aucune opportunité de refaire les différents gestes.

L'apprentissage en salle d'opération semble surtout adapté à la chirurgie ouverte car, dans ce cas, les internes peuvent voir directement la scène intra-corporelle, les instruments ainsi que les mains du chirurgien, palper eux-mêmes les organes et avoir un

guidage direct de la part de l'expert. Jusque dans les années 90, les internes suivaient le paradigme *"regarde, fait, enseigne"* [11][12]. En laparoscopie, tout cela devient impossible à cause de l'accès mini-invasif et de la vision indirecte 2D de la scène opératoire [13]. Dans le même temps, de nouvelles compétences par rapport à la chirurgie ouverte sont à développer : le maniement de la caméra, la gestion de l'inversion de mouvement des outils, l'interprétation de l'image endoscopique, etc.

1.2.2 Conséquences

Dans ces conditions, l'acquisition des compétences cognitives et techniques propres à la laparoscopie est très progressive lorsqu'elle se fait au travers d'interventions supervisées au bloc opératoire. Le temps de formation, compté le plus souvent en nombre d'interventions avant stabilisation de la coubre d'apprentissage, est parfois très conséquent autant pour les internes (Tableau 1.2) que pour les experts s'initiant à de nouvelles procédures (Tableau 1.3). On observe en effet dans la littérature une grande variabilité des courbes d'apprentissage selon les spécialités, les types d'interventions et probablement aussi en termes d'individus. Pour les chirurgiens novices, la durée avant familiarisation peut aller de quelques dizaines (appendectomie) à plusieurs centaines d'opérations sur patient (prostatectomie radicale). Et la grande variabilité de compétences entre les internes est une difficulté supplémentaire empêchant un planning précis des interventions. Sur une procédure d'hernie inguinale par exemple, il existe une différence de 27% de temps d'intervention entre les internes en début et ceux en fin d'apprentissage [14].

D'un point de vue financier, l'apprentissage en salle d'opération a également des conséquences importantes. En moyenne, entrainer un étudiant au bloc opératoire revient à $48000 sur l'ensemble de son apprentissage contre $270 pour un entrainement sur simulateur [24]. Lorsqu'une intervention est pratiquée par un interne il y un surcoût sur l'immobilisation du bloc opératoire, de l'équipe d'intervention et l'immobilisation d'une chambre [25]. Par exemple, lors d'une cholecystectomie pratiquée par un interne, l'intervention est allongée en moyenne de 23 minutes. Sachant que chaque minute passée au bloc opératoire coûte $20 et que le chirurgien est payé en moyenne $380 par heure, cela mène à un surcoût conséquent [25].

Enfin, l'apprentissage au bloc opératoire est également dangereux pour le patient. Une augmentation des complications opératoires et post-opératoire a été observée pour différentes interventions. Par exemple, dans le cas de l'apprentissage de la cholecystectomie, le taux d'infection post-opératoire est de 16% en début d'entrainement contre 8% après une centaine d'interventions [16].

1.3 L'apprentissage en dehors du bloc opératoire

Dans les conditions évoquées ci-dessus, l'apprentissage de la laparoscopie en dehors du bloc opératoire devient nécessaire. Les internes eux-mêmes en sont conscients et réclament plus de séances d'entrainement pratique en dehors de la salle d'opération, sur cadavre, animal ou simulateurs de laparoscopie [24]. L'entrainement sur cadavre est intéressant mais compliqué sur le plan logistique et organisationnel. L'entrainement sur cochon présente un coût important, pose des problèmes éthiques et il y a un risque

Tableau 1.2 – *Apprentissage des chirurgiens sans expérience en laparoscopie.*

Opérations	**Nombre d'interventions nécessaires pour atteindre le plateau d'apprentissage**	**Critères de performance**	**Cible**
Traitement hernie inguinale [14]	50	Temps d'intervention	60 min
Traitement cancer colorectal [15]	30 - 50	Complication intra/ post-opératoire	
Cholécystectomie [16]	100	Taux d'infections post-opératoire	8%
Appendicectomie [17]	30	Temps d'intervention	40 min
Prostatectomie radicale [18]	200 - 250	Marges de résection positives	
Fundoplicature de Nissen [19]	50	- Temps d'intervention - Complication intra/ post-opératoire	85 min 10%

Tableau 1.3 – *Apprentissage de nouvelles procédures par les chirurgiens experts.*

Opérations	**Nombre d'interventions nécessaires pour atteindre le plateau d'apprentissage**	**Critères de performance**	**Cible**
Cancer colorectal avec robot [15]	15 - 35	Temps d'intervention	
Hépatectomie majeure [20]	45 - 75	Temps d'intervention	270 min
Cholécystectomie avec trocart unique [21]	20	Temps d'intervention	68 min
Prostatectomie radicale avec robot [18]	100 - 300	Marges de résection positives	
Cholécystectomie avec robot [22]	15	Temps d'intervention	<30 min
Cholécystectomie [23]	50	Lésions du canal biliaire	<0.17%

de maladies infectieuses. C'est pourquoi les simulateurs de laparoscopie sont de plus en plus employés aujourd'hui.

1.3.1 Les simulateurs de laparoscopie

Dans les années 90, des simulateurs de laparoscopie passifs et de réalité virtuelle ont été développés et plusieurs études ont prouvé leur intérêt pour accélérer la courbe d'apprentissage [11][26][27]. Il a en plus été montré dans [28] que l'entrainement sur cochon et celui sur simulateur étaient équivalents selon les critères de l'"*Objective Structured Assessment of Technical Skill*" (OSATS). Les simulateurs permettent une standardisation des exercices avec une décomposition des tâches et des gestes. Les élèves ont la possibilité de répéter les différents exercices jusqu'à leur maîtrise. Pour les étudiant(e)s et les enseignant(e)s, ce type d'entrainement procure une plus grande flexibilité dans les exercices pratiqués et un coût de séance fixe. Au début des années 2000, un programme d'entraînement à la chirurgie laparoscopique (*Fundamentals of Laparoscopy Surgery* (FLS)) a été créé et constitue, aujourd'hui, une référence en la matière [27][29]. Il se compose de cinq exercices qui regroupent les gestes de bases de la chirurgie laparoscopique : transfert de perles, exercice de découpe, nœud intra et extra corporels, et boucle de ligature. La pratique systématique de ces exercices sur simulateur a montré une amélioration de l'apprentissage chez 80% des élèves [27].

Les compétences évaluées lors des séances d'entrainement sont :

— le temps de réalisation de la tâche,
— la précision,
— la fluidité du mouvement,
— la qualité du résultat final.

Pour une évaluation globale des élèves, les enseignants peuvent avoir recours à des barêmes ou des listes de contrôle comme l'OSATS [28]. Concrètement, les différentes étapes des tâches à réaliser sont repertoriées dans une liste de contrôle que l'enseignant valide ou non au cours d'un exercice. Même si la littérature a montré que l'OSATS pouvait évaluer de manière fine la performance des étudiant(e)s, le recours à ce type d'évaluation requière un(e) enseignant(e) par élève.

Concrêtement, lors de ces séances en dehors du bloc opératoire, deux types de simulateurs sont mis à disposition des étudiant(e)s (Figure 1.2).

Il y a, tout d'abord, les simulateurs passifs, appelés pelvi-trainer [27], sur lesquels les étudiant(e)s s'entrainent avec de vrais instruments de laparoscopie et de vrais trocarts, ce qui permet un ressenti réaliste des retours haptiques (Figure 1.2a). Les élèves s'entrainent sur les exercices définis par le *"FLS program"* et peuvent les répéter autant de fois qu'ils/elles le souhaitent. Le pelvi-trainer est peu coûteux, peu encombrant et de prise en main aisée. Cependant, les simulateurs passifs ne délivrent ni score instantané ni information sur la performance. L'étudiant(e) ne peut alors ni se corriger pendant la séance ni évaluer ses améliorations d'une séance à l'autre. Dans ces conditions, il est en particulier difficile de garder un bon niveau de motivation [30].

Il existe également des simulateurs de réalité virtuelle [31]. Ceux-ci sont constitués généralement d'une partie physique émulant la partie extracorporelle d'un vrai dispositif d'intervention (poignées des instruments) et d'un écran où est retransmis la

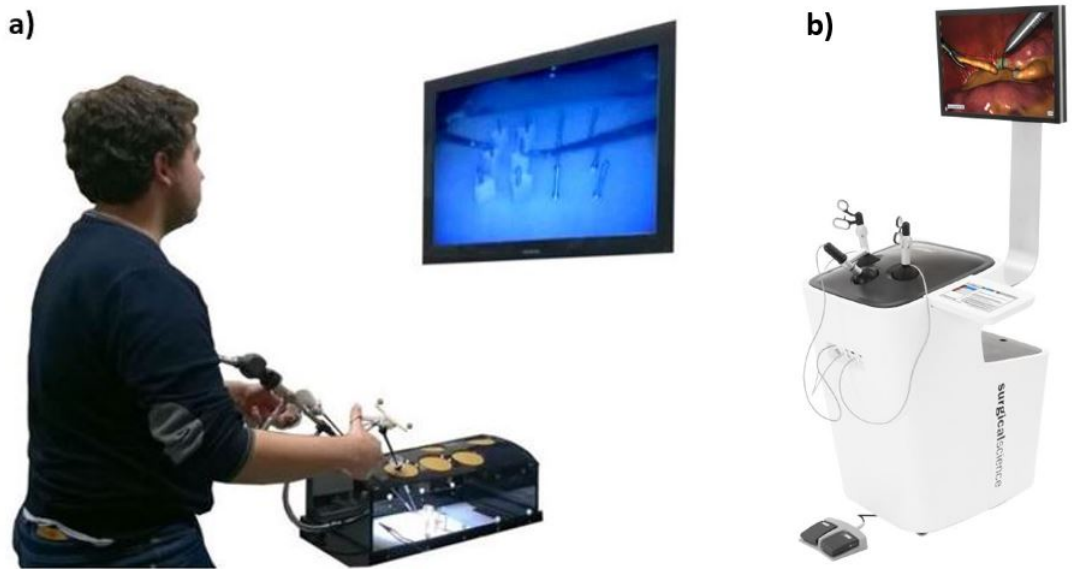

FIGURE 1.2 – *Simulateurs d'entrainement à la laparoscopie - a) passif (pelvi-trainer) ; b) réalité virtuelle (LapSim)*

scène chirurgicale numérique et divers informations à destination de l'élève. Sur ces simulateurs, l'étudiant peut réaliser des exercices concrets comme clamper un vaisseau sanguin ou retirer des calculs rénaux (Figure 1.2b). Des exercices pour apprendre à déplacer la caméra endoscopique sont également proposés. Des indicateurs visuels sont disponibles pour prévenir l'étudiant qu'il va trop loin dans le champ ou qu'il est en train d'endommager les tissus par exemple. Le temps total, le nombre de mouvements sur chaque main, les pertes de sang et l'endommagement des tissus sont les paramètres enregistrés et communiqués à l'étudiant sous forme de scores à la fin de la séquence. Ceux-ci sont gardés en mémoire pour suivre l'évolution de l'élève au cours de son apprentissage. Toutefois, le simulateur de réalité virtuelle demeure onéreux et ne procure pas, en général, de retour haptique.

De nombreuses études ont porté sur la transférabilité au bloc opératoire des compétences acquises sur simulateur. Certains étudiant(e)s suivaient un entrainement classique alors que d'autres avaient des séances supplémentaires en dehors de la salle d'opération où ils/elles s'entrainaient sur pelvi-trainer et/ou simulateur de réalité virtuelle. Il a alors été montré que les élèves s'entrainant sur pelvi-trainer avaient des gestes plus rapides [32]. La coordination entre leurs mains, leur représentation spatiale [40] ainsi que leur performance générale au bloc opératoire [24] se révélaient également meilleures que celles des élèves du groupe de contrôle. L'apprentissage sur simulateurs de réalité virtuelle améliore aussi la précision et la rapidité des élèves [34][35]. Il a également été noté, qu'au bloc opératoire, les élèves sont moins hésitant(e)s [26], qu'ils/elles ont moins besoin de consignes de la part du chirurgien expert et que les tissus sont moins endommagés [36].

Les simulateurs physiques sont, en général, préférés aux simulateurs de réalité virtuelle de par la présence du retour haptique et de par leur coût qui se révèle nettement moins élevé : 3000€ pour un pelvi-trainer contre 45000€ pour un simulateur de réalité virtuelle sans retour haptique [37]. Le pelvi-trainer semble également mieux convenir à l'apprentissage des compétences psychomotrices nécessaires à la laparoscopie grâce à la présence de retours haptiques [38]. En revanche, l'entrainement sur simulateur de réalité virtuelle a montré que les élèves avaient des gestes plus sécurisés (maintien des tissus, mouvements de la pointe de l'instrument, etc)[39]. Cependant, la plupart des études ont montré que les apprentissages sur les deux simulateurs étaient comparables notamment en ce qui concerne l'augmentation de la vitesse d'exécution des gestes [37][38][39][40].

Ainsi, un entrainement qui combine les deux simulateurs semble être une solution pour améliorer le début de l'apprentissage à la chirurgie laparoscopique. Grâce au simulateur de réalité virtuelle, les élèves peuvent développer des gestes plus sécurisés [39] mais aussi mieux analyser leurs compétences et leurs faiblesses à l'aide du score donné en fin d'exercice [41]. Le pelvi-trainer, quant à lui, permet de travailler la manipulation des instruments et de la caméra endoscopique [41]. Il permet également un meilleur apprentissage de la tâche de découpe et du noeud de suture où les retours haptiques sont très importants [26]. Ainsi, le choix du simulateur peut se faire en fonction du type d'exercice pratiqué [40].

1.3.2 Limitations de l'entraînement sur simulateur

Afin d'appréhender concrètement la formation sur simulateur, nous avons, durant un semestre, assisté aux séances d'entrainement à la laparoscopie à l'école de chirurgie de la Pitié-Salpêtrière. Ceci nous a permis d'échanger directement avec les enseignant(e)s et les élèves et de bien nous imprégner des problèmes que les étudiant(e)s rencontrent et des stratégies d'enseignement développées par les experts.

Nous avons pu observer que, lors de ces cours de laparoscopie, les exercices pratiqués se basent sur le modèle *FLS*. Après une semaine de formation aux gestes de chirurgie avant le début de l'internat, les étudiants ont quatre ateliers d'une heure et demie le soir pendant l'année où ils peuvent s'entrainer sur pelvi-trainer. Dans ce cas, ils pratiquent des découpes, des nœuds de sutures ou encore des anastomoses.

A la fin de la première année d'internat, les étudiant(e)s sont évalué(e)s à la fois sur pelvi-trainer et sur simulateur de réalité virtuelle (Tableau 1.4).

Sur la base de ces observations de terrain et de données de la littérature, il nous est apparu que, généralement, l'entrainement sur simulateur de laparoscopie n'est pas optimal au regard des besoins des étudiant(e)s :

— Ils/elles ont peu de séances d'entrainement. Le fait est qu'en période de restriction budgétaire, les chirurgiens experts ont de moins en moins de temps à accorder aux internes en dehors de la salle d'opération [24]. Ainsi, les élèves rencontrés n'ont que quatre cours du soir d'une heure et demi dans l'année, animés le plus souvent par des internes de dernière année. Le niveau entre les élèves étant très hétérogène en début d'apprentissage, certains peuvent avoir besoin de 21h d'entrainement et 782 répétitions pour maîtriser une tâche comme la suture [18]. D'ailleurs, 65% des étudiant(e)s interrogé(e)s dans [24] estiment qu'il leur

faudrait plus de séances d'entrainements en-dehors de la salle d'opération.
— Les méthodes d'apprentissage sont peu centrées sur l'apprenti. La séance d'entrainement dépend surtout de l'expert et non des élèves présents [42]. Il n'existe pas de formation pour les enseignant(e)s et ceux-ci font part de leurs difficultés à enseigner des stratégies qui sont souvent pour eux des réflèxes ou des habitudes inconscientes [43].
— Les exercices sont standardisés. Il n'y a pas de gradualité et les élèves sont d'emblée confrontés à l'ensemble des difficultés. Ainsi, l'apprentissage est peu adapté au profil de chaque interne ce qui conduit à un manque d'intérêt de ces derniers et parfois des abandons de la spécialité [44].
— Les capacités psychomotrices individuelles des élèves ne sont pas prises en compte en début d'apprentissage alors que celles-ci sont très hétérogènes d'un individu à l'autre. Par exemple, seulement 10% des élèves ont des capacités innées de représentation spatiale au début de l'entrainement [45].
— Les séances d'entrainement sont douloureuses pour les élèves à cause du matériel et des mauvaises postures. Par exemple la hauteur des tables est fixe et les élèves, suivant leur taille, auront plus rapidement mal dans les épaules et la nuque [46]. L'angle des trocarts provoque également une mauvaise posture chez certains étudiant(e)s. En début d'apprentissage les élèves ont tendance à trop lever les coudes et éprouvent des douleurs au niveau des épaules, ce qui limite la durée des séances.
— Contrairement aux séances au bloc opératoire où l'élève est seul avec l'expert, lors d'une séance d'entrainement sur pelvi-trainer jusqu'à quatre élèves sont présents pour un seul professeur. Or, comme mentionné précédemment, un manque de retour instantané sur la performance a un impact négatif sur l'apprentissage en termes de motivation ou d'efficacité [24][30][47].

Tableau 1.4 – *Examen de laparoscopie des internes de première année*

Pelvi-Trainer	20 points : - 5pts sur la connaissance du matériel de coelioscopie - 15pts sur les capacités à réaliser un noeud de suture (choix des instruments, introduction de l'aiguille, positionnement de l'aiguille et réalisation du noeud)
Simulateur de réalité virtuelle	2 exercices : - Faire disparaitre des calculs rénaux - Couper un vaisseau après l'avoir clampé +/- 1pt : maniement de la caméra

1.4 Notre approche

Comme nous venons de l'évoquer, l'apprentissage de la laparoscopie est complexe de par les difficultés de la chirurgie elle-même, du nombre de procédures à retenir et du stress opératoire. En laboratoire, les internes et les chirurgiens experts manquent de temps, de moyens et les simulateurs mis à leur dispositions présentent un grand

nombre de limitations. Les élèves sont souvent frustrés par les difficultés rencontrées et certains abandonnent au profit d'une autre spécialité chirurgicale.

1.4.1 Phases de l'apprentissage

Notre approche du problème s'inscrit dans le cadre d'un modèle en trois phases de l'apprentissage de la laparoscopie. Cet apprentissage, comme dans le cas de l'acquisition de n'importe quelle autre compétence technique et manuelle, se décompose effectivement en trois étapes [48][49] (Tableau 1.5) :

- **Phase cognitive.** Les étudiant(e)s commencent par la phase dite cognitive [50]. C'est une phase d'observation et d'intellectualisation des tâches. Ils suivent des cours durant lesquels les enseignants donnent des explications sur leurs réalisations et leurs difficultés. En chirurgie, les étudiant(e)s assistent également à des procédures chirurgicales au bloc opératoire afin d'intellectualiser les différents enchaînements (comment positionner ses mains, comment faire un nœud plat, etc).
- **Phase intégrative.** Durant cette phase, appelée aussi *« deliberate practice »* [51], l'élève concentre ses efforts sur la maîtrise de tâches techniques élémentaires, les unes après les autres. A chaque fois, l'adresse et la dextérité des gestes se développent jusqu'à atteindre un plateau d'apprentissage. La phase intégrative est désignée dans la littérature comme la phase la plus importante car le nombre d'heures qui lui est consacrée détermine le niveau futur d'expertise [49]. En rééducation par exemple, la répétition d'une tâche ayant un but précis permet de retrouver la mobilité motrice plus rapidement [52][53]. En laparoscopie, la phase intégrative se déroule, en général, en dehors du bloc opératoire parfois sur cadavre ou animal mais le plus souvent sur simulateur. Elle consiste en l'exécution et la répétition de tâches simples jusqu'à ce que les mouvements deviennent fluides et efficaces.
- **Phase d'automatisation.** En fin d'apprentissage et avant de devenir un expert dans le domaine, l'apprenti passe par la phase dite d'automatisation. Il connaît tous les gestes de base et peut réaliser des tâches complètes. Il ne réfléchit plus aux gestes à accomplir mais plutôt à la manière de les améliorer en terme de confort et d'efficacité, il cherche de nouvelles alternatives pour pouvoir s'adapter à n'importe quelle situation. Passé cette phase d'assimilation, l'élève est lui-même capable d'enseigner les tâches à réaliser [16][22].

1.4.2 Les pistes proposées

L'étude bibliographique des différentes phases d'apprentissage et nos observations à l'école de chirurgie nous conduisent à proposer des pistes d'amélioration des différentes phases d'apprentissage de la laparoscopie.

Concernant la phase cognitive de l'apprentissage, nous nous contenterons de mentionner que les enseignant(e)s peuvent avoir recours aux principes de la *"cognitive task analysis"* (CTA) [50]. Ce genre d'analyse consiste à décomposer et présenter une opération ou une tâche complexe au travers de sous-tâches plus aisées à comprendre et à réaliser. Une *CTA* est définie par un comité d'experts qui se mettent d'accord sur la

Tableau 1.5 – *Thérorie de Fitts-Posner : les trois étapes d'acquisition de compétences motrices [29]*

Phases	**But**	**Activité**
Cognitive	Comprendre la tâche	Discussion et démonstration
Intégrative	Comprendre et réaliser les mécanismes de la tâche	Répetition d'une tâche et retour sur la performance
Automatique	Réaliser la tâche rapidement, efficacement et avec précision	Réalisation automatique d'une tâche avec faibles ressources cognitives et focus sur comment améliorer la performance

décomposition en sous-tâches, les points de passages obligés, les différentes alternatives et les critères d'évaluation des performances. Présentée ainsi aux étudiant(e)s, la *CTA* permet une analyse approfondie des séquences de gestes et de leur bon enchaînement jusqu'au résultat final et prépare efficacement la phase intégrative de l'apprentissage. Des *CTA* dédiées à la laparoscopie sont décrites dans [50][54] avec des résultats intéressants en terme de compétences générales et de confiance en soi.

Concernant la phase d'automatisation du geste laparoscopique, mentionnons que des solutions sont parfois mises en oeuvres pour rendre l'apprentissage au bloc opératoire plus efficace :

— tenue d'un registre [11][12],
— enregistrement video et compte rendu de l'intervention [14],
— sélection systématique des cas traités en fonction de l'expérience de l'apprenant [16],
— systématisation du retour de l'expert [55].

Cependant ces approches sont difficiles à promouvoir dans un contexte de restrictions et de charge de travail croissante des internes et des praticiens.

Durant cette thèse, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la phase intégrative de l'apprentissage de la laparoscopie qui est définie dans la littérature comme la plus importante. Durant cette étape, les élèves s'entraînent généralement sur simulateurs et repètent des tâches simples jusqu'à leur maîtrise. Comme nous l'avons précisé, par manque de temps et de moyen, cette phase est négligée et les séances ne sont pas optimisées.

Nous proposons deux types de solutions pour améliorer la phase intégrative de l'apprentissage de la laparoscopie.

Puisque, durant une séance d'entrainement sur pelvi-trainer, l'élève n'est pas guidé activement dans ses gestes et ne dispose pas de retour instantané sur sa performance, nous proposons d'enrichir le dispositif d'entraînement en implémentant sur celui-ci des moyens additionnels de guidage et de correction du geste. Ainsi, dans le chapitre 2, nous implémentons une assistance robotique au geste, dans le contexte d'un entrainement

sur pelvi-trainer, sous forme d'un bras haptique appliquant un retour kinesthésique au niveau de la main de l'apprenant. Dans le chapitre 3, deux autres retours sensoriels, de type visuel et vibro-tactile, sont également testés.

De plus, puisque l'élève lui-même est très peu considéré lors des séances d'entrainement où les exercices pratiqués sont standardisés, nous proposons, au chapitre 4, des pistes pouvant mener à des apprentissages personnalisés. La première approche proposée se base sur les capacités psychomotrices des élèves. Nous étudions la corrélation entre le niveau en laparoscopie de novices et certaines de leurs capacités. Dans une deuxième partie, nous proposons une approche de la personnalisation basée, cette fois-ci, sur la division des difficultés de la chirurgie laparoscopique, en opposition à l'absence de gradualité des séances d'entrainement classiques.

Chapitre 2

Le retour kinesthésique pour l'aide à l'apprentissage d'un suivi de trajectoire

Après l'état de l'art, évoqué dans le chapitre précédent à propos des difficultés rencontrées dans l'apprentissage actuel et les observations que nous avons pu réaliser à l'école de médecine de la *Pitié-Salpêtrière*, il est apparu que le setup sur lequel s'entrainent les étudiants en dehors du bloc opératoire ne donne pas assez de retours d'information sur la performance elle-même et les erreurs commises en cours d'exercice.

L'une des conséquences notables est que l'étudiant(e) apprend de mauvais mouvements et adopte de mauvaises postures. L'enseignant(e) est là pour corriger l'élève et enseigner la façon correcte de faire mais il/elle ne peut l'évaluer qualitativement et quantitativement en temps réel.

C'est pourquoi nous souhaitons explorer dans ce chapitre la possibilité de donner des informations en temps réel à l'étudiant sous forme de retours sensoriels, par exemple de type kinesthésique, afin d'améliorer la performance de l'élève en le rendant plus actif et plus autonome lors d'un exercice.

Après un état de l'art sur l'utilisation du guidage kinesthésique dans l'apprentissage de tâches motrices, nous exposons une expérience que nous avons réalisée sur l'utilisation de ce guidage dans l'apprentissage d'un suivi de trajectoire 2D en conditions laparoscopiques.

2.1 Etat de l'art

La kinesthésie représente la perception du mouvement. Elle nous renseigne sur la position et les déplacements des différentes parties du corps, informations obtenues par des mécano-récepteurs profonds.

Ainsi un guidage kinesthésique exploite cette capacité qu'a l'organisme à tirer des informations de nos membres pour réaliser un mouvement. De plus, la mémoire kinesthésique est une mémoire durable contrairement à la mémoire visuelle [56], ce qui est une capacité intéressante lors d'un apprentissage.

Le guidage kinesthésique a par ailleurs été beaucoup utilisé dans certains domaines d'apprentissage comme la rééducation, l'écriture et le sport. Plusieurs types de guidages ont été étudiés : guidage total, guidage correctif ou guidage par augmentation d'erreur.

Ainsi, dans cette section, nous nous intéresserons aux différents guidages kinesthésiques qui existent pour améliorer l'apprentissage de gestes et ce, dans différents domaines d'apprentissage.

2.1.1 Guidage total et guidage correctif

La première idée qui vient lorsque l'on veut utiliser le guidage kinesthésique comme aide à l'apprentissage est d'utiliser un bras robotique pour guider activement le geste. Le robot est alors un professeur virtuel et peut effectuer soit un guidage total où l'élève est passif et ne fait que ressentir haptiquement les mouvements, soit un guidage correctif où le robot vient corriger les gestes du sujet en cas d'erreurs de sa part.

Geste médical

En plus de la grande précision requise pour réaliser un geste médical, il arrive, en médecine, que la vision soit altérée ce qui rend le geste et son apprentissage plus difficile.

Dans [57], trois groupes d'élèves ont appris à insérer une aiguille de biopsie sous contrôle d'images radiographiques, tâche où le retour visuel est altéré. Le premier groupe apprenait seulement par instructions verbales. Le second groupe pouvait, en plus des instructions verbales, observer un enseignant réaliser le geste. Enfin, le troisième groupe, à l'aide d'une interface virtuelle, pouvait se faire guider haptiquement par l'enseignement, en plus des informations visuelles et orales (Figure 2.1).

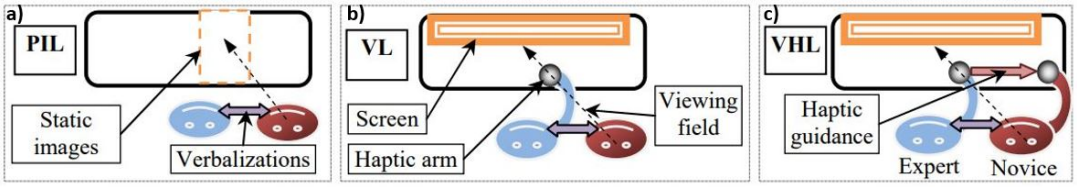

FIGURE 2.1 – *Conditions d'apprentissage - a) instructions orales, b) guidage visuel et instructions orales, et c) guidage haptique total avec guidage visuel et instructions orales [57].*

Le groupe haptique est celui qui, en fin d'apprentissage, était le plus rapide, que ce soit dans la phase de planification ou de manipulation de l'aiguille. Il réalisait également des gestes qui rentraient moins en contact avec les organes. Enfin, le groupe haptique était moins dépendant du retour visuel lors de l'insertion de l'aiguille.

Rééducation

Le guidage total est beaucoup utilisé en rééducation, notamment en début de thérapie pour réactiver les circuits neuronaux. Dans [53], les auteurs ont étudié les bénéfices d'une aide robotique pour assister, corriger, évaluer et informer le patient sur

sa performance. Ils ont notamment montré que la répétition d'un geste par assistance totale améliorait la coordination des mouvements de patients ayant subi une attaque cérébrale.

Ecriture

Dans le domaine de l'écriture, de nombreuses études ont exploré les bénéfices éventuels que pouvait avoir un guidage total sur l'apprentissage de lettres chinoises ou arabes par exemple. Ainsi dans [58], deux types de guidages haptiques ont été développés : un guidage total où le sujet est esclave du mouvement et se laisse guider le long de la trajectoire, et un guidage correctif où le sujet réalise lui-même le mouvement mais le robot vient corriger la position de la pointe de l'instrument en cas de déviation. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec le guidage par correction, et, au sein même du groupe, les résultats les plus positifs ont été obtenus par les sujets totalement novices dans l'écriture de caractères chinois.

Dans l'étude présentée dans [59], trois groupes ont également appris à écrire des caractères arabes et chinois au travers d'une interface virtuelle : les étudiant(e)s tenaient un stylet relié à un bras robotique et la trajectoire était projetée sur un écran tactile. Un groupe de référence qui n'avait qu'un guidage visuel était comparé à deux groupes avec retours haptiques : guidage en position où l'étudiant est guidé le long de la trajectoire, et guidage en force où le robot corrige la position de la pointe de l'instrument en envoyant une force en bout d'instrument. Le guidage en force ajouté au retour visuel améliorait la performance en précision et en durée. En revanche, le guidage en position détériorait l'apprentissage en comparaison du groupe contrôle.

Suivi de trajectoire

Dans [60], un groupe avec un retour visuel a été comparé à un groupe avec un retour kinesthésique (guidage total) dans l'apprentissage d'une trajectoire courbée. Le groupe visuel regardait le bras robotique agir le long de la trajectoire alors que les sujets du groupe kinesthésique posaient dans le même temps leur main sur le robot pour ressentir haptiquement le mouvement. L'ajout d'un retour haptique n'a pas amélioré significativement le mouvement comparé au groupe avec un retour visuel seul. Ces résultats ont également été observés dans [61] où les deux groupes devaient cette fois-ci apprendre à réaliser un cercle. Lorsqu'il était demandé aux deux groupes de reproduire la tâche sans aide, seule la rapidité était meilleure pour le groupe haptique comparé au groupe visuel. Les auteurs en concluent que les sujets sont trop passifs face à la tâche et cela s'accompagne d'une perte d'attention et de motivation. Cette observation sera notée de la même manière dans [62] où trois groupes : un groupe de référence qui apprend par lui-même, un groupe pour lequel le mouvement est imposé et un dernier groupe qui voit son mouvement corrigé en cas d'erreur, ont appris à réaliser un mouvement pendulaire. Au final, le professeur virtuel est apparu peu aidant dans cet apprentissage et a même dégradé certaines performances car le retour kinesthésique a rendu l'aspect de la tâche trop simple ce qui a causé, là aussi, une perte d'attention des sujets.

Dans [63], l'apprentissage d'un suivi de trajectoire à l'aide d'un retour kinesthésique a été étudié. L'étude impliquait trois groupes : visuel, haptique (guidage total) et visio-

haptique. Ils ont observé que, lorsque seul le retour haptique était disponible, l'aspect temporel de la tâche était amélioré alors que c'est lorsque le retour visuel est activé seul que la précision de la tâche est meilleure. Cependant, c'est la combinaison des deux retours, visuel et haptique, qui a mené à la meilleure performance puisque le groupe s'est amélioré en temps et en précision. Dans ce cas, la combinaison de deux retours sensoriels mène à une compensation des faiblesses de chaque retour et donc améliore la performance finale.

Pour l'apprentissage d'une tâche complexe, comme suivre une trajectoire avec absence de vision, l'étude présenté dans [64] a comparé un groupe de référence où les sujets apprenaient par eux mêmes et un groupe avec un guidage total le long de la trajectoire. Le guidage total est celui qui a donné les moins bons résultats. Une conclusion de l'étude est que pour réellement apprendre une tâche et s'améliorer au cours de l'apprentissage les sujets doivent commettre des erreurs pour se corriger et développer des stratégies.

2.1.2 Guidage par augmentation d'erreur

Au vu des résultats précédents, le guidage kinesthésique total ou correctif n'apparaît pas comme la meilleure aide dans un apprentissage de gestes dextres. Ces mouvements peuvent être utiles au tout début d'un entrainement pour montrer activement la tâche mais, très vite, il semble que l'aide doit évoluer pour avoir des sujets plus actifs et plus attentifs lors de la réalisation de la tâche.

Plusieurs approches ont ainsi démontré que lorsque le mouvement du sujet est perturbé, cela améliore l'apprentissage de la tâche. L'hypothèse ici est que l'élève est dans ce cas obligé de corriger sa performance et est, par conséquent, plus actif et amené à développer des stratégies.

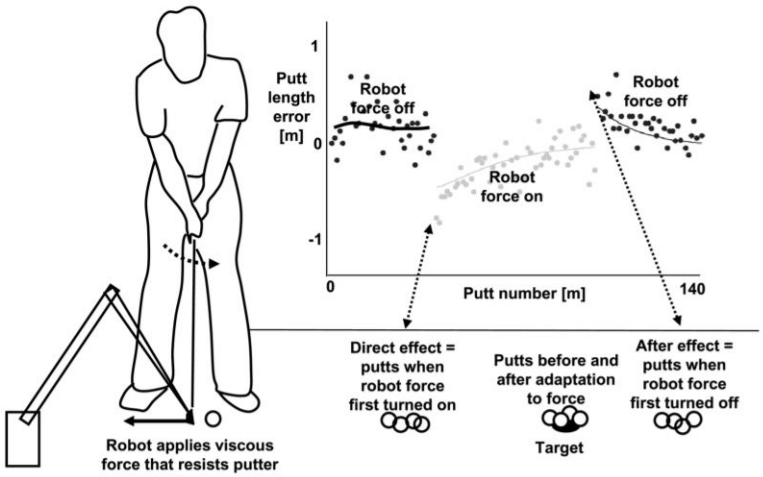

FIGURE 2.2 – *Apprentissage du swing avec forces pertubatrices [65].*

Cette approche a fait ses preuves notamment dans le domaine du sport. Ainsi dans [65], l'étude s'intéresse à l'apprentissage d'un swing en golf. Un bras robotique était fixé à la tête du club de golf (Figure 2.2). Les sujets s'entrainaient d'abord sans robot

durant 40 essais. Puis le robot appliquait une force résistante en bout d'instrument ce qui rendait le mouvement plus difficile. Après une soixantaine d'essais, la force résistante était retirée, un contrecoup était observé sur les premiers essais mais très vite l'erreur diminuait pour s'approcher de zéro et la dispersion des erreurs entre les essais était beaucoup moins importante.

Dans [66], l'influence de l'augmentation d'erreur dans le cadre de l'apprentissage du flipper en réalité virtuelle a été étudié. Le but était d'utiliser le mouvement du poignet pour presser un bouton qui lançait une balle vers une position aléatoire selon l'essai. Un guidage avec amplification d'erreur a été implémentée pour accélérer ou décélérer les mouvements du poignet. Le groupe s'est largement amélioré en temps et les performances des sujets se sont homogénéisées en comparaison du groupe contrôle. Cependant, l'apprentissage par amplification d'erreur a d'avantage profité aux sujets qui connaissaient déjà la tâche. Ainsi, Milot et al. proposent d'adapter le guidage au sujet en regardant, par exemple, le score au tout premier essai. Si la performance n'est pas élevée, le sujet commencera par un apprentissage avec guidage correctif. En revanche si le sujet est déjà à l'aise dans la tâche, il faudra plutôt lui apporter un guidage par amplification d'erreur.

En rééducation, l'approche de l'apprentissage par augmentation d'erreur a également été abordée. Dans [67], par exemple, l'étude a voulu observer si l'ajout de forces visqueuses au niveau articulaire pouvait modifier la synergie du membre supérieur. Les sujets plaçaient leur bras dans un exosquelette et celui-ci venait appliquer les forces au niveau du coude et de l'épaule mais sans modifier le mouvement de la main. Après un entrainement sur 300 répétitions d'une tâche de pointage, lorsque les forces étaient coupées, 86% des sujets ont modifié leur coordination articulaire. Il apparait donc que la pertubation des gestes dans un apprentissage implique un changement de comportement des sujets, même si ces changements n'ont pas été observés parmi tous les participants.

2.1.3 Adaptation du guidage

L'idée d'adapter le type de guidage au niveau des performances des apprenants a déjà été proposée dans le domaine de la rééducation. Ainsi dans [70], un bras robotique a participé à la thérapie de patients ayant subi une attaque cérébrale. Le robot apportait une force aidante ou correctrice au patient inversement proportionnelle à la vitesse du sujet sur l'essai précédent. L'étude a montré une nette amélioration de la performance en temps et précision.

Bayart et al. ont étudié dans [64] l'apprentissage d'un suivi de trajectoire lorsque la vision n'est pas disponible. Ils ont comparé le groupe de référence à un groupe dont le guidage kinesthésique évoluait au cours de l'apprentissage. Ce dernier commençait par un guidage total puis l'aide se transformait en guidage correctif et son coefficient de raideur diminuait petit à petit. Le groupe a vu sa performance s'améliorer plus rapidement et, surtout, a trouvé l'apprentissage plus aisé.

2.1.4 Conclusion

Le retour kinesthésique a souvent été étudié comme aide à l'apprentissage d'une tâche motrice. Si le guidage total aide en rééducation pour réactiver les circuits neu-

ronaux, il apparait parfois peu efficace dans d'autres domaines d'apprentissage car il rend l'aspect de la tâche trop simple ce qui cause une perte d'attention des sujets. De plus, il a été noté que pour s'améliorer lors d'un apprentissage les élèves doivent de préférence commettre des erreurs pour ensuite se corriger, en comprenant mieux la tâche et en développant ainsi des stratégies. Au vu des résultats de [57], le guidage total semble surtout pouvoir être utile en tout début d'apprentissage notamment pour mieux expliquer la tâche aux élèves.

En revanche, le guidage correctif améliore l'aspect temporel d'une tâche et la fluidité des mouvements [57]. Couplé à un retour visuel (comme ce peut-être le cas en chirurgie laparoscopique où la scène opératoire est en permanence disponible) la performance est encore meilleure car la précision s'améliore également [63].

Le guidage par augmentation d'erreur a fait ses preuves dans certains domaines d'apprentissage (sport et rééducation). Le fait de provoquer une erreur contraint le sujet à être plus actif dans la réalisation de la tâche et cela le pousse à faire preuve d'exigence. Cependant, ce type de guidage ne peut s'appliquer en tout début d'apprentissage car les sujets doivent déjà connaître la tâche pour que celui-ci soit efficace.

Nous avons développé une expérience consistant en un entrainement intensif d'une tâche simple de laparoscopie où un groupe de référence est comparé à un groupe ayant à disposition un guidage kinesthésique correctif.

La population que nous avons recrutée pour l'expérience suivante est totalement novice dans le domaine de la chirurgie laparoscopique. C'est pour cette raison que nous avons, dans un premier temps, choisi d'explorer les potentialités du guidage correctif pour l'apprentissage d'une tâche de laparoscopie plutôt que le guidage par augmentation d'erreur. L'expérience est développée dans la section suivante.

2.2 Expérience sur le retour kinesthésique pour l'apprentissage d'une trajectoire

Le but de cette expérience est d'explorer l'impact d'un retour kinesthésique correctif sur l'apprentissage d'un suivi de trajectoire 2D avec la pointe d'un instrument de laparoscopie. Il est demandé aux sujets d'être le plus précis possible.

Pour cela, certains sujets ont à disposition un retour kinesthésique qui vient corriger, en temps réel, la position de la pointe de l'instrument lorsque celle-ci dévie de la trajectoire cible. Les sujets sont comparés à un groupe de référence qui ne reçoit aucune aide lors de l'apprentissage.

2.2.1 Matériels et Méthode

Sujets

15 sujets novices en chirurgie laparoscopique ont participé à l'expérience : 9 hommes et 6 femmes, entre 22 et 24 ans, tous droitiers. Les sujets ont été divisés en 2 groupes : 8 sujets dans le groupe contrôle (GC) et 7 sujets dans le groupe avec retour kinesthésique (GK).

Les sujets ont été recrutés dans l'enceinte du laboratoire et n'avaient aucune connaissance en laparoscopie.

Tâche

Les sujets ont eu 4 séances d'entrainement de 20 minutes pour apprendre à suivre une trajectoire en forme de 8 (2 cercles de 3cm de rayon) dans un plan 2D (Figure 2.4b). Le suivi se faisait avec la pointe d'un instrument de laparoscopie tenu par la main droite.

La trajectoire à réaliser n'est pas matérialisée sur l'image endoscopique. Seuls le point d'intersection et les centres des 2 cercles sont affichés (Figure 2.4a).

Nous avons voulu privilégier une tâche à caractère cinématique et non manipulatoire afin de nous focaliser sur la maîtrise de la seule coordination motrice et non d'une technique particulière.

De plus, cette trajectoire plane présente un degré de difficulté intermédiaire entre les gestes élémentaires défini par [68] (atteindre, orienter, attraper, tenir et tirer) et une trajectoire 6D, à l'image, par exemple, d'une découpe courbe sur la surface d'un tissu [29].

Nous avons préféré aussi ne pas afficher la trajectoire cible sur l'écran afin de minimiser les effets du retour visuel sur l'apprentissage d'une tâche.

Les sujets réalisant cette tâche simple en conditions laparoscopiques voient leurs gestes altérés par toutes les difficultés de la manipulation d'outil en laparoscopie : perception de profondeur (image 2D et plan de la trajectoire vu en perspective), coordination main-oeil (mouvements dans différentes directions de l'espace), intégration de la longueur de l'instrument, inversion et amplification des mouvements (effet "bras de levier" variable au cours du geste).

Set-up expérimental

Matériel

Les étudiant(e)s se sont entrainé(e)s sur un pelvi-trainer (Szabo-Berci-Sackier Laparoscopic trainer Karl Storz). Une caméra endoscopique permettait d'enregistrer la scène opératoire qui était ensuite projetée sur un écran face au sujet (Figure 2.3).

Le suivi de trajectoire se faisait avec la pointe d'une pince de laparoscopie tenue dans la main droite des sujets. Nous avons bloqué l'ouverture de la pince afin d'éviter tout problème de calibration.

Des marqueurs passifs étaient placés sur la poignée de l'instrument dont la position était traquée par un système optique de détection de position, NDI Polaris^{TM}.

La déviation par rapport à la trajectoire cible et le temps associé à cette déviation sont collectés à une fréquence de 30Hz.

Méthode de calibration

La matrice de transformation entre la poignée et la pointe de l'instrument est identifiée en amont de l'expérience. Pour ce faire, la pointe de l'instrument est fixée en

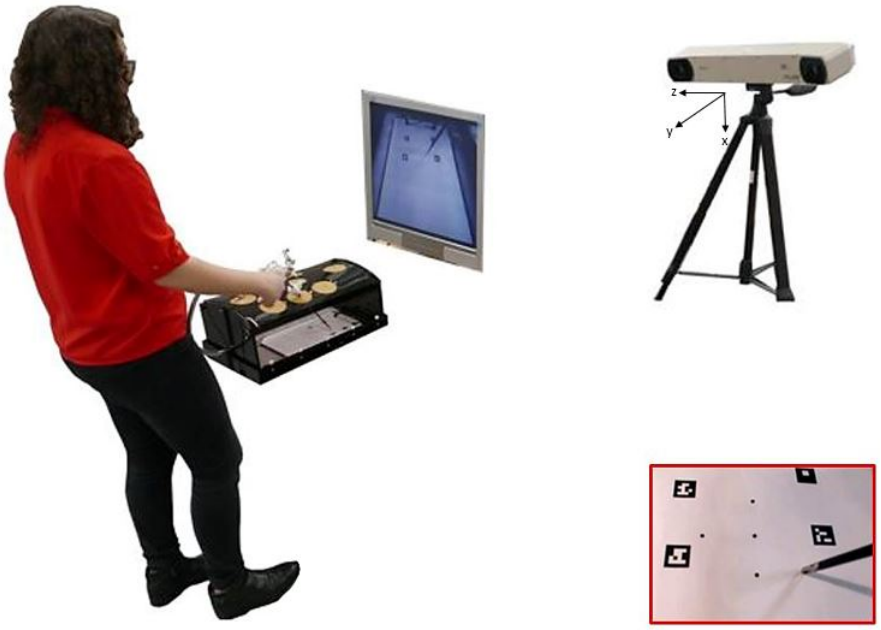

FIGURE 2.3 – *Setup d'entrainement avec un gros plan de l'image endoscopique de la scène opératoire vue par le sujet en bas à droite de l'image.*

un point et avec la poignée nous parcourons une sphère dont le centre est la pointe de l'instrument et le rayon la longueur de l'instrument.

La méthode des moindres carrés est ensuite appliquée sur la base du relevé des positions appariées de la pointe et du motif de marqueurs à la poignée.

La trajectoire cible est, elle, définie en amont de chaque séance à l'aide du système optique de détection de position, NDI Polaris^{TM}. Le pointage des deux centres et du point d'intersection des deux cercles permet de définir la trajectoire à suivre. Un quatrième point sur la gauche, aligné avec le point d'intersection, permet de définir la droite tangente aux deux cercles.

Visualisation de la trajectoire cible

Le retour visuel n'était pas disponible pendant les essais des sujets. Il était seulement projeté au début de chaque séance pour rappeler au sujet la trajectoire à réaliser.

L'incrustation à l'écran de la trajectoire cible se fait grâce à la détection de caractéristiques visuelles (centres de 4 AR codes) dans l'image endoscopique (Figure 2.4b).

Retours d'information à l'apprenant

1. *Retour non-instantané*

   Pour chaque groupe, le score de la performance est affiché sur l'écran après chaque essai (Figure 2.5). Le temps total, l'amplitude de déviation, la déviation cumulée ainsi que la trajectoire réalisée sont affichés pour permettre aux sujets de voir leur amélioration au cours de l'apprentissage mais également leur permettre de voir où ils/elles peuvent s'améliorer par la suite.

2. *Retour instantané*

   Un guidage kinesthésique fait par un bras manipulateur, Haption Virtuose 3D^{TM}, a été implémenté pour corriger la position de la pointe de l'instrument lorsque celle-ci dévie de la trajectoire cible avec une zone d'acceptation de +/- 2mm (Figure 2.4c). La force de rappel fonctionne comme un ressort virtuel entre la pointe de l'instrument et la trajectoire :

   $$\overrightarrow{F} = k.d.\overrightarrow{u}$$

   Où d correspond à la déviation de la pointe de l'instrument par rapport au point le plus proche de la trajectoire cible, $\overrightarrow{u}$ est le vecteur directeur entre la pointe de l'instrument et le centre du cercle courant, et k=250 N.m^{-1} est le coefficient de raideur. Nous avons choisie un coefficient de raideur faible pour que les sujets restent maîtres de leurs mouvements. Celui-ci a été fixé empiriquement, nous l'avons augmenté jusqu'à ce qu'une force de rappel soit perçue et qu'aucune instabilité n'apparaisse.

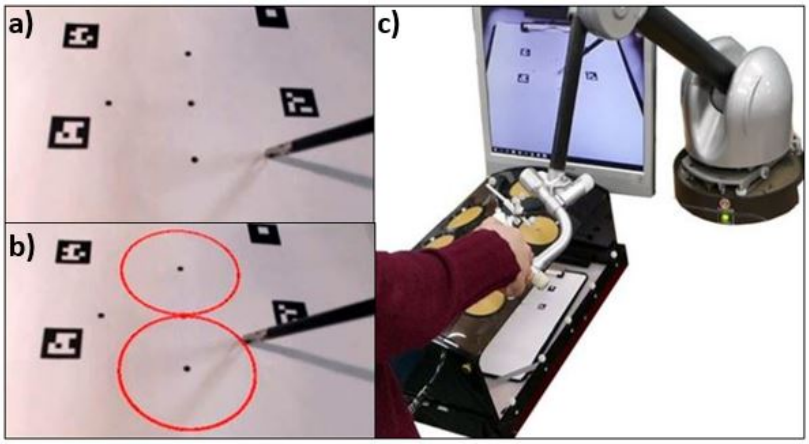

Figure 2.4 – *a) image endoscopique ; b) trajectoire à apprendre ; c) groupe kinesthésique.*

Protocole

Les 15 sujets ont suivi un entrainement intensif consistant en 4 séances de 20 minutes réparties sur 2 jours.

Chaque séance commençait par un entrainement d'environ 1 minute où la trajectoire était projetée sur l'écran (Figure 2.4b). Les sujets réalisaient ensuite un essai sans retour sensoriel (*baseline*). Puis le groupe GK réalisait 8 essais avec le retour kinesthésique alors que le groupe GC faisait 8 essais sans aide. Enfin, tous les élèves réalisaient un dernier essai sans retour sensoriel (*learning*).

A chaque séance, ils/elles réalisaient 10 suivis de trajectoire en commençant avec la pointe de l'instrument sur le point d'intersection des deux cercles.

Comme précisé précédemment, le score de la performance et la trajectoire réalisée étaient donnés aux sujets à la fin de chaque essai (Figure 2.5).

La déviation correspond à la distance entre le point projeté de la pointe de l'instrument sur le plan de la figure et le point de la trajectoire ciblée au plus proche à l'instant t. Cette déviation peut être négative si la pointe de l'instrument est à l'intérieur du cercle parcouru, $Déviation_{Int}$, ou positive si la pointe est à l'extérieur de la trajectoire, $Déviation_{Ext}$. Les déviations comprises entre -2mm et +2mm ne sont pas considérées dans le calcul de l'amplitude de déviation et de la déviation cumulée.

La performance a été évaluée sur :

— le temps total (s) : le chronomètre démarre lorsque le sujet initie le mouvement pour réaliser la trajectoire et s'arrête lorsque la pointe est revenue à sa position initiale (point d'intersection des 2 cercles),

— l'amplitude maximale de déviation (mm) :

$$AD = max|Déviation_{Int}| + max(Déviation_{Ext}),$$

— la déviation cumulée (mm),

$$DC = \sum_{t=0}^{t_{max}} |déviations|,$$

— l'activité corrective : nombre de mouvements (nombre de fois où la dérivée de la déviation s'annule).

A la fin de chaque séance les étudiants répondaient au questionnaire suivant :

1. Est-ce que le retour sensoriel vous a aidé ?
2. Est-ce que le retour sensoriel vous a dérangé ?
3. Avez-vous l'impression de vous être améliorés au cours de la séance ?

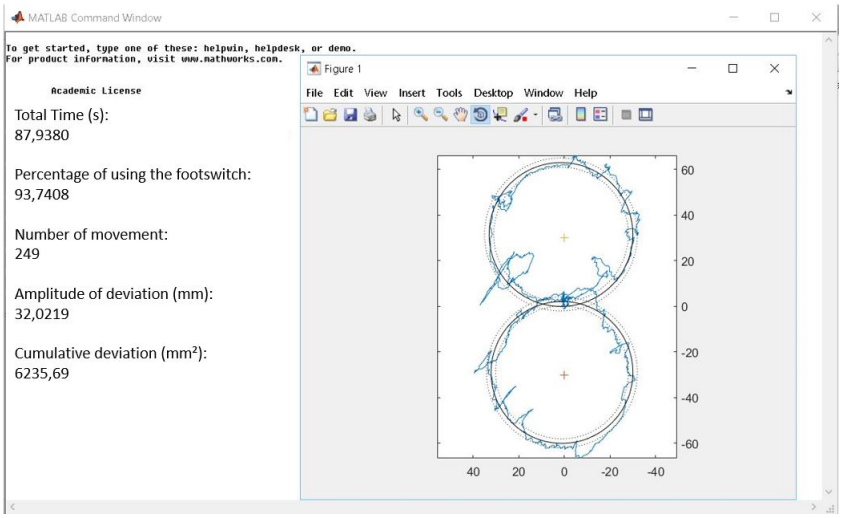

FIGURE 2.5 – *Fenêtre matlab avec les critères de performance, ainsi que la trajectoire réalisée par le sujet (bleu), la trajectoire cible (noire) et la zone d'acceptation (lignes pointillées).*

2.2.2 Résultats

Les courbes d'apprentissage se basent sur les essais sans retour sensoriel, c'est-à-dire les premier et dernier essais de chaque séance. Le premier point des courbes correspond au tout premier essai des sujets et le dernier point au tout dernier essai. Les points intermédiaires sont la moyenne entre le dernier essai d'une séance (*learning*) et le premier essai de la séance suivante (*baseline*).

Un test Wilcoxon a été réalisé pour comparer la population de chaque groupe et évaluer leur homogénéité (avec un seuil de significativité de p=0.05). Le test a révélé que les populations étaient équivalentes en précision (AD et CD combinées). Ceci nous a permis de normaliser les courbes d'apprentissages par la moyenne du groupe sur les premiers essais des sujets appartenant à ce groupe.

Une étude *one-way ANOVA* a été réalisée pour évaluer si l'apprentissage des groupes (taux d'amélioration) était statistiquement significatif. Des tests Wilcoxon ont également été effectués pour révéler des différences significatives entre les groupes.

Retour sensoriel

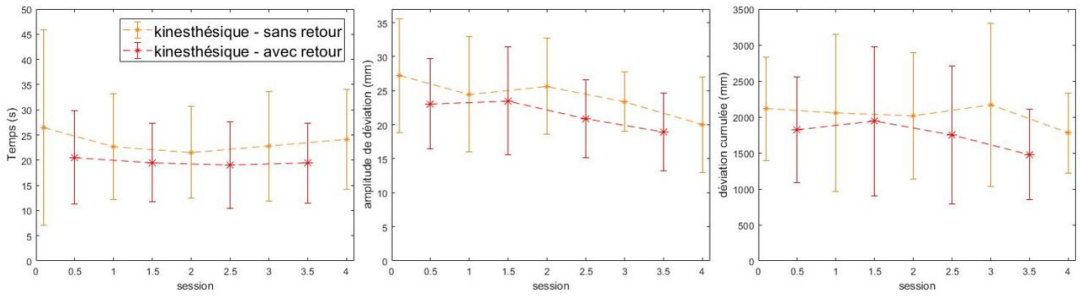

FIGURE 2.6 – *Comparaison des essais avec et sans retour kinesthésique pour le groupe GK. a) Temps (s) ; b) Amplitude de déviation (mm) ; c) Déviation cumulée (mm)*

Nous pouvons constater sur la Figure 2.6 l'influence positive du retour robotique sur les performances des sujets. En effet, l'ajout du retour kinesthésique n'allonge pas le temps total de performance (Figure 2.6a). Au contraire, il a tendance à l'accélérer car le temps total de performance est plus faible lorsque le retour est présent. De même pour la précision, l'ajout du retour kinesthésique rend les gestes des sujets plus précis. L'amplitude de déviation et la déviation cumulée sont plus petites que celles des essais sans retour (Figure 2.6b et 2.6c).

Grâce au calcul du nombre de mouvements réalisés par essai nous pouvons remarquer que le groupe kinesthésique fait beaucoup moins de gestes correctifs que le groupe de contrôle (Figure 2.7). En effet, par essai, le groupe GK fait en moyenne 165 mouvements et le groupe GC 207. Cette différence entre les 2 groupes est, de plus, significative ($p<0.01$, test de Wilcoxon).

La figure 2.8 présente l'aspect des trajectoires obtenues avec et sans retour kinesthésique. Cette comparaison nous montre une trajectoire beaucoup plus lisse pour le groupe GK (Figure 2.8b) que pour le groupe GC (Figure 2.8a).

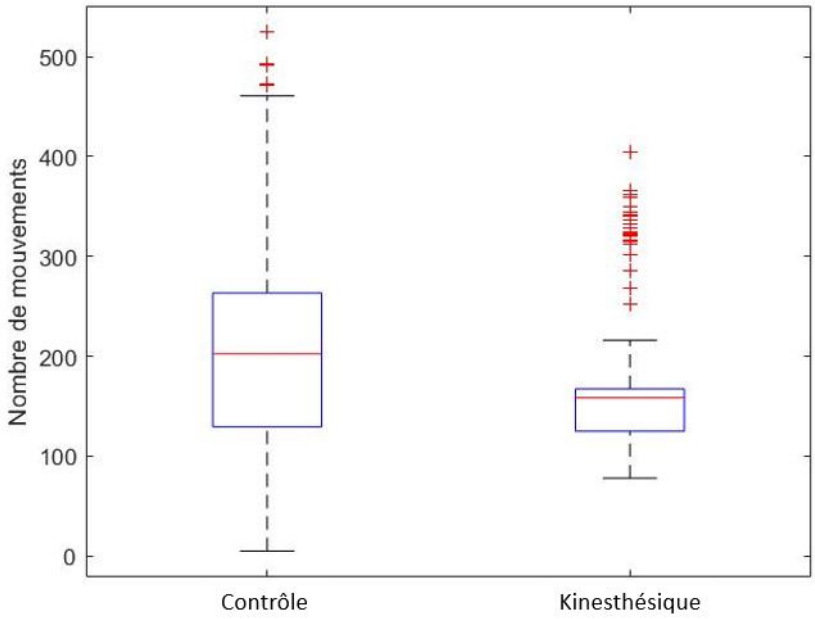

FIGURE 2.7 – *Nombres de mouvements*

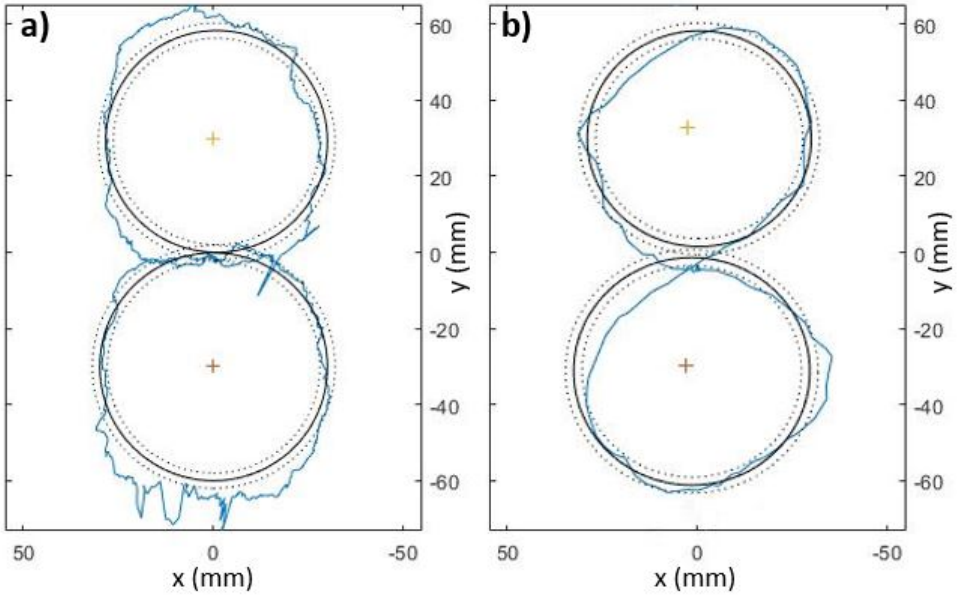

FIGURE 2.8 – *Exemple de trajectoire réalisée - a) groupe de contrôle (sans retour) ; b) groupe kinesthésique (retour robot).*

Tableau 2.1 – *One-way ANOVAs sur temps total de réalisation de la tâche, amplitude de déviation et déviation cumulée au cours de l'apprentissage.*

groupes	**Contrôle**			**Kinesthésique**		
	moyenne(dev std)		p-value	moyenne(dev std))		p-value
	baseline	learning		baseline	learning	
Temps (s)	26.4(11.5)	49.5(16.8)	0.1409	26.4(19.4)	24.1(9.91)	0.9590
AD (mm)	17.7(5.1)	13.0(3.7)	0.1642	27.2(8.31)	20.0(7.01)	0.4298
DC (mm)	1935(685)	2390(1484)	0.8904	2112(723.7)	1777(558.8)	0.9394

Temps total d'exécution

Aucune instruction n'avait été donnée sur le temps d'éxécution. Il était seulement demandé d'être le plus précis possible.

Au cours de cet apprentissage, les deux groupes, contrôle et kinesthésique, ont évolué différement en temps (Figure 2.9). Le groupe GK a légèrement diminué son temps total de réalisation de la tâche en fin d'apprentissage alors que le groupe GC n'a cessé de l'augmenter (Tableau 2.1).

Ces résultats sont observés en regardant le taux d'évolution de chaque groupe, c'est-à-dire, le pourcentage d'amélioration (positif) ou de dégradation (négatif) du dernier essai par rapport au premier (Figure 2.12a). Le groupe contrôle a fortement dégradé son temps total de réalisation de la tâche (-88% , p=0.1409 de ANOVA) alors que le groupe kinesthésique l'a amélioré (+8.6%, p=0.9590 de ANOVA).

Précision

Les deux groupes ont amélioré leur amplitude de déviation au cours de l'apprentissage (Figure 2.10). Les 2 courbes sont proches l'une de l'autre mais le groupe GC reste sensiblement plus précis que le groupe GK tout au long de l'apprentissage.

En regardant les taux d'amélioration, nous pouvons remarquer que les 2 groupes ont amélioré leur performance de façon similaire (+26%) (Figure 1.12b). Ces améliorations ne sont pas statistiquement significatives (p=0.1642 pour GC et p=0.4298 pour GK, ANOVA) (Tableau 2.1).

L'évolution de la déviation cumulée présente les mêmes tendances à celle du temps (Figure 2.11). En regardant le taux d'amélioration (Figure 2.12c) nous pouvons voir que le groupe GC a détérioré sa déviation cumulée de 23% alors que le groupe GK l'a amélioré de 15%. Ces évolutions ne sont pas statistiquement significatives. Dans les deux cas les changements étaient assez faibles au vue des résultats obtenus avec l'étude ANOVA (p=0.8904 pour GC et p=0.9394 pour GK) (Tableau 2.1).

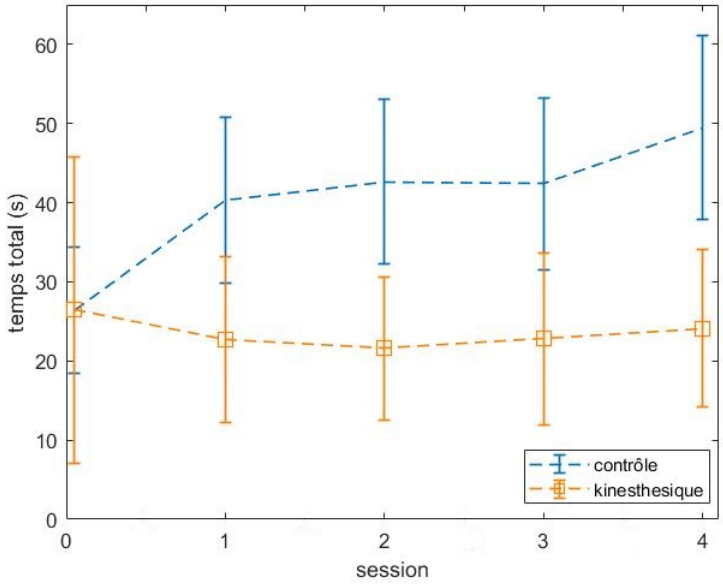

FIGURE 2.9 – *Temps total d'exécution de la tâche*

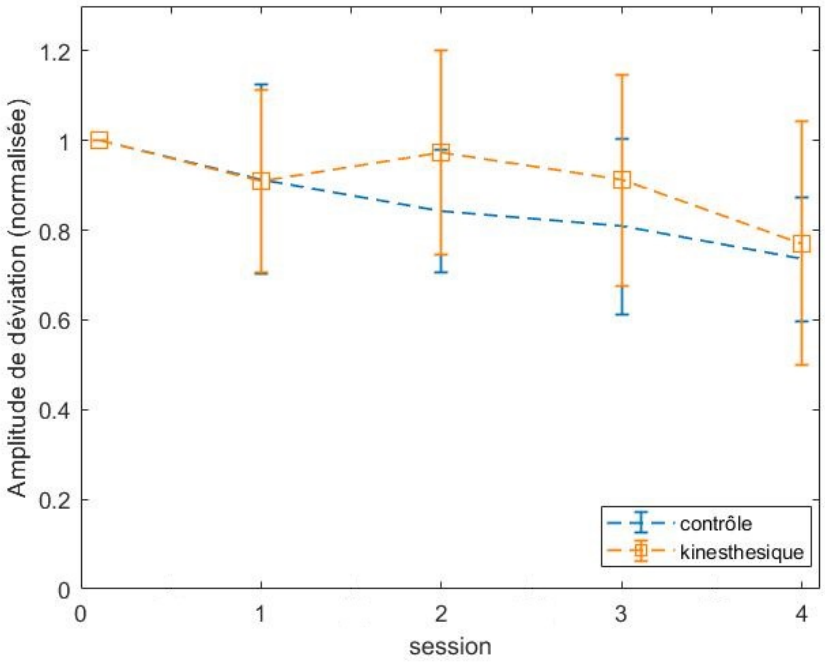

FIGURE 2.10 – *Amplitude de déviation*

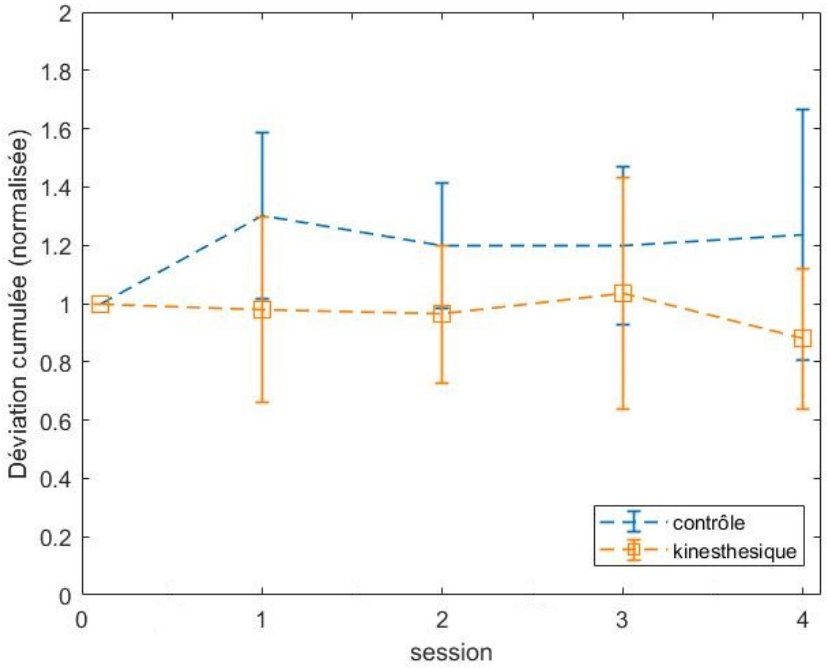

Figure 2.11 – *Déviation cumulée*

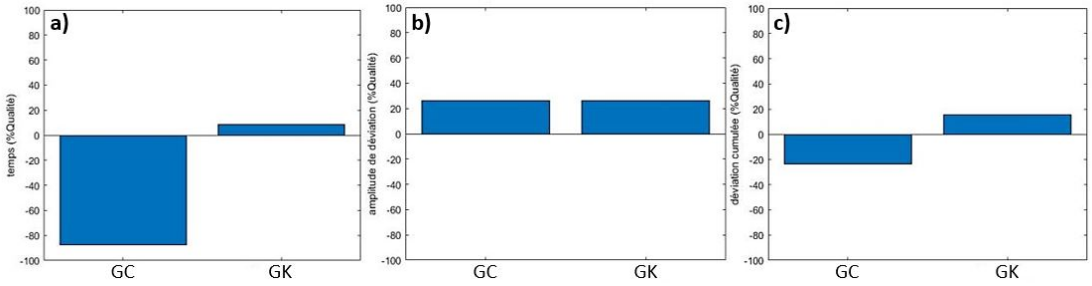

Figure 2.12 – *Taux d'amélioration - a) Temps ; b) Amplitude de déviation ; c) Déviation cumulée.*

Fluidité du mouvement

Le nombre de mouvements sur les premiers et derniers essais de chaque séance (essais sans retour kinesthésique), nous donne l'évolution de la fluidité des gestes des sujets pendant l'apprentissage (Figure 2.13). Pour une meilleure observation des différences entre les groupes, nous avons choisi de normaliser les essais par le tout premier essai de chaque sujet, les populations étant homogènes en début d'entrainement (p=0.7789, test de Wilcoxon).

En fin d'apprentissage, le groupe GK réalise des gestes plus fluides que le groupe de référence et la dispersion des sujets est beaucoup moins importante (Figure 2.13b). En revanche, ces différences entre les groupes ne sont pas significatives (p=0.4499, Wilcoxon test).

Notons que le groupe de contrôle augmente de 14% son nombre de mouvements au cours de l'apprentissage alors que le groupe kinesthésique garde quasiment la même fluidité.

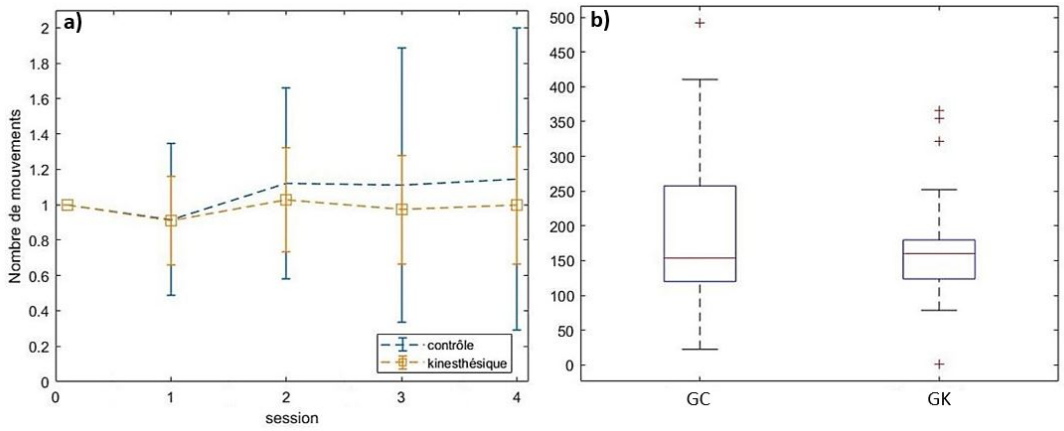

FIGURE 2.13 – *Fluidité des mouvements - a) courbe d'apprentissage normalisée du nombre du mouvements par essais sur les essais sans retour ; b) moyenne du nombre de mouvements sur les essais sans retours (premier et dernier essais de chaque séance).*

Questionnaire

La tâche n'a pas été perçue comme difficile par les sujets. En revanche, même si le retour kinesthésique n'a pas particulièrement perturbé la réalisation de la tâche, les participants n'ont pas eu l'impression d'être réellement assistés pendant l'apprentissage. Ils/elles se sont senti(e)s très dépendant(e)s du retour et n'ont pas eu l'impression de réellement retenir le mouvement qu'ils/elles devaient effectuer. Cependant, les sujets avaient quand même l'impression de faire des mouvements plus fluides et plus rapides lorsque le retour était disponible. Ils/elles se sont montré(e)s aussi plutôt confiants quant à leur amélioration.

Le retour n'a pas été exactement accepté de la même manière. Certains sujets se sont plus appuyés sur ce qu'ils/elles voyaient sur l'image plutôt que sur ce qu'ils/elles ressentaient articulairement alors que d'autres ont trouvé que l'aide robotique permet-

tait, justement, une meilleure connexion entre ce qu'ils/elles voyaient et ce qu'ils/elles faisaient comme mouvement au niveau du bras.

2.2.3 Discussion

Lors de cet apprentissage, le groupe kinesthésique a légèrement amélioré son temps de réalisation de la tâche contrairement au groupe de référence qui n'a cessé de l'augmenter, résultat également noté dans [69]. Ceci est un avantage du retour kinesthésique si on considère qu'une bonne performance en laparoscopie doit être aussi rapide que précise.

En revanche, les résultats sur la précision du geste sont plus mitigés. L'amplitude de déviation et la pente d'apprentissage du groupe GK restent équivalentes à celles du groupe de référence en fin d'entrainement. La déviation cumulée, en revanche, est nettement plus faible que celle du groupe de contrôle, avec une légère amélioration au cours de l'entrainement.

Il faut noter aussi que le retour kinesthésique favorise des mouvements plus fluides comparés au groupe de contrôle. En effet, le nombre de mouvements sur les essais sans retours et la dispersion entre les sujets du groupe GK sont plus faibles que ceux du groupe GC. Ce sont des résultats déjà observés dans [57] et [64].

Une autre différence importante à relever entre les deux groupes est la faible activité corrective du groupe GK dans les essais avec retour kinesthésique, reflétée par le faible nombre de mouvements par essai (Figure 2.7 et 2.8). Cette observation est en cohérence avec les résultats observés dans [69] où les chercheurs ont montré que le retour kinesthésique permettait un guidage intuitif et efficace.

En résumé, nous observons que :

1. L'assistance par retour kinesthésique, telle que implémentée ici, est efficace vu les performances en précision et la faible activité corrective générée lors des essais avec cette assistance.
2. En terme de résultats d'apprentissage, le retour kinesthésique n'améliore pas les performances par rapport à un apprentissage sans retour mais conduit seulement à une plus grande économie de temps et de geste une fois les sujets formés.

En rapprochant ces résultats de la littérature décrivant l'impact de l'assistance kinésthésique sur l'apprentissage du geste [63][69], nous pouvons formuler l'hypothèse que l'assistance kinésthésique implémentée ici est utilisée à la manière d'un guidage total autant que comme un retour correctif. Il semble que le sujet a tendance à se laisser guider par le robot dans une attitude plutôt passive (concrètement le sujet a tendance à s'appuyer sur le mur virtuel créé par le retour d'effort en bordure de zone d'acceptation, +/- 2mm autour de la trajectoire cible, et à glisser le long de ce mur). Ceci s'observe sur la figure 2.8 où la trajectoire réalisée par le groupe GK est nettement plus lisse que celle réalisée par le groupe GC. L'apprentissage se fait alors davantage sur le mode de la mémorisation kinesthésique d'un geste fluide exécuté à répétition.

2.3 Conclusion

Nous avons voulu, dans ce chapitre, étudier les avantages que pouvait avoir un retour kinesthésique dans l'apprentissage de la chirurgie laparoscopique. L'utilisation d'un bras robotique comme enseignant virtuel a déjà beaucoup été étudiée dans d'autres domaines d'apprentissage (sport, écriture, etc.). Il en ressort de nombreux avantages : possibilité de répéter le mouvement à volonté, bonne mémoire articulaire sur le long terme, amélioration de l'apprentissage dans le temps et progrès dans la fluidité des gestes.

Cependant, la forme du guidage durant un apprentissage peut détériorer la performance car, si les sujets sont trop guidés, leur attention diminue, et ils/elles vont retenir très peu les mouvements qu'ils/elles ont réalisés.

C'est dans une large mesure ce que nous avons observé lors de l'expérience que nous avons appliquée sur 15 sujets. Nous avons choisi l'apprentissage d'un suivi de trajectoire et le guidage kinesthésique consistait à corriger la position de la pointe de l'instrument lorsque celle-ci déviait de la trajectoire cible par une force de type ressort virtuel entre la pointe de l'instrument et la trajectoire cible. Même si, comme dans la littérature, nous avons observé que le guidage kinesthésique permettait d'améliorer la vitesse d'exécution de la tâche et la fluidité des mouvements, la précision s'est très peu améliorée au cours de l'entrainement, notamment l'amplitude de déviation, en comparaison du groupe de référence.

Si nous retenons l'hypothèse que le guidage implémenté ici a contribué à rendre les sujets trop dépendants et passifs, nous pourrions alors développer un retour haptique qui évolue en cours de l'entrainement [70][71]. Le coefficient de raideur pourrait, par exemple, évoluer pour que l'aide soit de moins en moins forte. De même, l'action corrective pourrait prendre la forme d'une force impulsionnelle plutôt qu'une force ressort afin que l'élève soit moins assisté(e) dans ses gestes.

Il est difficile cependant de définir à quel moment le guidage doit changer. En rééducation, Proietti et al. [72] ont défini un contrôleur qui adapte la raideur du bras exosquelletique à l'activité motrice du patient de façon automatique et continue. Cette méthode permet d'accroître l'implication du sujet dans l'apprentissage de la tâche.

Le guidage par amplification d'erreur pourrait aussi être une solution afin d'améliorer l'apprentissage comme cela a déjà pu être observé [66]. Une fois que le sujet a compris la tâche à l'aide d'un guidage correctif, nous pourrions envisager d'apporter des forces perturbatrices à la pointe de l'instrument pour dévier sa position. L'étudiant(e) serait alors contraint(e) de corriger le mouvement et ainsi d'être plus actif et plus attentif dans la réalisation de la tâche.

Une alternative serait d'utiliser d'autres canaux sensoriels au travers de retours de types visuel et vibro-tactile. Ces retours donneraient une indication de déviation aux sujets mais, ne produisant pas d'action correctrice par eux-mêmes, ce sont les sujets qui seraient amenés à corriger activement la position de la pointe de l'instrument. Nous aurions ici aussi des sujets plus actifs et plus attentifs lors de la réalisation de la tâche.

Les retours multi-sensoriels, par ailleurs moins coûteux et moins encombrants qu'un bras robotisé, nous ont paru être une possibilité intéressante pour améliorer l'apprentissage de la chirurgie laparoscopique. C'est cette solution que nous avons choisie d'explorer dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Guidage sensoriel pour l'aide à l'apprentissage

Comme vu au chapitre précédent, pour s'améliorer lors de l'apprentissage d'une tâche, l'étudiant(e) doit, de préférence, corriger activement ses erreurs.

Ainsi, nous avons décidé d'étudier ici l'ajout de retours sensoriels, de type visuel et tactile, au setup expérimental. Les informations sensorielles permettront à l'élève de percevoir qu'il/elle est en train de commettre une erreur et ainsi de pouvoir se corriger en temps réel. Il/elle sera alors plus actif dans sa correction et possiblement plus efficace dans son apprentissage.

Après un état de l'art sur l'utilisation des retours visuels et tactiles dans différents domaines d'apprentissage dont celui de la chirurgie laparoscopique, nous exposerons deux expériences que nous avons réalisées sur cette problématique.

3.1 Etat de l'art sur l'utilisation de retours multi-sensoriels dans l'apprentissage

Les retours visuels et/ou tactiles sont de plus en plus utilisés en apprentissage car ils permettent une évaluation quantitative de la performance des sujets en temps réel. Ceux-ci sont capables de se corriger instantanément et les enseignants ou thérapeutes peuvent par conséquent donner des conseils plus précis.

Après un état de l'art sur l'usage de retours visuels et/ou tactiles dans certains protocoles d'entrainement dans les domaines de la rééducation, du sports et de la musique, nous présenterons les aides sensorielles qui ont déjà été apportées à un entrainement en laparoscopie.

3.1.1 Rééducation

Dans [73], un retour vibratoire a été utilisé pour améliorer la posture de patients ayant des problèmes de perte « vestibulaire » lors de pertubations multidirectionnelles. Une bande de vibreurs de 3 lignes (amplitude de balancement) et 16 colonnes (direction du balancement) était fixée au dos des patients. Ils ont remarqué une diminution du

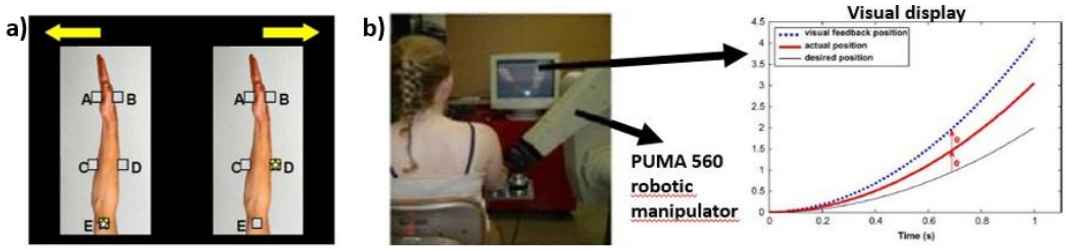

FIGURE 3.1 – *a) A, B, C, D et E sont les positions des moteurs vibrants. Un exemple d'instruction vibro-tactile donné au sujet : vibration sur E pour une rotation du poignet du sujet vers la gauche et vibration sur D pour une rotation du poignet sur la droite [75] ; b) Le bras droit des patients est tenu par un bras robotique. Sur l'écran est projeté la trajectoire cible (courbe noire) et la trajectoire de l'end-effector affectée de l'erreur visuelle (ligne poitillée) [76].*

balancement du tronc pour les sujets ayant suivi une rééducation avec les retours vibratoires.

Dans[74], un guidage vibrotacile sous forme de moteurs vibrants positionnés aux articulations (poignet, coude et épaule) a été développé pour que des patients apraxiques retrouvent la mobilité de leurs bras. Les études précédentes favorisaient l'utilisation de retours visuels sous forme principalement de réalité virtuelle mais leur interprétation était parfois difficile. Les résultats préliminaires obtenus ont montré un avantage pour le retour vibro-tactile comparé au retour visuel.

Dans [75], des stimuli vibro-tactiles initient des mouvements du bras, notamment la rotation du poignet (Figure 3.1a). Le but était d'enseigner à des patients la coordination du bras nécessaire pour faire un mouvement spécifique. La stimulation vibro-tactile a donné des résultats positifs en temps de réponse au stimuli, notamment lorsque le vibreur était présent du même côté que la direction de déplacement de la main.

Dans [76], les chercheurs ont étudié les bénéfices de l'augmentation de l'erreur visuelle lors d'une rééducation assistée par robot (Figure 3.1b). Ils ont découvert qu'en fin d'apprentissage, lorsque l'amplification d'erreur avait été présente, les patients avaient moins besoin de l'assistance robotique et les erreurs en position avaient diminué. Les auteurs ont alors fait l'hypothèse que l'augmentation de l'erreur en position permet de maintenir l'attention et d'obtenir une réponse plus rapide des patients car la tâche est mieux traitée cognitivement.

Ainsi, les deux types de retours (visuel et tactile) semblent aider l'apprentissage de tâches motrices soit en indiquant l'erreur au patient soit en lui indiquant le mouvement à réaliser.

3.1.2 Musique

En musique, tout comme en chirurgie, il est difficile pour l'enseignant de corriger toutes les erreurs faites par l'élève car celles-ci sont d'origines multiples : une mauvaise posture, une mauvaise utilisation des instruments, etc. L'analyse automatique de mouvements peut alors être utilisée pour traiter en ligne les gestes des élèves et, ainsi, ajouter des retours sensoriels pour apporter une correction en temps réel sur la

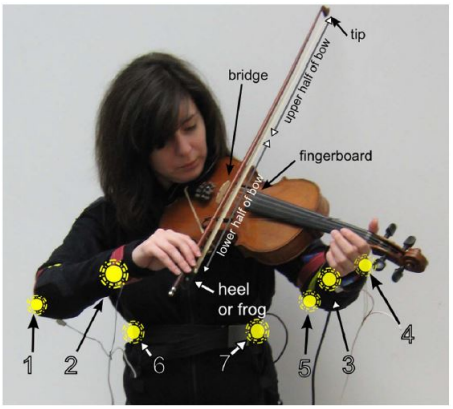

FIGURE 3.2 – *Music-Jacket : Les points jaunes sont les moteurs vibrants positionnés aux articulations [77]*

performance.

Dans [77] par exemple, les résultats obtenus avec deux groupes d'étudiants apprenant le violon ont été comparés : apprentissage standard et apprentissage utilisant la *music jacket* (Figure 3.2). Cette veste comporte un système de capture de mouvement inertiel afin d'analyser la posture de l'élève et les gestes de son archet. Des moteurs vibrants sont placés sur ses bras et son torse pour indiquer d'éventuelles erreurs. En cas de mauvaises postures ou d'erreurs dans l'utilisation de l'archet, selon la localisation de la faute, un des vibreurs se met à fonctionner.

Le groupe équipé du retour tactile a montré une meilleure coordination du bras tenant l'archet. Les élèves continuaient de s'améliorer même lorsque le retour avait été coupé. Le retour tactile était très vite assimilé et utilisé de façon optimale par l'élève.

Sport

Dans le domaine du sport, le guidage vibro-tactile a été étudié en particulier pour corriger la posture des sportifs. Dans [78] par exemple, le guidage tactile était testé comme alternative au guidage auditif pour l'apprentissage du snowboard (Figure 3.3a). Sur un simulateur de snowboard, les élèves se sont entrainés avec un guidage tactile ou auditif pour aider à corriger leur posture. Au final, ils/elles percevaient et comprenaient l'information vibro-tactile aussi vite que dans le cas de l'auditif. En revanche, le groupe tactile avait un temps de réponse plus rapide aux indications que le groupe auditif.

Dans [79], l'utilisation d'une ceinture vibro-tactile a été utilisée pour guider les joueurs sur le terrain de football. Les vibrations indiquaient où regarder et où bouger, informations que l'entraineur a des difficultés à communiquer de manière efficace (Figure 3.3b). Encore une fois, le guidage vibro-tactile permettait une réponse plus rapide des joueurs et les informations communiquées ainsi étaient aussi bien comprises par les joueurs que les informations auditives données par l'entraineur sportif.

Dans [80], deux moteurs vibrants étaient placés sur chaque poignet de sujets apprenant la valse. Le but était d'indiquer à quel moment précisément le bras devait se mouvoir dans la mélodie. A la fin de l'apprentissage, le groupe tactile est celui qui était

FIGURE 3.3 – *a) Simulateur de snowboard. Les sujets sont équipés de capteurs optiques pour évaluer leur posture et de moteurs vibrants pour leur indiquer leurs erreurs [78] ; b) ceinture vibro-tactile pour guider les joueurs sur le terrain [79] ; c) amélioration de la séquence de ramage en aviron, dans le cadre jaune se trouve le guidage vibro-tactile et dans le cadre rouge le retour visuel [81].*

le plus en concordance avec la musique.

En aviron, le guidage tactile a également été étudié pour améliorer la séquence de ramage [81] (Figure 3.3c). Six participants se sont entrainés sur un simulateur d'aviron et avaient à disposition soit un retour visuel qui indiquait la position de la main droite et le mouvement qu'elle devait faire, soit un retour vibro-tactile sur le poignet, le coude et le majeur du bras droit pour indiquer une erreur dans le mouvement et la position de la main (trop haute, trop près du corps, etc.), ou bien encore les deux retours combinés. Les auteurs sont arrivés à la conclusion que la combinaison des deux retours était bénéfique à l'apprentissage de l'aviron et donnait les meilleurs résultats. La présence du retour tactile permettait de surcroît un temps total d'exécution plus rapide.

3.1.3 Apprentissage chirurgie laparoscopique

Le guidage tactile n'a pas encore été étudié dans l'apprentissage de la chirurgie laparoscopique. Cependant, les résultats positifs de [70] et [82] sur l'utilisation du retour tactile comme aide au geste laparoscopique nous ont confortés dans l'idée d'étudier ce retour pour améliorer le set-up d'entrainement. Il fut observé, en effet, une meilleure précision dans les gestes chirurgicaux et une vitesse d'exécution plus rapide lorsque le retour était donné aux sujets.

En revanche, le retour visuel sous forme de réalité augmentée a déjà fait l'objet de plusieurs études et a montré un réel potentiel d'amélioration dans l'apprentissage de la chirurgie laparoscopique. Il a été montré, notamment, que la réalité augmentée diminuait le temps d'apprentissage, le taux d'erreurs, et accélérait la courbe d'apprentissage. Elle peut améliorer également la précision d'un geste, attirer l'attention des élèves et faciliter la compréhension de l'espace.

Dans [83], par exemple, deux bancs d'entrainement sont utilisés : un pour l'étudiant et un pour le professeur, chacun réalisant un noeud de suture (Figure 3.4a). L'aiguille et la pointe des instruments de l'enseignant sont projetées sur l'écran de l'élève pour renforcer la communication qu'il peut y avoir entre eux. L'utilisation de la plate-forme

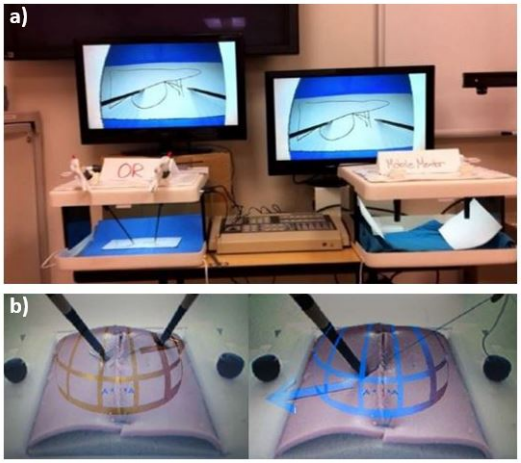

FIGURE 3.4 – *a) deux bancs d'entrainement ont été utilisés : un pour l'étudiant et un pour le professeur, les instruments de l'enseignant peuvent être projetés sur l'écran de l'élève par réalité augmentée [83] ; b) dôme de suture. Lorsque les deux pointes d'instrument sont dans le dôme celui-ci est jaune, si l'une des pointes sort du dôme celui-ci devient bleu. Des flèches indiquent également le sens de tirage du fil [84].*

a montré une accélération dans la courbe d'apprentissage notamment au début de l'entrainement. Avec ce type de dispositif, l'enseignant aide l'élève à mieux réaliser ses gestes mais ne peut évaluer ou corriger l'élève en temps réel car son attention est focalisée sur son propre geste.

Dans [84], les étudiants doivent réaliser ici aussi un nœud de suture. Un dôme virtuel, dans lequel les pointes d'instrument doivent rester cantonnées, est projeté sur l'image endoscopique (Figure 3.4b). Si les instruments restent dans le dôme celui-ci est jaune sinon il devient bleu. Des flèches apparaissent sur l'écran pour indiquer dans quel sens il faut tirer les fils. Elles sont également jaunes si la direction est appropriée, et bleue si ça n'est pas le cas. Le groupe qui utilisait le retour visuel, a eu les meilleures scores aux différents critères de performance qui reflète un apprentissage plus efficace.

3.1.4 Conclusion sur l'état de l'art

Il est apparu dans la littérature que l'apport d'un retour sous forme visuel et/ou tactile pouvait aider à l'apprentissage en rééducation, en sport ou bien encore dans l'apprentissage du violon. En particulier, dans l'apprentissage du geste sportif, le retour tactile a été souvent utilisé pour ses nombreux avantages par rapport au guidage auditif et visuel : temps de réponse plus rapide, amélioration de la posture et meilleure coordination des membres dans le but de réaliser un mouvement précis [80]. Ces résultats sont donc intéressants dans le cadre de l'apprentissage de la laparoscopie où nous retrouvons globalement les mêmes exigences en terme de contrôle moteur. De plus, dans la pratique du geste laparoscopique en tant que tel, les retours visuels et tactiles ont montré un avantage en terme de guidage ainsi que dans l'amélioration du rendu haptique et du traitement de l'information [70][82].

Ces résultats nous confortent dans l'idée d'explorer différents retours sensoriels

pour donner une information de performance en temps réel aux étudiants s'entrainant sur simulateur de laparoscopie. Il faut noter que l'assistance vibro-tacile n'a jamais été testée dans ce contexte et que, d'une manière générale, les retours sensoriels n'ont jamais été testés sans la présence d'un enseignant et pour la réalisation de gestes complexes où le suivi de trajectoire est central.

Nous avons donc réalisé deux études portant sur l'évaluation de i) l'influence des retours visuels et vibro-tactiles sur l'apprentissage d'un suivi de trajectoire 2D en conditions de chirurgie laparoscopique et ii) l'influence du retour vibro-tactile sur l'apprentissage d'une tâche bi-manuelle de laparoscopie (découpe).

3.2 Suivi de trajectoire

La tâche est la même que celle décrite au chapitre 2 à la section 2.2.

3.2.1 Matériels et Méthode

Sujets

24 sujets novices en chirurgie laparoscopique ont participé à l'expérience : 14 hommes et 10 femmes, entre 19 et 35 ans, tous droitiers, n'ayant appris aucun geste de chirurgie laparoscopique. Les sujets ont été divisés en trois groupes : groupe de contrôle (GC), groupe avec un retour visuel (GV) et groupe avec un retour tactile (GT). Les groupes étaient constitués de 8 sujets.

Les sujets ont été, cette fois-ci encore, recrutés dans l'enceinte du laboratoire et étaient tous différents par rapport à l'expérience sur le retour kinesthésique.

Set-up expérimental

La tâche et le set-up expérimental sont les mêmes que ceux de l'expérience développée dans le chapitre 2, section 2.2. Dans le cas présent, nous avons implémenté un retour visuel et un retour tactile. Une pédale était positionnée sous le pied droit des sujets et permettait d'activer le retour visuel ou tactile (Figure 3.5a).

Informations disponibles

1. *Retour non instantané*
   Comme au chapitre 2, pour chaque groupe, les résultats obtenus suivant les différents critères de performance sont affichés sur l'écran après chaque essai (Figure 2.5). Le temps total, l'amplitude de déviation, la déviation cumulée, le nombre de mouvements ainsi que la trajectoire réalisée par l'élève sont affichés pour permettre aux étudiants d'évaluer leur progression au cours de l'apprentissage et comment ils peuvent s'améliorer sur l'essai suivant.
2. *Retours instantanés*
   — **Retour visuel** (GV) : la trajectoire en 8 est projetée sur l'image endoscopique à la demande de l'étudiant par appui sur la pédale (Figure 3.5c). Il/elle peut alors estimer visuellement la déviation instantanée de la pointe de l'instrument par rapport à la trajectoire cible et se corriger ;

— **Retour vibro-tactile** (GT) : un moteur vibrant est placé sur le dessus de l'index de la main gauche (Figure 3.5d). Celui-ci s'active à la demande de l'étudiant via la pédale. Des vibrations continues apparaissent en cas de déviation par rapport à la trajectoire cible, avec une zone morte de +/- 2mm. La fréquence de vibration varie linéairement entre 25Hz et 255Hz, avec une vibration maximale atteinte pour une déviation égale à 1cm par rapport à la trajectoire cible [85].

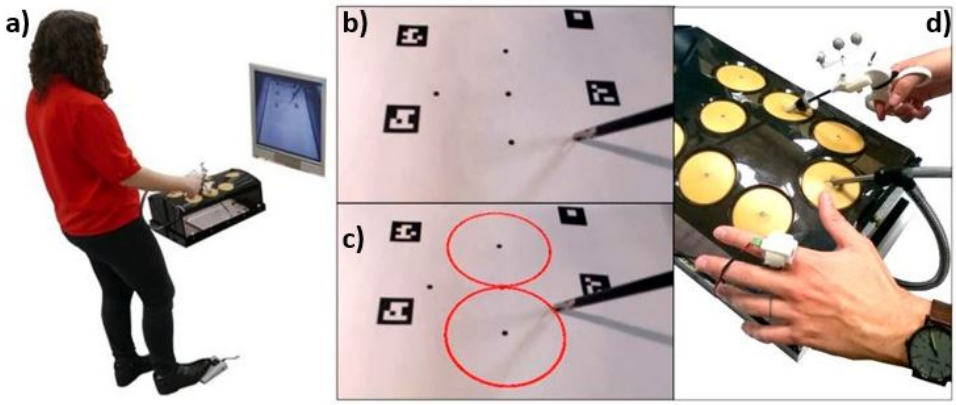

FIGURE 3.5 – *a) set-up d'entrainement ; b) groupe de contrôle et essais sans aide ; c) groupe visuel ; d) groupe tactile.*

Choix des retours instantanés

Pour le retour visuel, au vu des résultats observés dans [70], l'utilisation d'un bar-graph pour donner une indication de déviation n'a pas été retenue. La littérature préconise un retour relativement simple à traiter cognitivement et qui fait ressortir l'information principale. La projection de la trajectoire cible sur l'image endoscopique nous est apparue comme l'information la plus intuitive à traiter par les sujets d'autant plus que la mémoire visuelle est excellente de manière générale [56]. De plus, cette information visuelle ne sature pas le canal visuel, comme avancé dans [70]. Sont présentes sur l'écran la trajectoire cible, si celle-ci est projetée par le sujet, et la pointe de l'instrument. L'étudiant peut alors facilement la comparer à la trajectoire sans manquer d'autres informations.

Pour le retour tactile, nous avons choisi un moteur vibrant qui émet des vibrations continues de fréquences proportionnelles à la déviation courante :

$$F_{vibration}(t) = 255 \times \frac{déviation(t)}{déviation_{max}}$$

Nous avons choisi un signal reflètant la distance plutôt que la proximité de la trajectoire comme dans [86] et conformément aux résultats d'une étude préliminaire sur 4 sujets allant clairement dans ce sens. L'erreur maximale a été fixée à 1cm pour que la déviation soit plus rapidement et fortement perçue par le sujet.

Protocole

Les 24 étudiants ont suivi un entrainement intensif en 4 séances de 20 minutes reparties sur 2 jours.

A chaque séance, ils/elles réalisaient 10 suivis de trajectoire. Chaque séance débutait par un entrainement d'environ 1 minute durant laquelle la trajectoire était projetée sur l'écran. Chaque essai commençait avec la pointe de l'instrument sur le point d'intersection. Les sujets réalisaient ensuite un essai sans retour sensoriel (*baseline*). Puis le groupe GV et le groupe GT réalisaient 8 essais avec un retour visuel et tactile respectivement. Le groupe GC réalisait 8 essais sans aide. Enfin, tous les élèves réalisaient un dernier essai sans retour sensoriel (*learning*).

Comme précisé précédemment, les critères de performance et la trajectoire réalisée étaient communiqués aux sujets à la fin de chaque essai.

La performance a été évaluée sur :

— le temps total (en s) : le temps démarre lorsque le sujet initie le mouvement pour réaliser la trajectoire et s'arrête lorsque la pointe est revenue à sa position initiale (point d'intersection des 2 cercles),

— l'amplitude de déviation (mm) :

$$AD = max|Déviation_{Int}| + max(Déviation_{Ext}),$$

— la déviation cumulée (mm)

$$DC = \sum_{t=0}^{t_{max}} |déviations|,$$

— l'activité corrective : cette métrique regroupe le nombre de mouvements et le pourcentage sur le temps d'utilisation du retour. Le nombre de mouvements est déterminé par le nombre de fois où la dérivée de la déviation s'annule.

A la fin de chaque séance, les étudiants répondaient également à un questionnaire pour évaluer leurs impressions sur le retour et sur leur performance (Annexe A).

3.2.2 Résultats expérimentaux de l'apprentissage

Les courbes d'apprentissage se basent sur les essais sans retour sensoriel (ie. premier et dernier essais de chaque séance). Le premier point correspond au premier essai de la première séance des sujets et le dernier point au dernier essai de la dernière séance. Les points intermédiaires sont la moyenne entre le dernier essai d'une séance (*learning*) et le premier essai de la séance suivante (*baseline*).

Un test de Wilcoxon a été réalisé pour comparer les populations de chaque groupe pour évaluer leur homogénéité. Le test a révélé que les populations étaient équivalentes en précision (AD et CD combinées) (p=0.1605 entre GC et GV ; p=0.1605 entre GC et GT ; p=0.0281 entre GC et GK ; p=0.7984 entre GV et GT ; p=0.7984 entre GV et GK ; p=1 entre GT et GK). Ces résultats nous ont permis de normaliser les courbes d'apprentissages par la moyenne du groupe sur les premiers essais de la première séance des sujets appartenant à ce groupe. Une étude *one-way ANOVA* a ensuite été réalisée

pour évaluer si l'apprentissage des groupes était statistiquement significatif. Enfin, par soucis de précision, les résultats sont comparés à ceux du retour kinesthésique présentés au chapitre précédent.

Tableau 3.1 – *One-way ANOVAs pour le temps total d'exécution, l'amplitude de déviation et la déviation cumulée*

groupes	**Contrôle**			**Visuel**		
	moyenne(dev std)		p-value	moyenne(dev std)		p-value
	baseline	learning		baseline	learning	
Temps (s)	26.4(11.5)	49.5(16.8)	0.1409	29.3(8.6)	47.7(19.4)	0.2969
AD (mm)	17.7(5.1)	13.0(3.7)	0.1642	20.8(4.9)	15.1(3.9)	0.1171
DC (mm)	1935(685)	2390(1484)	0.8904	2509(909)	3561(2412)	0.9577
	Tactile			**Kinesthésique**		
	moyenne(dev std)		p-value	moyenne(dev std)		p-value
	baseline	learning		baseline	learning	
Temps (s)	28.0(10.4)	48.6(14.9)	**0.0329**	26.4(19.4)	24.1(9.91)	0.9590
AD (mm)	22.0(4.6)	11.5(2.2)	**p<0.001**	27.2(8.31)	20.0(7.01)	0.4298
DC (mm)	2709(1607)	2093(884)	0.5244	2112(723.7)	1777(558.8)	0.9394

Temps total

Aucune instruction n'avait été donnée aux sujets concernant le temps d'exécution. Il leur était simplement demandé d'être le plus précis possible.

Les groupes contrôle, visuel et tactile ont tous réduit la vitesse d'exécution de leurs gestes par rapport à la *baseline* de la première séance d'entrainement (Figure 3.6). Le groupe de contrôle est celui qui a le plus dégradé sa performance en temps (-88%) suivi par le groupe GT (-73%) et le groupe GV (-63%), alors que le groupe GK l'avait, lui, amélioré (+8.6%) (Figure 3.7a). En revanche, cette augmentation est statistiquement significative uniquement pour le groupe GT (p=0.0329 pour GT ; p=0.1409 et p=0.2969 pour GC et GV respectivement, ANOVA) (Tableau 3.1).

Précision

Les trois groupes ont amélioré l'amplitude de déviation au cours de l'apprentissage (Tableau 3.1). En revanche, comme pour le temps, seul le groupe GT a amélioré significativement l'amplitude de déviation durant ses 4 séances d'entrainement (p<0.001 pour GT ; p=0.1642 et p=0.1171 pour GC et GV respectivement, ANOVA). En regardant les courbes de la figure 3.8, nous pouvons noter que le groupe tactile se démarque des 3 autres groupes. Il est celui qui s'est le plus amélioré en précision et le plus rapidement. C'est également celui qui a le plus haut taux d'amélioration (+48%) suivi par le groupe GV (+27%) puis les groupes GC et GK (+26%) (Figure 3.7b).

Les résultats sont plus mitigés pour la déviation cumulée (Figure 3.9). Celle-ci n'a pas diminué pour le groupe GC (-23%) et le groupe GV (-42%) (Figure 3.7c). Le groupe GT a diminué sa déviation cumulée (+23%) mais cette amélioration n'est pas statistiquement significative (p=0.5244, ANOVA).

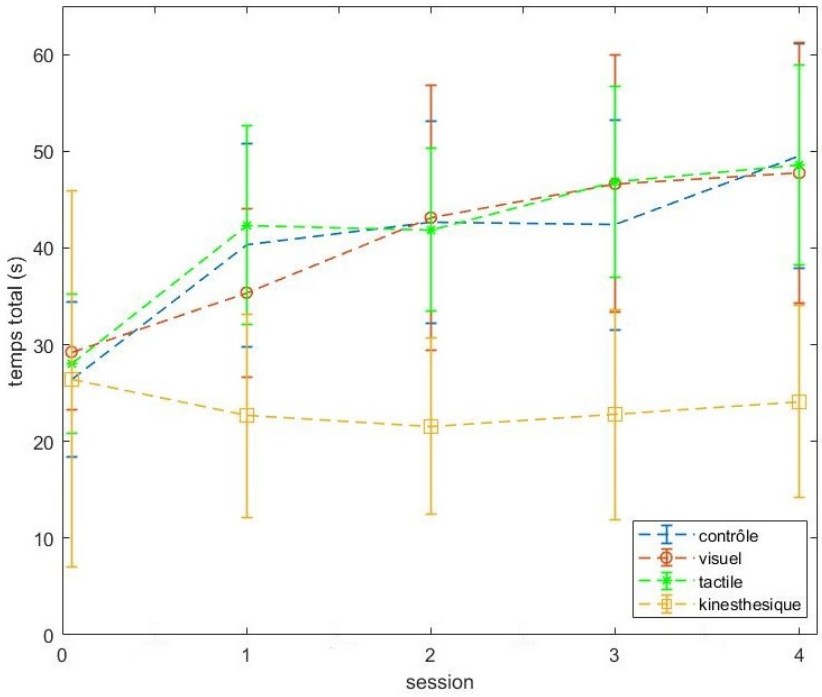

FIGURE 3.6 – *Temps total de réalisation de la tâche*

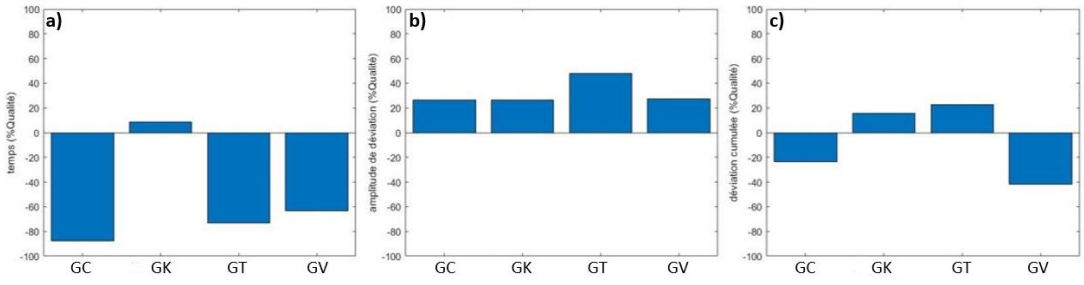

FIGURE 3.7 – *Taux amélioration - a) Temps total d'exécution ; b) Amplitude de déviation ; c) Déviation cumulée.*

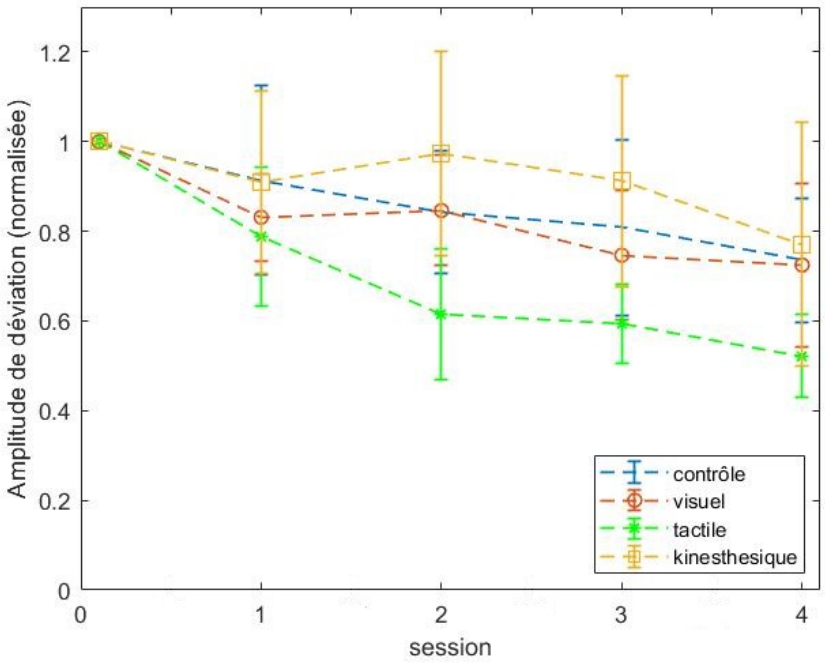

FIGURE 3.8 – *Amplitude de déviation*

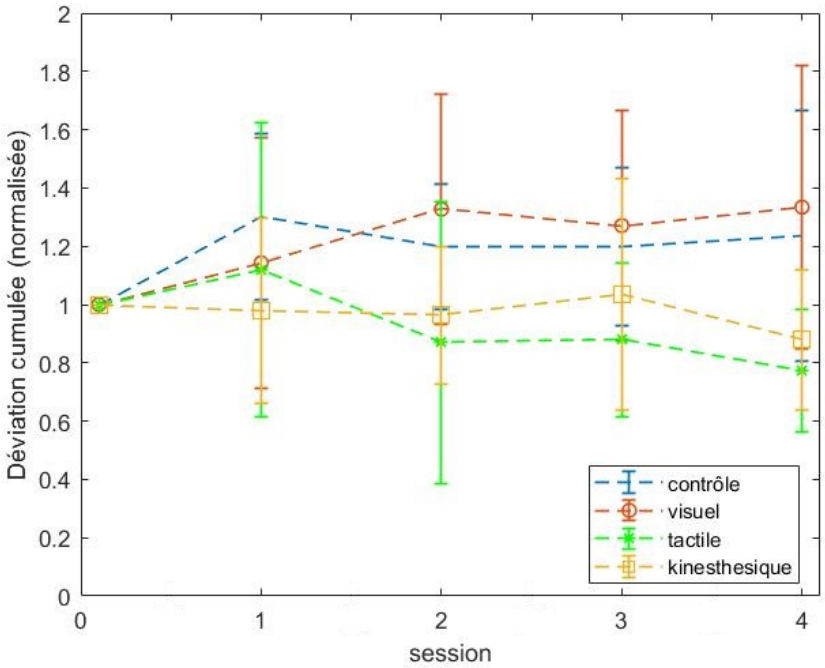

FIGURE 3.9 – *Déviation cumulée*

Activité corrective

Au regard du nombre de mouvements par essai avec retour d'information, nous avons remarqué que le groupe GT a une forte activité corrective car la moyenne sur tous les essais est de 299 mouvements alors que le groupe GC fait en moyenne 207 mouvements, le groupe GV, 246 mouvements, et le groupe GK, 165 mouvements (Figure 3.10a). La différence entre les groupes est statistiquement significative ($p=0.0118$ entre GC et GV ; $p<0.001$ entre GC et GT, GC et GK, GV et GK, et GT et GK ; $p=0.0186$ entre GV et GT, test de Wilcoxon).

Nous remarquons que le groupe GT a souvent réclamé le retour vibro-tactile (75%) alors que le groupe GV ne réclamait le retour visuel que par intermittence (52% du temps en moyenne) (Figure 3.10b). Cette différence est encore une fois statistiquement significative ($p<0.01$, test de Wilcoxon).

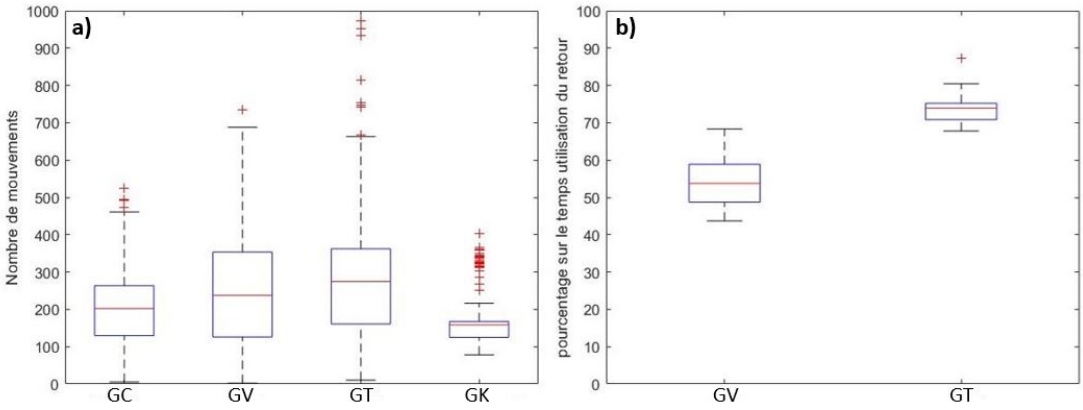

FIGURE 3.10 – *a) nombre moyen de mouvements ; b) pourcentage du temps d'utilisation du retour visuel ou tactile.*

Nous pouvons observer sur la figure 3.11 des exemples représentatifs de trajectoires réalisées par chacun des groupes. Il apparait que, comparé au groupe de contrôle, le groupe tactile oscille en permanence le long de la trajectoire (Figure 3.11d). Le nombre de mouvements est élevé mais l'amplitude de déviation faible.

Questionnaire

Les résultats des questionnaires de fin de séance sont donnés dans le tableau 3.2. Les chiffres représentent la moyenne des réponses sur toutes les séances avec la déviation standard.

Tableau 3.2 – *Résultats aux questionnaires de fin de séance (Annexe A)*

	Q1	**Q2**	**Q3**	**Q4**	**Q5**
Contrôle				3.5(0.94)	3.1(1.13)
Visuel	3.6(0.73)	2.9(0.92)	3.7(0.74)	3.2(0.93)	2.9(1.03)
Tactile	4.1(0.5)	2.9(0.95)	3.8(0.77)	4.0(0.45)	3.2(0.88)

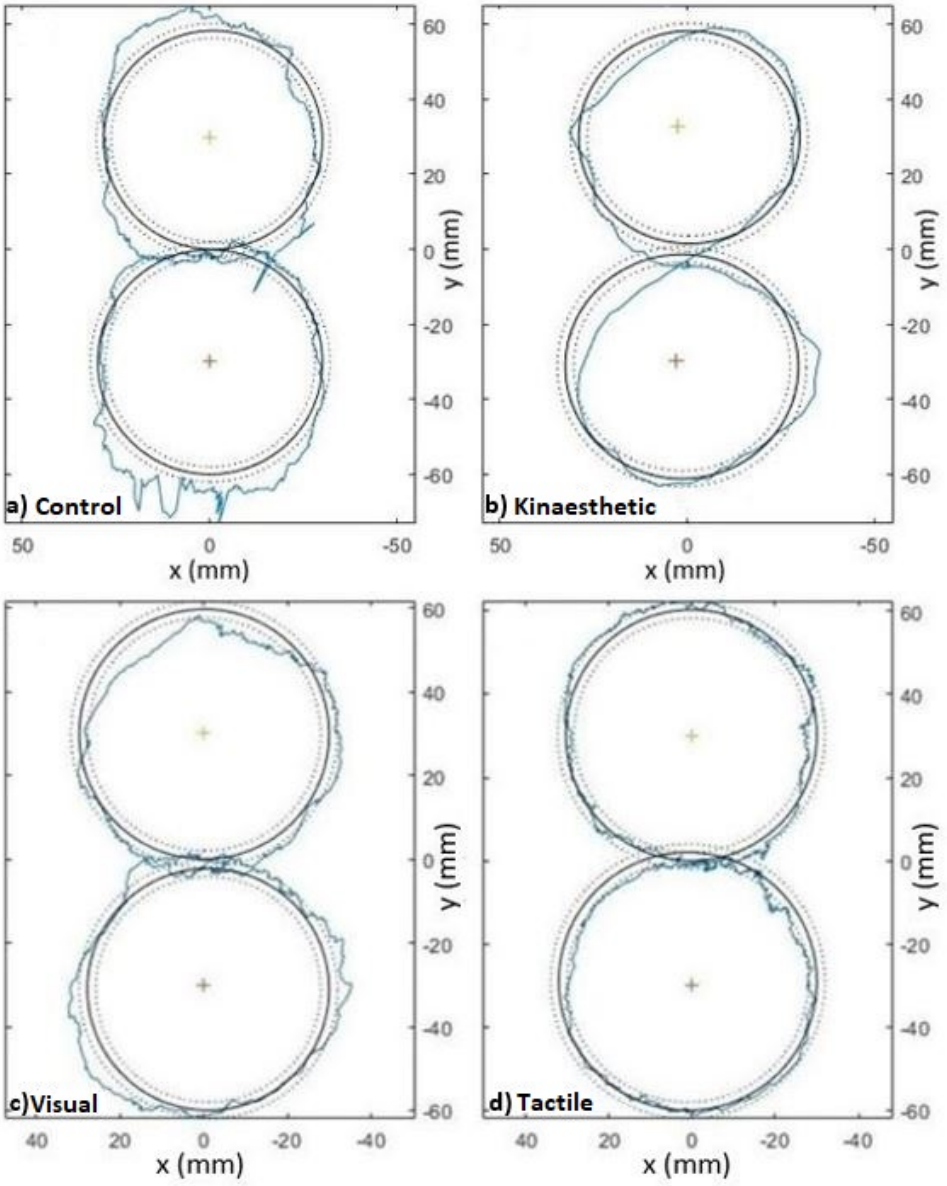

FIGURE 3.11 – *Exemples de trajectoires réalisées avec retour sensoriel - a) groupe de contrôle ; b) groupe kinesthésique ; c) groupe visuel ; d) groupe tactile.*

3.2.3 Discussion

Temps

A la fin de cet entrainement intensif (4 sessions de 20 minutes réparties sur 2 jours) le temps d'exécution de la tâche a augmenté pour les trois groupes GC, GV et GT. Alors que celui du groupe GK avait diminué légèrement. Cependant, aucune instruction en temps n'avait été donnée aux sujets et il est probable que privilégier la précision par rapport au temps allonge la durée d'exécution de la tâche.

Il semble, par ailleurs, que l'augmentation du temps soit davantage corrélée à l'amplitude de déviation (AD) qui décroit au cours de l'apprentissage, qu'à la déviation cumulée (DC) qui se dégrade pour les groupes GC et GV ou diminue seulement légèrement pour GT au cours de l'entrainement. Ainsi, ralentir l'exécution de la tâche semble surtout être la solution choisie par les sujets pour limiter les grandes erreurs de suivi.

Retour visuel

En ce qui concerne la précision, le groupe GV n'a pas amélioré significativement sa performance en matière d'apprentissage. Celle-ci est restée toujours proche de celle du groupe de contrôle. Notons que le retour visuel implémenté améliore la précision lorsqu'il est disponible et constitue donc une assistance efficace au geste.

Nous pouvons mettre en avant l'aspect très intuitif de ce retour visuel lequel a possiblement rendu la tâche très facile sur le plan cognitif et n'a pas suffisament sollicité l'attention des sujets. Il a été montré dans [76] que pour qu'un retour visuel impacte réellement la façon de faire d'un sujet, celui-ci doit nécessiter un traitement cognitif de la part de l'élève faute de quoi il perd son attention.

Par ailleurs, cette absence d'amélioration peut s'expliquer par le fait que la vision interfère avec la représentation haptique de la tâche. Cette hypothèse est la même que celle émise dans [63] où trois groupes (visuel, haptique et visuel-haptique) ont suivi un apprentissage d'une tâche 3D complexe. Feygin et al. ont alors remarqué que lorsqu'un retour visuel est disponible celui-ci prend le dessus sur le retour haptique et les étudiants ne sont plus aptes à faire la connection entre ce qu'ils/elles voient et ce qu'ils/elles font articulairement. Ainsi, nous pouvons penser dans notre cas que, lorsque le retour n'était plus disponible, le groupe GV n'était pas capable de faire de meilleurs gestes que le groupe GC.

Retour tactile

Le groupe GT est le seul groupe qui a diminué significativement son amplitude de déviation au cours de l'apprentissage. Celle-ci a diminué de presque 50% entre le tout premier et le tout dernier essai, résultat statistiquement significatif par rapport au groupe GC ($p=0.0379$, Wilcoxon test). C'est également le seul groupe qui, comme le groupe kinesthésique, a diminué sa déviation cumulée au cours de l'apprentissage.

Notons que cette amélioration de la précision s'est faite au détriment du temps d'exécution puisque c'est également le seul groupe qui a augmenté significativement le temps total.

On peut émettre l'hypothèse que, pour cette expérience, le retour tactile demandait une forte charge cognitive pour traiter l'information. Celui-ci était, en effet, positionné sur la main non-dominante. Aucune information de direction de déviation n'était communiquée et l'amplitude de déviation devait être interprétée par le ressenti de la fréquence de vibration.

Cette forte charge cognitive, lorsque le retour était disponible, a mené à un temps d'exécution plus long, notamment en début d'apprentissage, et une plus forte activité corrective comparé aux groupes GC et GV. Nous supposons que cela a mené à une plus grande concentration des sujets et, au final, à un meilleur apprentissage de la tâche en ce qui concerne la précision.

Questionnaire

Grâce au questionnaire de fin de séance, nous avons observé que les sujets n'ont pas trouvé la tâche particulièrement difficile et que les retours tactile et visuel sont apparus aidant et n'ont pas perturbé les gestes.

Un résultat intéressant est qu'à la question Q4 le groupe qui a montré la plus grande confiance sur son score final est le groupe tactile. La confiance en soi étant une capacité nécessaire pour réussir en laparoscopie [87], ce résultat reflète un autre avantage possible du retour vibro-tactile.

3.2.4 Conclusion

24 sujets ont participé à cette étude sur l'apprentissage du suivi de trajectoire en conditions laparoscopiques. Ils/elles ont été divisé(e)s en 3 groupes : contrôle (courbe d'apprentissage de référence), visuel et tactile.

La tâche a été répétée 40 fois au total par chaque sujet. A chaque session, les groupes GV et GT avaient 8 essais avec un retour visuel ou tactile à la demande pour corriger activement leur geste. Après chaque essai, les 3 groupes avaient un retour sur leur performance.

Cette expérience a révélé l'intérêt d'un entrainement aidé par un retour vibro-tactile pour améliorer la précision d'un geste de laparoscopie lors d'un apprentissage. L'assistance par retour vibro-tactile développe également la confiance des sujets. En revanche, le temps d'exécution de la tâche est dégradé fortement lorsque le retour est disponible, ce qui allonge les séances d'entrainement. Ceci peut s'expliquer par la forte charge cognitive induite pour traiter l'information. Pour y palier, une phase d'apprentissage du retour seul pourrait être mise en place pour que les étudiant(e)s se familiarisent avec l'information à traiter.

Les sujets du groupe visuel sont probablement devenus trop dépendants du retour proposé en comparaison du groupe tactile qui nécessitait une participation active et une grande concentration. De par l'information fournie, le retour visuel semble apporter une aide corrective intuitive ne mobilisant que peu la concentration et plus généralement les facultés d'assimilation du sujet. De plus, il a été montré que la vision interfère avec la représentation haptique d'une tâche [63] ce qui peut expliquer une évolution de l'amplitude de déviation et de la déviation cumulée similaire à celle du groupe contrôle dont l'apprentissage se fait sans aucun retour sensoriel particulier.

Il est important de noter que dans le cadre de cette expérience une grande différence d'âge existait entre les sujets (19-35 ans) et ceci a pu avoir une incidence sur nos résultats. Par exemple, la pratique régulière de jeux vidéos a été corrélée à la performance en laparoscopie [106]. Il est alors possible que les plus jeunes participants de l'étude y jouent ce qui aurait alors une incidence sur nos résultats. Cependant, des tests statistiques d'homogénéisation des populations ont été réalisés en temps et précision pour que les groupes soient comparables au cours de l'expérience.

Nous avons envisagé pour l'expérience suivante de tester si les résultats positifs du guidage vibro-tactile s'observent également sur une tâche plus complexe, par exemple une tâche de suture ou de découpe, où les deux mains sont utilisées.

3.3 Tâche de découpe

Nous avons décidé d'étudier, lors d'une expérience préliminaire sur peu de sujets, les bénéfices du retour tactile sur l'apprentissage d'une tâche bimanuelle et plus complexe que le simple suivi de trajectoire. Nous avons donc choisi la tâche de découpe du "*Fundamental of laparoscopic surgery program*" (FLS) [29].

3.3.1 Matériels et Méthode

Sujets

6 sujets recrutés au sein du laboratoire et différents des expériences précédentes ont participé à l'expérience : 5 hommes et 1 femme, entre 24 et 27 ans, tous droitiers, et ne possédant aucune connaissance en chirurgie laparoscopique. Les sujets ont été divisés en 2 groupes : 3 sujets dans un groupe de contrôle (GC) et 3 sujets dans un groupe avec retour tactile (GT).

Tâche

Les sujets ont eu 6 séances d'entrainement de 20 minutes pour apprendre à découper un cercle de 3 cm dessiné sur une compresse de 100x100 mm (Figure 3.12).

Pour cet exercice, la découpe se fait avec un ciseau de laparoscopie tenu de la main droite et une pince de laparoscopie tenue de la main gauche. La compresse est tenue par un clip-board et 2 pinces crocodiles attachées au pelvi-trainer.

Le but est de découper le cercle avec une déviation maximale de 2 mm de part et d'autre du cercle en moins de 300 s.

Une stratégie de découpe particulière est suggérée aux participants afin de limiter le temps total d'exécution du geste (Figure 3.12) [105]. La découpe commence en bas de la compresse, proche de l'étudiant, légèrement en biais, pointant vers la gauche. Arrivé au niveau du cercle, l'étudiant commence par découper la partie gauche en utilisant la pince pour tendre la compresse sur la gauche (segment 1-2). Puis arrivé au point 2, l'étudiant retourne avec le ciseau au point 1 et commence sa découpe du côté droit du cercle (segment 3-4). Il utilise toujours la pince pour étirer le cercle découpé et tendre la compresse.

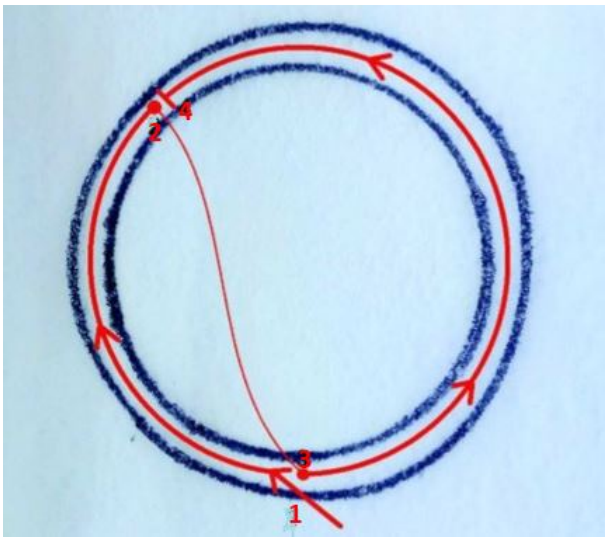

FIGURE 3.12 – *Chemin de découpe*

Cette tâche de découpe permet de travailler les difficultés classiques de la laparoscopie (perception de profondeur, altération des retours haptiques, etc.) mais dans le contexte d'une tâche bimanuelle avec une manipulation des outils dans l'espace 6D. Par rapport à la tâche de suivi du "8" étudiée précédemment, cette tâche sollicite donc d'avantage la coordination main-oeil et la coordination bimanuelle.

Set-up expérimental

Les étudiant(e)s se sont entrainé(e)s sur un pelvi-trainer de type Szabo-Berci-Sackier Laparoscopic trainer développé par Karl Storz. Une caméra endoscopique permettait d'enregistrer la scène opératoire qui était ensuite projetée sur un écran face au sujet (Figure 3.13).

Des marqueurs passifs étaient placés sur la poignée du ciseau de laparoscopie (main droite) et leurs positions étaient détectées par un système optique de type NDI Polaris^{TM}. Pour la calibration de l'instrument nous avons de nouveau utilisé la méthode de la sphère (Chapitre 2, section 2.2.1). La déviation par rapport à la trajectoire cible et le temps associé à cette déviation sont collectés à une fréquence de 30Hz.

Pour définir la trajectoire cible, la position du centre du cercle et 2 points du cercle sont enregistrés en début d'essai à l'aide du système optique. La moyenne des 2 distances nous permet de déduire le rayon du cercle courant.

Groupes

Les étudiants étaient répartis en 2 groupes :

— *Un groupe de contrôle (GC)* : aucune aide. Ce groupe nous sert de référence pour évaluer chaque séance et nous donne la courbe de référence d'apprentissage ;

— *Un groupe tactile (GT)* : un vibreur est placé sur l'index de la main droite du sujet (Figure 3.14). Les vibrations sont continues et la fréquence dépend de l'amplitude de déviation de la pointe de l'instrument par rapport au cercle

FIGURE 3.13 – *Setup d'entrainement*

cible, en tenant compte encore une fois d'une zone de tolérance de +/-2 mm de part et d'autre du cercle. Les vibrations varient linéairement entre 25 Hz et 255 Hz, avec une vibration maximale atteinte pour une déviation égale à 20 cm par rapport à la trajectoire cible [85].

FIGURE 3.14 – *Moteur vibrant positionné sur l'index droit.*

Pour le retour tactile, comme dans l'expérience précédente, les vibrations continues ont été préférées au regard des résultats de [70]. En revanche, la déviation maximale a cette fois-ci été fixée à 20cm pour une question de confort du sujet car le retour était cette fois-ci présent en permanence.

Protocole

Les 6 étudiants ont suivi un entrainement d'une semaine avec 6 séances de 20 minutes. Tous les étudiants ont eu une pause de 2 jours (weekend) entre la troisième et la quatrième séance. A chaque séance, ils/elles réalisaient 3 ou 4 découpes selon leur rapidité. Chaque séance débutait par un essai sans retour sensoriel (*baseline*). Puis le groupe GT réalisait 1 ou 2 essais avec un retour tactile. Le groupe GC réalisait 1 ou 2 essais sans aide. Enfin, tous les élèves réalisaient un dernier essai sans retour sensoriel (*learning*).

Les critères de performance évalués sont :
— le temps total d'exécution de la tâche (s) : le temps démarre lorsque la pointe du ciseau arrive sur le cercle et s'arrête lorsque le cercle est entièrement découpé,
— l'amplitude de déviation (mm) :

$$AD = (30 - r_{min}) + (r_{max} - 30),$$

— l'aire incorrecte (mm^2)

$$IRA = S_{in} + S_{out},$$

— le nombre de mouvements.

L'amplitude de déviation (AD) et l'aire incorrecte (IRA) sont déterminées à posteriori par traitement d'image à l'aide d'un programme que nous avons développé (Figure 3.15). Toutes les compresses ont été scannées puis traitées. L'image est ensuite chargée dans le programme. Une fois le centre du cercle détecté, le programme détermine le rayon minimum (déviation intérieure maximale), le rayon maximum (déviation extérieure maximale) ainsi que les parties de la compresse qui n'ont pas été découpées (S_{in}) et celles découpées en trop (S_{out}) (Figure 3.15).

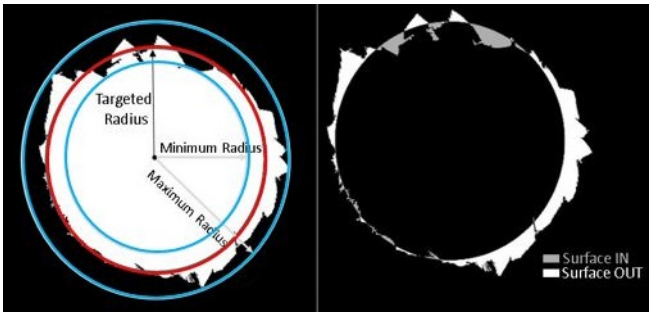

FIGURE 3.15 – *gauche* : AD=(30 - r_{min})+(r_{max} - 30) ; *droite* : IRA =S_{in} + S_{out}

Comme il était demandé aux étudiants d'être à la fois précis et rapides, nous avons défini un score qui regroupe les 2 critères : temps et précision (AD et IRA). Des coefficients de 0.5 sont appliqués à AD et IRA car nous considérons que le temps et la précision sont de nécessités équivalentes.

Le temps d'éxécution de la tâche, l'amplitude de déviation et l'aire incorrecte étaient chacun normalisés par le score obtenu au premier essai de la première séance.

En effet, les scores des populations étaient similaires sur cet essai (p=0.7000, Wilcoxon test).

$$Score = \frac{(Temps_{norm} + 0.5 \times AD_{norm} + 0.5 \times IRA_{norm})}{2}$$

A la fin de chaque séance, les étudiants répondaient également à un questionnaire pour évaluer leur ressenti par rapports au retour et à leur performance (Annexe A).

3.3.2 Résultats

Le nombre limité de sujets dans chaque groupe (3) ne nous a pas permis de faire une analyse statistique de type ANOVA pour vérifier si les améliorations étaient statistiquement significatives au cours de l'apprentissage.

Les courbes d'apprentissages sont comparées à un essai réalisé par un expert. Son score est quant à lui normalisé par la moyenne des premiers essais de chaque sujet. Il correspond à la valeur cible que les sujets devaient atteindre en fin d'entrainement.

Score

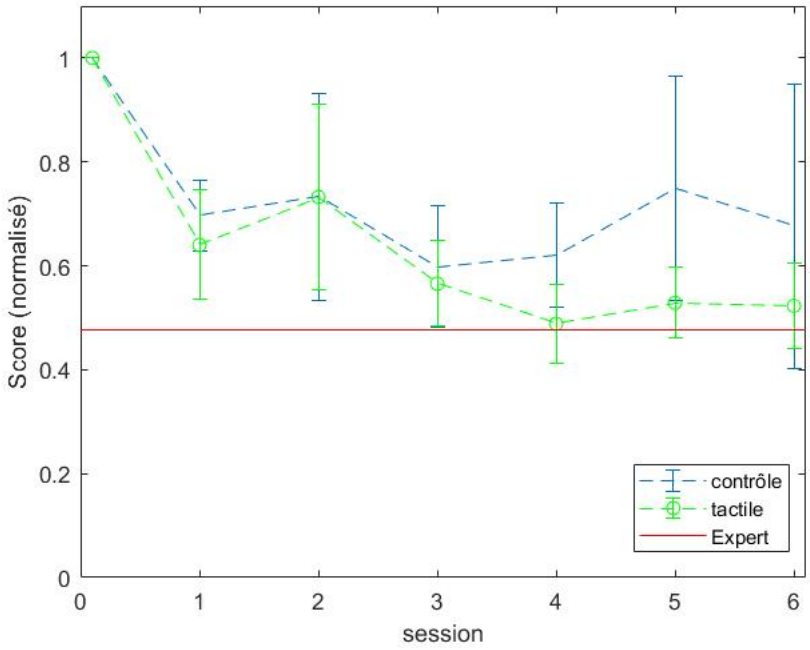

FIGURE 3.16 – *Score*

Les deux groupes ont amélioré leur score au cours de l'apprentissage (Figure 3.16). L'évaluation regroupant le temps et la précision a diminué de 32% pour le groupe de contrôle et de 48% pour le groupe tactile, avec également une dispersion plus faible des sujets en fin d'apprentissage dans le groupe GT.

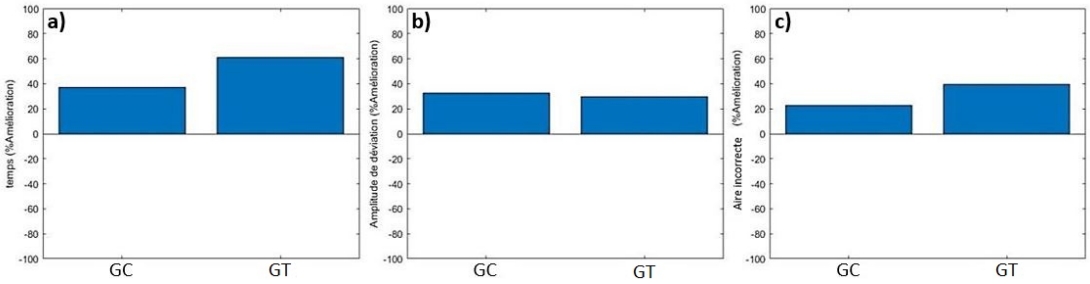

FIGURE 3.17 – *Taux d'amélioration (%) - a) Temps ; b) Amplitude de déviation ; c) Aire incorrecte.*

Le groupe avec retour vibro-tactile semble atteindre un plateau d'apprentissage en fin d'entrainement, celui-ci est par ailleurs proche de la valeur cible.

Concernant l'amélioration en temps (Figure 3.17a), le taux d'amélioration du groupe tactile est presque 2 fois plus important que celui du groupe de contrôle (61% contre 37%)

En ce qui concerne la précision, les résultats sont plus proches. Le groupe de contrôle a amélioré son amplitude de déviation de 32% contre 30% pour le groupe tactile (Figure 3.17b). En revanche, le groupe tactile a davantage limité son aire incorrecte découpée, avec 39% d'amélioration contre 23% pour le groupe de contrôle (Figure 3.17c).

Comparaison des performances avec et sans retour vibro-tactile

Nous avons également comparé les scores des essais avec et sans retour vibratoire afin de vérifier l'influence de l'aide sensorielle sur la performance. Nous pouvons voir sur la figure 3.18 que l'ajout d'un retour sensoriel détériore légèrement le score en début d'apprentissage et que les deux courbes sont, pour le reste de l'entrainement, équivalentes. Les scores restent plus faibles que ceux du groupe de contrôle.

Nous pouvons observer sur la figure 3.19 comment le retour vibro-tactile modifie la performance. Il l'améliore en précision (Figure 3.19b et 3.19c) mais la détériore légèrement en temps. En effet, l'ajout du retour augmente légèrement le temps de réalisation de la tâche notamment en début d'apprentissage (Figure 3.19a).

Activité corrective

En estimant le nombre de mouvements réalisé lors des essais avec retour, nous avons remarqué que le groupe tactile est celui qui fait le moins de mouvements avec une moyenne de 3078 mouvements par essai (std = 1764) alors que le groupe de contrôle réalise en moyenne 5439 mouvements par essai (std = 1123) (Figure 3.20). Cette différence est significative au sens du test de Wilcoxon ($p<0.01$).

Questionnaire

Les sujets ont répondu en fin de séance à un questionnaire pour connaître leur ressenti durant la session (Annexe A). Ils/elles répondaient sur une échelle de 1 (pas du tout d'accord) à 5 (tout à fait d'accord).

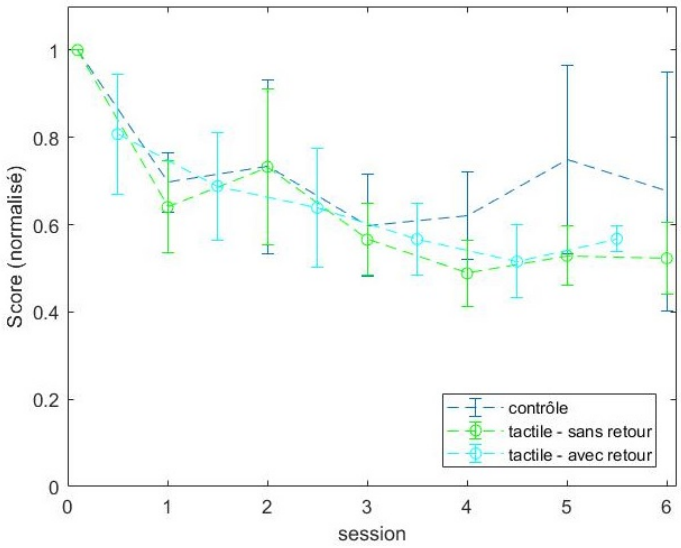

FIGURE 3.18 – *Comparaison des scores des essais avec et sans retour du groupe GT. Comparaison avec les essais du groupe GC comme référence.*

Les sujets ont trouvé la tâche difficile (Q5) avec une moyenne de 4.1 pour le groupe de contrôle et 3.6 pour le groupe tactile. Il est intéressant de noter que le groupe tactile est de nouveau le plus confiant quant à son amélioration (Q4) avec une moyenne de 4.1 alors que le groupe de contrôle était plus réservé avec 3.6 de moyenne.

En revanche, les sujets du groupe tactile sont assez partagés quant à l'utilité du retour vibro-tactile dans l'apprentissage (Q3) avec une moyenne de 2.8 donc plutôt neutre. Il est à noter que le retour vibratoire n'a pas dérangé les gestes des sujets (Q2, 1.9).

3.3.3 Discussion

Le but de cette expérience était d'observer les bénéfices du retour vibro-tactile sur l'apprentissage d'une tâche bimanuelle complexe telle qu'une tâche de découpe.

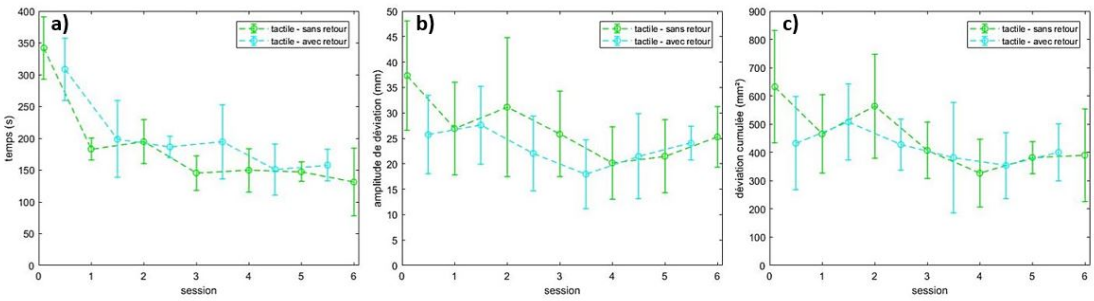

FIGURE 3.19 – *Comparaison des performances avec et sans retour pour le groupe GT - a) Temps (s) ; b) Amplitude de déviation (mm) ; c) Aire incorrecte (mm^2).*

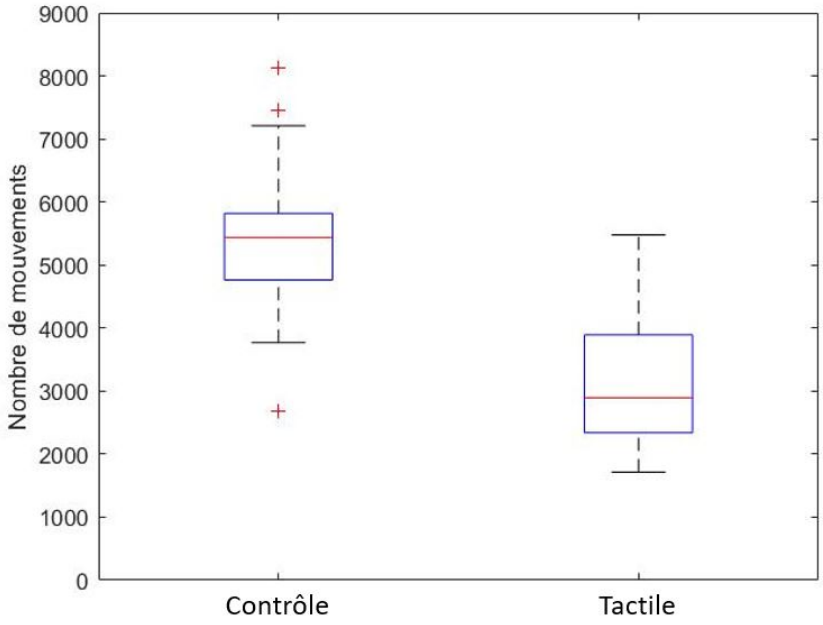

FIGURE 3.20 – *Comparaison du nombre de mouvements*

Six sujets novices en chirurgie laparoscopique ont suivi un entrainement sur 6 jours pour la tâche de découpe du "*FLS program*". Les sujets ont été divisés en 2 groupes : un groupe de contrôle pour servir de référence, et un groupe tactile.

Le "*FLS program*" requière que les sujets soient rapides et précis. Nous avons donc défini un score qui regroupe à la fois le temps total d'exécution de la tâche et la précision qui se compose de l'amplitude de déviation et de l'aire incorrectement découpée.

A la fin des 6 séances, les 2 groupes ont diminué leurs scores. Le groupe de contrôle est celui qui s'est le moins amélioré avec une diminution de son score de 32% alors que le groupe tactile s'est amélioré de 48%. A cause du faible nombre de sujets par groupe (3) une étude statistique entre les groupes n'a pu être réalisée.

Pour obtenir un bon score à l'exerice de découpe, les sujets devaient être à la fois rapides et précis. Nous pouvons noter que comparé à l'expérience précédente, le temps total d'exécution de la tâche a cette fois-ci diminué au cours de l'apprentissage. Nous avons, dans cette expérience, donné une consigne en temps aux sujets. C'est le groupe tactile qui a le plus augmenté sa vitesse d'exécution en fin d'apprentissage. Notons que comme dans l'expérience précédente, l'ajout du retour vibro-tactile allonge le temps de performance en début d'apprentissage au vu des scores plus importants obtenus sur les essais avec retour comparés aux essais sans retour (Figure 3.19a).

En ce qui concerne la précision, les 2 groupes ont amélioré l'amplitude de déviation autant l'un que l'autre. En revanche, l'amélioration de l'aire incorrecte découpée est plus importante pour le groupe tactile que pour le groupe de référence.

Ainsi, l'aide par retour vibro-tactile a, cette fois-ci, amélioré les performances en temps d'exécution et en précision. Ces deux résultats semblent confirmer l'intérêt d'un retour vibro-tactile pour l'apprentissage d'une tâche complexe de laparoscopie et ce, à

la fois au regard de la précision du geste et au regard de la rapidité d'exécution. En comparant la courbe d'apprentissage à un score obtenu par un expert sur une tâche de découpe, nous remarquons que la courbe d'apprentissage du groupe tactile tend vers cette valeur et semble même atteindre son plateau d'apprentissage au voisinage de cette valeur.

De plus, les sujets du groupe tactile sont, de nouveau, apparus plus confiants quant à leur amélioration lors de chaque séance comparés aux sujets du groupe de contrôle.

3.3.4 Conclusion sur le tâche de découpe

Cette expérience menée sur une tâche plus complexe qu'un simple suivi de trajectoire 2D a montré que le retour vibro-tactile est une option intéressante pour l'amélioration du set-up d'entraînement à la chirurgie laparoscopique.

L'expérience développée ici est une étude préliminaire qui, au vu des résultats observés, serait intéressante à prolonger. Il serait, par exemple, fructueux de vérifier si la précision peut être améliorée à l'aide d'un deuxième vibreur donnant une indication de direction de déviation.

La tâche a paru complexe pour les sujets et les informations fournies par le retour vibro-tactile difficiles à traiter en début d'apprentissage. Nous pourrions donc ajouter une séance d'entrainement pour l'apprentissage du retour seul avant de commencer l'apprentissage de la tâche elle-même

Enfin, la tâche de découpe est un véritable exercice d'entraînement à la laparoscopie et lors de notre apprentissage, aucun enseignant n'était présent pour corriger et donner des conseils de base à l'élève. Des conseils sur la posture, l'orientation des instruments et du tissu, ou sur comment tenir la compresse, pourraient améliorer la performance finale pour chacun des groupes.

3.4 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous projetions d'étudier l'intérêt de retours multi-sensoriels en complément du set-up traditionnel d'entrainement à la chirurgie laparoscopique.

Nous avons développé deux expériences qui traitent ce problème : une tâche simple qui consistait en un suivi de trajectoire 2D et une tâche plus complexe qui était la tâche de découpe définie par le "*FLS program*" [29].

La première expérience a traité l'apport que pouvaient avoir les retours visuel et vibro-tactile sur l'apprentissage. Il est apparu que le retour tactile améliorait la précision du geste et développait également la confiance en soi des sujets. Le retour visuel n'a apporté aucune amélioration ni en précision et ni en temps en comparaison avec le groupe de référence.

Il semblerait que le retour visuel interfère avec la représentation haptique d'une tâche lorsqu'un retour est disponible [63]. Ainsi, lorsque l'aide visuelle est coupée, les sujets ne sont pas forcément capables de reproduire articulairement ce qu'ils ont fait lorsque le retour était disponible.

Au vu des résultats positifs du retour tactile, nous avons développé une deuxième expérience avec une tâche bimanuelle plus complète pour analyser si les avantages du

retour vibro-tactile étaient conservés. Le retour a de nouveau amélioré la précision de la tâche et également la vitesse d'exécution.

3.5 Perspectives

A l'avenir, il serait intéressant d'étudier la combinaison des retours visuel et tactile pour vérifier si, comme dans [63][70], chaque retour compense les faiblesses de l'autre pour aboutir à une meilleure performance en temps et précision.

Différents retours tactiles et visuels pourraient également être testés. Au vu des résultats de notre expérience sur le suivi de trajectoire, le retour visuel pourrait être plus abstrait afin d'obliger à un traitement cognitif de l'information de la part du sujet et donc une plus grande concentration de la part de celui-ci. Le retour tactile pourrait donner une information de direction de déviation au travers d'un deuxième vibreur afin de conduire à une meilleure utilisation de l'information. Nous pourrions également créer cette information de direction de déviation sous forme d'illusion sensorielle à l'aide d'un vibreur de type *Haptuator Mark II* par *Tactile Labs* couplé à une fonction en dent de scie.

Il serait également intéressant d'étudier, comme en rééducation, la diminution de l'aide au cours de l'apprentissage [66]. Nous avons abordé le sujet avec l'utilisation d'une pédale pour la première expérience pour avoir un retour à la demande. Cependant, il est apparu que, pour le retour tactile, les sujets utilisaient quasiment en permanence l'aide. En conséquence il serait intéressant de programmer une assistance qui diminue au cours de l'entraînement en fonction de la performance des sujets.

D'après la littérature, le retour visuel est quant à lui vraiment utile en tout début d'apprentissage en rendant l'information principale plus accessible [71]. Il pourrait ainsi être présent lors de la première séance d'entrainement puis retiré par la suite au profit du retour tactile.

Une autre idée pour améliorer l'apprentissage de la laparoscopie serait la personnalisation de l'entrainement. Dans le chapitre suivant, nous cherchons des solutions pour adapter les séances d'entrainement au sujet selon ses capacités psychomotrices et ses difficultés face à la chirurgie laparoscopique.

Chapitre 4

Personnalisation de l'Apprentissage

4.1 Introduction

Un problème majeur est apparu lors des séances d'observation à l'école de chirurgie : tous les élèves, bien que différents les uns des autres, suivent exactement le même parcours. Or, par nature, tous les étudiants ne commencent pas avec le même niveau de dextérité et de capacité. Certains auront une bonne représentation spatiale, d'autres seront génés par la réduction du mouvement à 4 degrés de liberté, etc. De même, ils/elles n'ont pas tous la même aptitude à poursuivre deux objectifs en même temps comme, par exemple, réaliser un exercice sur pelvi-trainer tout en écoutant les conseils d'un enseignant(e).

Certaines de ces capacités psychomotrices ont été, dans la littérature, corrélées à des critères de performance en laparoscopie. C'est le cas de la représentation spatiale et de la rotation mentale [88], de l'ambidextrie [89], de la dextérité des doigts [90] et de la motivation [91]. Cependant, certaines capacités restent partiellement ou pas du tout étudiées dans le cadre de la laparoscopie alors qu'elles nous semblent primordiales, comme par exemple : la proprioception et la capacité à réaliser deux tâches simultanées.

Par ailleurs, la personnalisation des exercices de laparoscopie par rapport au sujet a été très peu étudiée. Certaines études ont proposé de développer des exercices spécifiques pour développer les capacités des élèves (ex : ambidextrie [89]). D'autres ont proposé d'allonger le temps d'apprentissage jusqu'à ce que tous les élèves atteignent un seuil pré-défini [40]. En revanche, aucune étude, à notre connaissance, n'a porté sur une approche personnalisée, différenciée et progressive des difficultés techniques du geste laparoscopique (geste cinématiquement contraint, altération de la vision et des retours haptiques).

Dans ce chapitre, nous explorons donc deux approches possibles de la personnalisation de l'apprentissage de la laparoscopie. Nous essaierons, dans un premier temps, de corréler deux capacités psychomotrices (proprioception et double-tâche) à la performance en laparoscopie. Dans un second temps, nous réaliserons une expérience pour étudier les éventuels avantages qu'il y a à aborder séparément les difficultés de la chirurgie laparoscopique.

4.2 Capacités Psychomotrices

En début d'internat, tous les étudiants ne commencent donc pas avec le même niveau de dextérité et de capacités psychomotrices. Or certaines de ces compétences ont montré une forte corrélation avec la performance en laparoscopie : représentation spatiale et rotation mentale [88], ambidextrie [89], souplesse des doigts [90] et motivation [91].

Dans [89], par exemple, les chercheurs ont développé des exercices pour travailler spécifiquement l'ambidextrie. Les élèves qui avaient des faiblesses dans cette capacité se sont donc entrainés sur ces exercices. A la fin de l'apprentissage, tous les élèves réalisaient de nouveau un exercice de laparoscopie. Non seulement, les élèves qui avaient travaillé l'ambidextrie avaient un meilleur niveau mais les écarts de performance entre tous les élèves étaient nettement plus réduits.

Dans ce contexte, il apparaît cependant que certaines capacités psychomotrices comme la proprioception et la capacité à faire deux tâches en même temps (double-tâche) n'ont pas encore été étudiées alors qu'elles semblent pouvoir naturellement influencer l'apprentissage de la chirurgie laparoscopique.

Notre contribution à la question posée se situe donc au niveau de la corrélation possible entre ces deux capacités psychomotrices, proprioception et double-tâche, et la qualité du geste de laparoscopie.

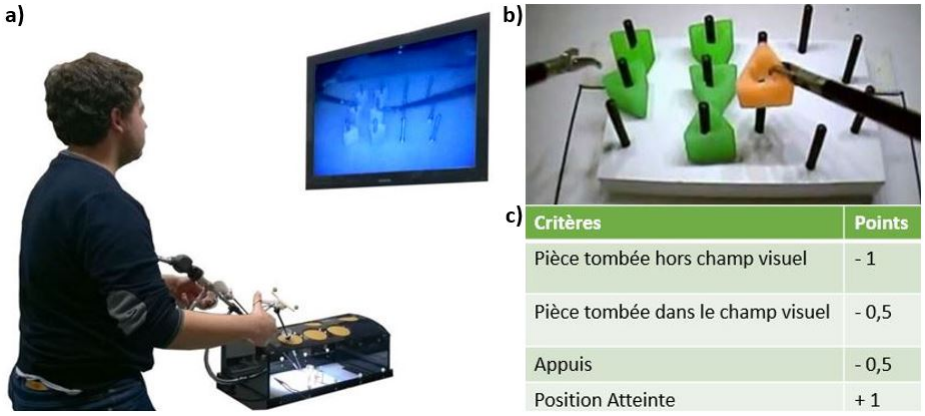

FIGURE 4.1 – *Tâche du "peg transfer" - a) set-up d'entrainement [29] ; b) plateau d'entrainement ; c) barême.*

4.2.1 Proprioception

Il existe deux types de proprioception [92] :

— proprioception statique : perception consciente de l'orientation des différentes parties de son corps et les relations qu'elles ont entre elles ;

— proprioception dynamique : kinesthésie et perception de la quantité de mouvement que nous créons.

Dans [93], les chercheurs ont étudié le rôle de la proprioception dans la coordination main-œil en observant le suivi de cible par le regard sous deux conditions : avec et sans

lien kinesthésique avec la cible. Lorsque les sujets déplaçaient la cible par eux-mêmes, à l'aide d'un curseur tenu dans leur main droite, le suivi était meilleur en termes de gain, de phase et de précision, comparé à un suivi de cible seulement visuel. Ceci nous indique que la proprioception dynamique joue un rôle dans la coordination main-œil.

Par ailleurs, d'autres études ont comparé le regard de chirurgiens experts et celui de novices lors d'une tâche de laparoscopie [94]. Elles ont montré que pendant la réalisation d'une tâche les experts focalisent leur regard sur la cible et ne regardent presque jamais la pointe de leurs instruments ou leurs mains. Les étudiants, au contraire, commutent très souvent entre la cible et la pointe de leurs instruments. L'hypothèse émise par les auteurs, est que les chirurgiens experts s'appuient sur une proprioception de leurs gestes plus développée que les novices.

Notre objectif, dans ce qui suit, est de savoir si effectivement les capacités proprioceptives sont un facteur déterminant de la réussite durant une séance d'entrainement de laparoscopie. Nous étudions cette possible corrélation en intégrant l'influence de la longueur de l'instrument de laparoscopie.

Sujets

21 sujets recrutés au sein du laboratoire et 3 internes de première année d'internat ont participé à l'expérience. Le groupe était constitué de 16 hommes et 8 femmes, âgés de 18 à 30 ans.

Protocole

La première partie de l'expérience consiste à évaluer les capacités proprioceptives des sujets. Pour cela, nous avons développé une tâche de pointage inspirée de [95] dans laquelle les étudiants pointent à l'aide d'un instrument différents points dessinés sur une table face à eux (Figure 4.2). Au tout début, le sujet s'entraine à pointer avec les yeux ouverts puis il/elle ferme les yeux et pointe à nouveau quatre fois chacun des points. Entre chaque pointage, l'étudiant garde les yeux fermés et retourne à une position initiale (main au niveau du nombril).

Le pointage se fait dans quatre conditions différentes :

1. 3 points horizontaux sont pointés avec l'instrument de laparoscopie réduit ;
2. 3 points verticaux sont pointés avec l'instrument de laparoscopie réduit ;
3. 3 points horizontaux sont pointés avec l'instrument de laparoscopie classique ;
4. 3 points verticaux sont pointés avec l'instrument de laparoscopie classique ;

Les conditions sont enchainées de manière aléatoire d'un individu à l'autre. Chaque phase débute par un entrainement avec les yeux ouverts d'environ 3 minutes. Les 3 internes en chirurgie n'ont réalisé que les 2 premières conditions de l'expérience (instrument réduit).

La proprioception est évaluée en calculant la moyenne des erreurs (distance entre point cible et point pointé). Une faible moyenne reflète donc une bonne proprioception.

La deuxième partie de l'expérience consiste à réaliser une tâche de laparoscopie qui est une tâche de *"peg transfer"* du *"FLS program"* (Figure 4.1a) [29]. L'exercice dure 5 minutes. Le but est de déplacer le plus de perles possibles (Figure 4.1b).

Au début de la tâche, les 6 perles sont positionnées sur les 6 picots de gauche du plateau d'entrainement (Figure 4.1b). L'étudiant(e) vient avec sa pince de gauche prendre une perle puis, sans prendre appui, la fait passer dans sa pince de droite. Enfin, il/elle vient déposer la perle sur un des picots de droite. Si l'élève a réussi à bouger les 6 perles en moins de 5 minutes, il/elle refait le geste en sens contraire. Le temps démarre lorsque l'étudiant(e) touche la première perle et dure 5 minutes. Le barème défini par l'école de chirurgie nous permet de définir le score final obtenu à l'issu de l'exercice (Figure 4.1c) :

$$Score = N_{posAtteintes} - N_{pièceHorsChamp} - 0.5 \times N_{pièceChamp} - 0.5 \times N_{appuis}.$$

avec :
- $N_{posAtteintes}$: nombre de perles déposées sur un picot ;
- $N_{pièceHorsChamp}$: nombre de perles tombées hors du champ visuel et ne peuvent donc être récupérées ;
- $N_{pièceChamp}$: nombre de perles tombées dans le champ visuel et peuvent donc être récupérées ;
- N_{appuis} : nombre d'appuis lors du passage de la perle d'une pince à l'autre.

Set-up expérimental

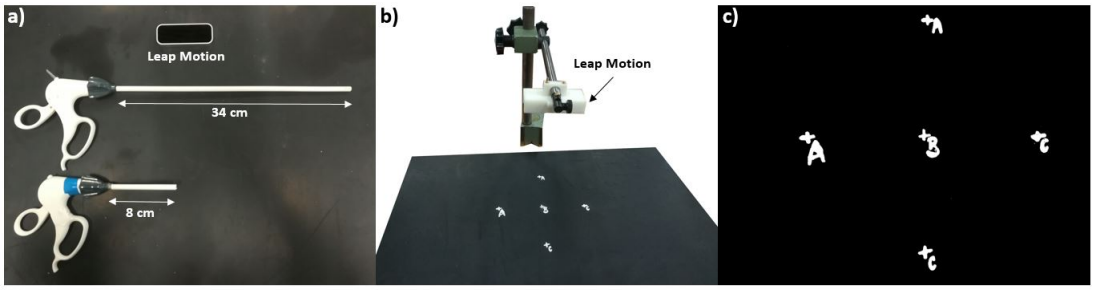

FIGURE 4.2 – *a) Instruments de laparoscopie pour le pointage et système de "Leap Motion" ; b) plateau d'évaluation de la proprioception ; c) cibles.*

Le set-up d'entrainement à la chirurgie laparoscopique mis à disposition des élèves comprend : 1 pelvi-trainer, 1 caméra endoscopique, 1 écran, 2 pinces de laparoscopie et 1 plateau d'entrainement au *"peg transfer"* (Figure 4.1a).

Pour la tâche de pointage, les étudiants sont placés face à une table sur laquelle est posé un tapis noir sur lequel apparaissent 5 points : 3 points suivant une ligne verticale et 3 points suivant une ligne horizontale (le point B est commun au 2 lignes) (Figure 4.2c). Un système de *leap motion*, placé au dessus du tapis, permet de calibrer les points cibles et d'enregistrer la position de la pointe des instruments (Figures 4.2b). Les étudiants ont à disposition 2 instruments : un instrument de laparoscopie réduit de 15cm de longueur et un vrai instrument de laparoscopie de 40cm de longueur afin d'observer l'influence que peut avoir la longueur d'un instrument sur la proprioception (Figure 4.2a).

Résultats

Corrélation entre proprioception et performance en laparoscopie

Les scores à l'exercice de pointage en fonction des scores à l'exercice de *"peg transfer"* sont présentés sur la figure 4.3. Le coefficient de corrélation entre le niveau de proprioception des étudiant(e)s et les critères de performance au *"peg transfer"* est de -0.5406 (Figure 4.3a).

Nous remarquons une dispersion importante des sujets pour des scores bas à la tâche de *"peg transfer"*. Pour des scores supérieurs à 1, le coefficient de corrélation entre erreur moyenne et score au *"peg transfer"* est de -0.5804 et la dispersion entre les sujets est plus faible (Figure 4.3b).

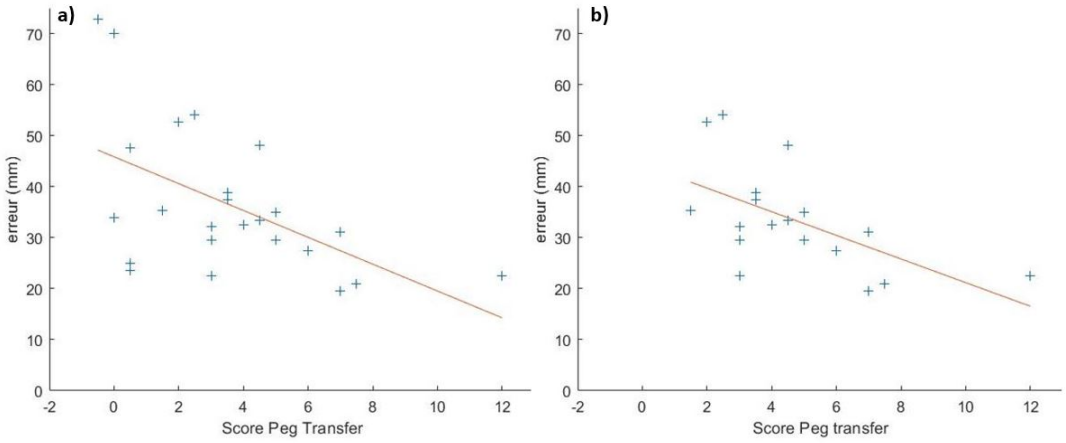

Figure 4.3 – *Courbes de corrélation entre les capacités proprioceptives et les critères de performance d'un exercice de laparoscopie - a) sur tous les scores ; b) score supérieur à 1 à l'exercice de peg transfer.*

Nous avons également tracé la proprioception minimale requise pour un score donné au *"peg transfer"* (Figure 4.4). Cette proprioception minimale requise est caractérisée par la plus grande erreur de pointage relevée pour un score donné au *"peg transfer"*. La corrélation est significative avec un coefficient de corrélation de -0.7905.

Notons enfin que les meilleurs niveaux de proprioception relevés au cours de cette expérience se situent entre 20 et 25 mm d'erreur de pointage. Ces meilleurs niveau de proprioception sont observés pour des scores au peg transfer allant du plus mauvais au meilleur ce qui tend à montrer que la proprioception n'est pas la seule capacité entrant en jeu dans cet exercice.

Influence de la longueur de l'instrument de laparoscopie sur la performance

Les résultats obtenus avec l'instrument de laparoscopie réduit ont été comparés à ceux obtenus avec l'instrument de laparoscopie classique (Figure 4.5). Nous pouvons remarquer que l'erreur, distance entre la pointe de l'instrument et le point cible, est plus faible en moyenne lorsque les sujets pointent avec l'instrument réduit (Figure

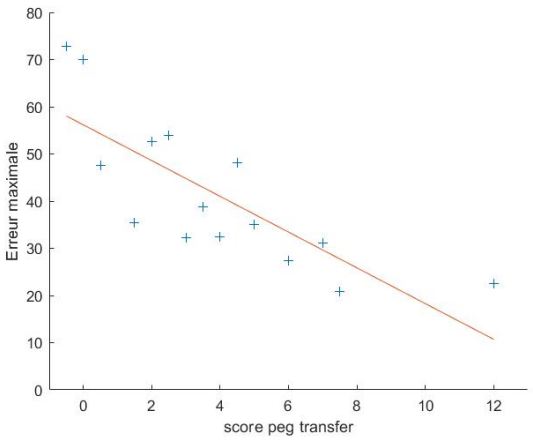

FIGURE 4.4 – *Corrélation proprioception minimale pour un score donné et score au peg transfer*

4.5b). La dispersion entre les sujets est de surcroit plus réduite pour les pointages avec le petit instrument. Cependant, ce résultat n'est pas statistiquement significatif (p=0.1055, test de Wilcoxon) même si la p-valeur reste faible.

En revanche, si on compare les pointages horizontaux entre eux et verticaux entre eux, nous observons une différence significative entre petit et grand instrument pour les pointages verticaux (p=0.00881, test de Wilcoxon) mais pas de différence significative pour les pointages horizontaux (p=0.8286, test de Wilcoxon) (Figure 4.5a).

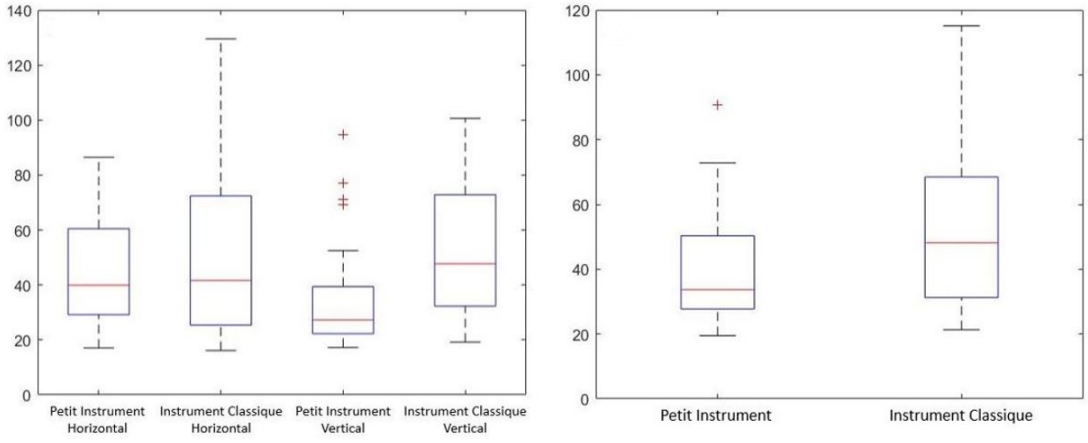

FIGURE 4.5 – *Influence de la longueur d'un instrument de laparoscopie classique sur la proprioception - a) mouvements verticaux et horizontaux dissociés pour les deux instruments ; b) moyenne de l'erreur sur tous les essais avec instrument réduit et classique.*

Discussion

L'expérience que nous avons menée tend à montrer que la proprioception est dans une certaine mesure corrélée à la performance gestuelle en chirurgie laparoscopique, au travers du score obtenu à l'exercice de *"peg transfer"*. Cependant, il faut noter que la dispersion entre les sujets suivant leur proprioception pour les scores bas au *"peg transfer"* est importante. Il apparait donc que certain(e)s étudiant(e)s ayant une bonne proprioception ont pu être géné(e)s par d'autres difficultés comme la représentation spatiale ou l'ambidextrie. Ainsi, la proprioception n'est pas la seule capacité psychomotrice déterminante pour ce genre de tâche.

La corrélation significative entre la proprioception minimale requise pour un score donné au *"peg transfer"* et le score lui-même, nous indique que la proprioception est un facteur limitant la dextérité en laparoscopie. Dans l'optique d'une introduction d'exercices spécifiques à l'amélioration de la proprioception, ce genre de courbes permet de définir le niveau de proprioception attendu en fonction du niveau visé par exemple dans un exercice de *"peg transfer"*. Ces résultats peuvent également servir à définir un ou des scores seuils utilisables dans la constitution de groupes de niveaux [90].

Par ailleurs, la longueur des instruments utilisés semblent avoir une influence sur les capacités proprioceptives car les erreurs de pointage sont beaucoup plus grandes lorsque les sujets pointent avec l'instrument de laparoscopie classique. Nous pouvons observer que la longueur de l'instrument perturbe beaucoup les capacités proprioceptives lorsque les mouvements du bras sont verticaux. L'origine de cette pertubation est peut-être due à une variation posturale, par exemple l'angle du coude, et nécessiterait une étude plus approfondie.

4.2.2 Double-tâche

Figure 4.6 – *Set-up d'évaluation de la double tâche.*

Nous avons eu l'opportunité d'assister à des séances d'entrainement à la chirurgie

laparoscopique à l'école de médecine de la *Pitié-Salpêtrière*. Durant ces sessions d'entrainement, les élèves font face à la superposition de plusieurs niveaux d'exigence à gérer simultanément :

- les difficultés motrices liées au contexte laparoscopique ;
- les exigences de la tâche sous contrainte d'une certaine précision et de rapidité ;
- l'objectif d'apprentissage et d'amélioration des critères de performance (précision, temps d'exécution, etc.).

Concrètement, la situation en cours d'exercice se traduit par une sur-sollicitation du point de vue moteur, sensoriel et cognitif conduisant souvent à des erreurs et des temps d'exécution allongés. Cette sollicitation de l'attention est manifeste, par exemple, lorsque l'étudiant(e) doit réaliser un exercice tout en écoutant les conseils de l'enseignant(e). Il arrive fréquemment que ces conseils ne soient pas compris, ni même entendus.

Dans [96], les auteurs ont réussi à montrer que la capacité à réaliser deux tâches visuelles en même temps était corrélée au niveau d'expérience en laparoscopie (experts versus novices) mais rien n'a été montré en ce qui concerne un éventuel lien avec la courbe d'apprentissage de la chirurgie. Il n'a pas été non plus démontré si, parmi les novices, nous devons nous attendre à une hétérogénéité importante sur cette capacité à réaliser deux tâches simultanées et si cette éventuelle hétérogénéité se reflète dans les performances initiales des individus dans un contexte de laparoscopie.

C'est cette hypothèse que nous avons cherché à valider au travers de l'expérience décrite ci-après. Cette démarche s'inscrit, comme c'était le cas pour la proprioception précédemment, dans la perspective d'intégrer la capacité à réaliser deux tâches simultanément (double-tâche) à un programme personnalisé d'entraînement à la laparoscopie.

Sujets

27 sujets novices en chirurgie laparoscopique ont participé à l'expérience. Le groupe était constitué de 24 hommes et 3 femmes, âgés de 18 à 30 ans.

Les sujets ont été, cette fois-ci encore, recrutés dans l'enceinte du laboratoire et étaient tous différents par rapport aux expériences précédentes.

Protocole

L'expérience se déroule en 2 étapes. Dans un premier temps, les élèves réalisent une tâche de *"peg transfer"* sur un setup d'entrainement classique composé d'un pelvi-trainer, d'une caméra endoscopique, d'un écran et de deux pinces de laparoscopie (Figure 4.1a). La tâche reste inchangée par rapport à celle développée dans le paragraphe sur l'évaluation de la proprioception [29] (4.2.1).

Puis, ils/elles font une deuxième fois l'exercice de *"peg transfer"* mais avec cette fois-ci un deuxième écran où est projetée une scène symbolique interactive, à l'image de celle utilisée dans [96] (Figure 4.6). Cette dernière consiste à faire apparaître sur un fond bleu des carrés blancs, tous de même taille, sur la gauche ou sur la droite de l'écran. Lorsque trois carrés sont alignés en colonne sur la droite, et seulement sur la droite, l'élève doit actionner avec son pied une pédale. L'interface cesse après 5 minutes d'exercice.

Score

Le score aux exercices de *"peg transfer"* est calculé comme précédemment (Figure 4.1c) :

$$Score = N_{posAtteintes} - N_{pièceHorsChamp} - 0.5 \times N_{pièceChamp} - 0.5 \times N_{appuis}.$$

Au "test des carrés", nous avons calculé la sensibilité (S) et la précision (Pr) de la tâche que nous avons ensuite associées :

$$Score = S + Pr = \frac{TP}{P} + \frac{TP}{TP + FP}$$

où P est le nombre total de colonnes apparues sur la droite, celui-ci est constant et vaut 15. TP (*true positive*) est le nombre de fois où l'élève a réussi à détecter une colonne. FP (*false positive*) est le nombre de fois où l'élève a cliqué sur la pédale alors qu'aucune colonne n'était apparue sur la droite.

Ce score est ensuite multiplié par le score obtenu au *"peg transfer"*. Ainsi, si un élève privilégie l'une ou l'autre des tâches, son score en sera significativement impacté.

Résultats et discussion

Les scores moyens obtenus dans le cas de la double tâche sont représentés en fonction des scores obtenus au *"peg transfer"* simple sur la figure 4.7. Nous avons mesuré un coefficient de corrélation de 0.7071 entre ces deux scores. La capacité à gérer une double sollicitation visuelle semble donc corrélée à la dextérité en laparoscopie.

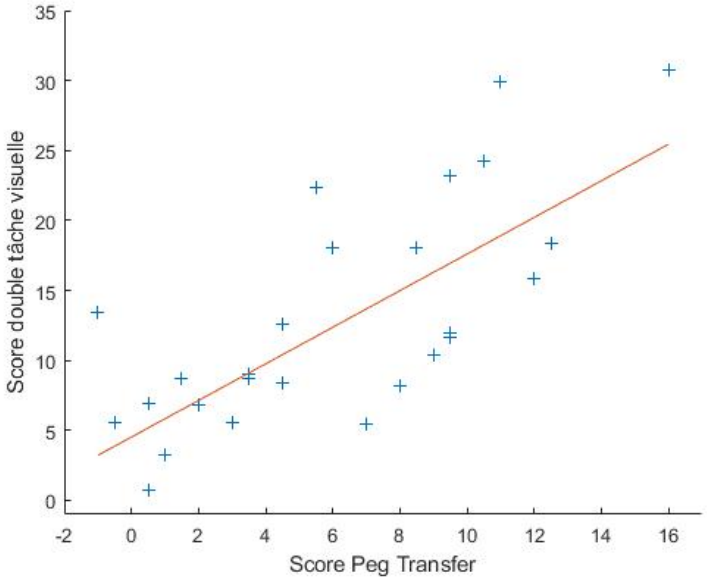

Figure 4.7 – *Courbe de corrélation entre la capacité à traiter deux tâches visuelles en même temps et la performance sur un exercice de laparoscopie.*

4.2.3 Conclusion

Dans le but de développer des entrainements personnalisés au vu des faiblesses de chaque étudiant(e), nous avons étudié la corrélation entre deux capacités psychomotrices et la dextérité en laparoscopie.

Sur une population novice en chirurgie laparoscopique nous avons évalué l'influence de la proprioception et celle de la capacité à faire deux tâches en même temps sur le score à un exercice de laparoscopie (*"peg transfer"*).

La capacité à gérer une double tâche visuelle a montré une bonne corrélation avec le score obtenu au *"peg transfer"*, 0.7071. Il serait intéressant, par la suite, d'étendre cette étude à la gestion simultanée d'un exercice de laparoscopie et d'une seconde sollicitation autre que purement visuelle. Il serait ainsi possible d'estimer chez les novices les liens entre aptitude aux gestes laparoscopiques et capacité à gérer une surcharge cognitive ou motrice par exemple.

Les résultats que nous avons obtenus avec la proprioception sont plus mitigés. Il est apparu que, sur l'ensemble des sujets, la corrélation est de -0.5406 mais que celle-ci passe à -0.5804 si nous considérons seulement les scores supérieurs à 1. La forte dispersion entre sujets pour les scores inférieurs à 1 semble confirmer que la proprioception, bien que nécessaire, ne soit pas la seule capacité psychomotrice impactant les performances dans un exercice d'entraînement à la laparoscopie tel que le *"peg transfer"*. De plus, la bonne corrélation, -0.7905, entre proprioception minimale pour obtenir un certain score au *"peg transfer"* montre que la proprioception est bien une capacité à prendre en compte, chez les novices, pour progresser dans ce genre de tâche.

Le but de cette étude était de vérifier l'intérêt de travailler indépendamment la proprioception et la double-tâche dans le cadre de l'apprentissage du geste en laparoscopie. Comme pour d'autres capacités psychomotrices mis en lumière par la littérature, des exercices spécifiques à ces deux capacités, éventuellement pratiqués en autonomie, permettront :

- d'homogénéiser les groupes d'apprentis vis à vis de ces capacités pré-requises ;
- d'accélérer et rendre plus efficace l'apprentissage lors des séances de cours ;
- d'introduire de la variété dans les programmes de formation et d'augmenter ainsi l'intérêt des apprenants.

4.3 Division des difficultés

Pendant une séance d'entrainement classique, les étudiant(e)s s'exercent sur pelvitrainer dans le but d'accomplir certaines tâches (ex : un nœud de suture). Ils/elles doivent non seulement apprendre comment réaliser un acte médical donné mais également comment gérer les problèmes dus à la laparoscopie elle-même [97][98]. Comme exposé au chapitre 1, comparé à la chirurgie ouverte, les étudiants en laparoscopie sont confrontés à :

1. des instruments d'une longueur d'environ 40cm, ce qui altère la manipulation des objects ;
2. une réduction du mouvement à 4 degrés de liberté (passage au trocart) qui diminue de fait la dextérité, altère les retours haptiques et peut mener à de mauvaises positions des bras ;

3. une vision à deux dimensions de la séquence causant une perte de perception de profondeur et une altération de la coordination main-œil à cause du désalignement (vision indirecte).

Nous souhaitons explorer dans cette partie l'intérêt d'un protocole d'apprentissage en envisageant séparément chacune de ces difficultés, dans une démarche de personnalisation de l'apprentissage et d'appropriation étape par étape de la complexité du geste laparoscopique.

Nous avons pour cela développé un protocole d'entrainement spécifique. En début d'apprentissage, l'étudiant(e) réalise une tâche du "*FLS program*" en conditions de chirurgie ouverte (i.e. : travailler dans un espace ouvert avec une vision 3D et directe ainsi que des instruments courts de 15cm de long). Ensuite, nous introduisons une difficulté à la fois :

— l'utilisation de longs instruments (40 cm),
— la réduction du mouvement à 4 degrés de liberté,
— l'image 2D,
— la vision indirecte.

L'étudiant réalise donc toujours la même tâche, mais à chaque étape une nouvelle difficulté est introduite (Figure 4.8).

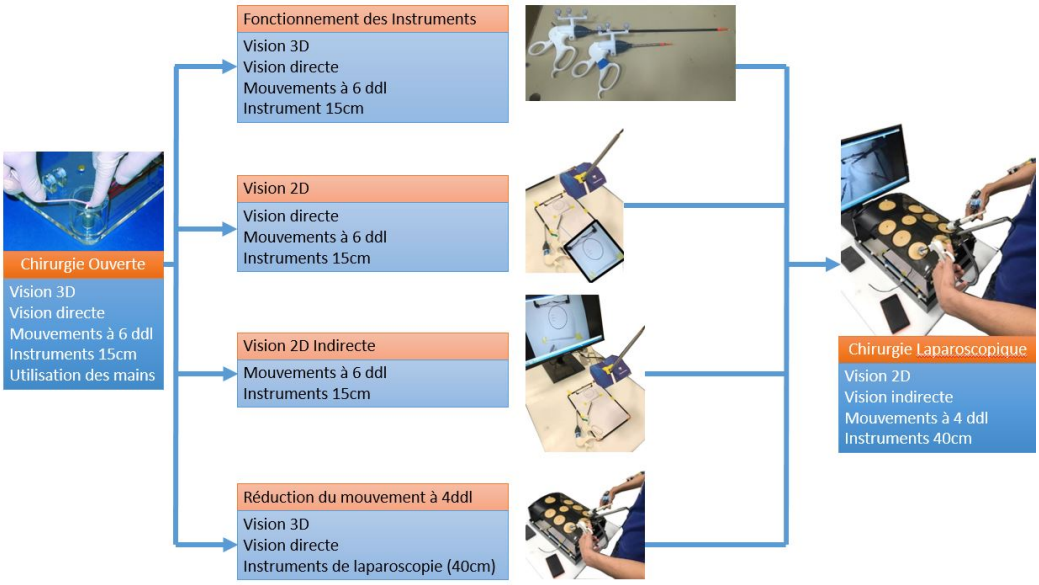

Figure 4.8 – *Etapes de division des difficultés.*

Deux approches permettent de s'entraîner sur ce mode de la décomposition : travailler les difficultés en parallèle ou empiler les difficultés. Nous avons choisi dans un premier temps de travailler les difficultés en parallèle (Figure 4.8) pour :

— limiter le nombre de groupes de sujets (nombreuses combinaisons possibles entre les difficultés si l'on opte pour l'empilement) ;
— cibler spécifiquement les difficultés les unes après les autres ;
— simplifier les exercices pour permettre un meilleur suivi de l'étudiant(e).

Dans l'expérience qui suit, nous avons également tenu compte de l'activité musculaire des sujets à l'aide d'un système d'électrodes de surface tout au long de l'entrainement. Le but était notamment de caractériser le niveau de pénibilité associé à chaque difficulté de la laparoscopie [20][21].

4.3.1 Découpe

Nous avons étudié la division des difficultés sur une tâche du "*Fundamental of laparoscopic surgery (FLS) program*" : la tâche de découpe [29] mise en œuvre également dans le chapitre 3 section 3.3. Les résultats présentés dans cette section s'appuient sur les données obtenues durant le stage ingénieur de Luka Matic.

4.3.2 Matériels et Méthode

Sujets

6 sujets novices en chirurgie laparoscopique ont participé à l'expérience : 4 hommes et 2 femmes, âgés de 22 à 26 ans, tous droitiers, sans aucune base en chirurgie laparoscopique.

Les étudiant(e)s étaient répartis en 2 groupes :

— *Groupe de contrôle (GC)* : les sujets ont suivi une semaine d'entrainement classique à la tâche de découpe ;

— *Groupe avec division des difficultés (GD)* : les sujets ont réalisé 3 essais par séance dont 2 avec seulement 1 difficulté de la chirurgie laparoscopique.

Tâche

La tâche est l'action de découpe étudiée au chapitre 3 section 3.3 (Figure 3.12).

Set-up expérimental

Les étudiants du groupe de contrôle se sont entrainés sur un pelvi-trainer (Szabo-Berci-Sackier Laparoscopic trainer par Karl Storz). Une caméra endoscopique USB permettait d'enregistrer et de projetter la scène opératoire sur un écran face au sujet (Figure 4.9). Chaque sujet avait un ciseau de laparoscopie dans la main droite et une pince de laparoscopie dans la main gauche.

Les étudiants du groupe avec division des difficultés ont eu à leur disposition des instruments de laparoscopie raccourcis (15 cm) lors des séance 1, 2, 3 et 5, ainsi qu'un écran tactile mobile pour les séance 2 et 5 (Tableau 4.1 et figure 4.13).

Système de mesure de l'activité musculaire

L'activité musculaire du bras droit de tous les sujets a été relevée sur tous les essais réalisés à l'aide d'un sytème d'électrodes de surface. Les électrodes ont été placées sur le trapèze, le deltoïde, le biceps, les fléchisseurs, les extenseurs et la loge thénarienne du bras droit (Figure 4.10). Une étude préalable sur 3 sujets nous a permis de constater que l'activité musculaire du triceps est quasi-nulle au cours d'un exercice de découpe.

Figure 4.9 – *Set-up d'entrainement classique à la chirurgie laparoscopique composé d'un pelvi-trainer, d'instruments de laparoscopie, d'un écran 2D face au sujet, et le système d'EMG sur le bras droit du sujet pour mesurer son activité musculaire.*

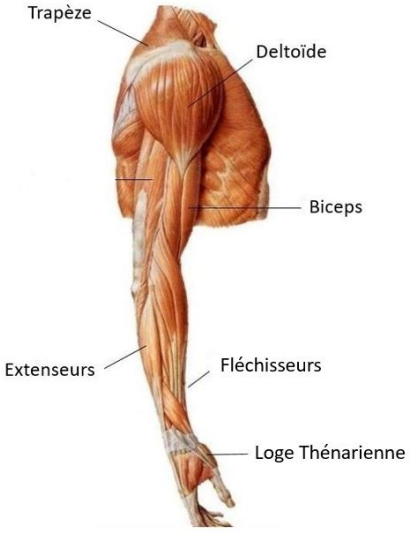

Figure 4.10 – *Muscles dont nous avons étudié l'activité musculaire au cours de l'apprentissage.*

L'électromyogramme (EMG) que nous avons utilisé est un système *Noraxon* et le système de mesure, un *Myo Research XP*. Le signal électrique des fibres musculaires est récupéré par l'intermédiaire d'électrodes et d'émetteurs sans fil. Les électrodes sont placées parallèlement aux fibres de chaque muscle. La fréquence d'échantillonnage est à 1500Hz.

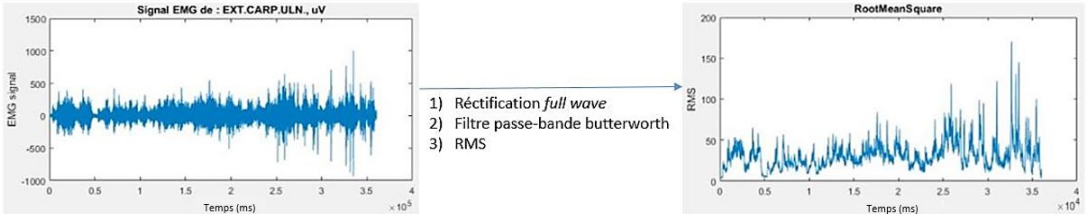

FIGURE 4.11 – Traitement du signal musculaire de l'extenseur.

Nous pouvons voir sur la figure 4.11 (gauche) le signal brut que le capteur reçoit et enregistre. Ce signal est ensuite traité et filtré en post-traitement sous MATLAB. Il subit d'abord une rectification *full-wave*, ie. nous prenons les valeurs absolues du signal entier. Ensuite un filtre passe-bande *butterworth* de 20Hz à 450Hz est appliqué. Enfin, vient l'étape du lissage du signal avec le calcul de la *root mean square* (RMS), ie. le calcul de la valeur efficace du signal. La RMS permet d'avoir une meilleure visualisation de l'amplitude des signaux musculaire et facilite la lisibilité des données extraites. Le principe est de réaliser ce calcul sur un nombre défini de données qu'on appelle des fenêtres.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{n} {a_i}^2}{n}}$$

Ici n représente la taille de la fenêtre et a_i la valeur à l'instant i de l'activité musculaire dans cette fenêtre. Nous avons calculé la RMS par fenêtre glissante de 200ms. Après ce calcul, nous obtenons alors le signal représenté sur la figure 4.11 (droite).

Nous effectuons enfin une normalisation de ce signal par la contraction maximale volontaire (MVC) mesurée pour chaque sujet à chaque début de séance (Figure 4.12).

Protocole

Les 6 étudiant(e)s ont suivi un entrainement d'une semaine comprenant 6 séances de 20 minutes.

Chaque séance comprenait 3 découpes. Le groupe GC réalisait 3 découpes classiques. Le groupe GD réalisait deux découpes en se focalisant sur une difficulté particulière de la chirurgie laparoscopique puis un dernier essai avec toutes les difficultés (*learning*).

Tous les élèves du groupe GD ont suivi le même protocole (Tableau 4.1). A la première séance, ils/elles ont commencé par travailler dans les conditions de la chirurgie ouverte avec des instruments de laparoscopie réduits (Figure 4.13a). Lors de la deuxième séance, nous avons introduit l'absence de perception de profondeur grâce à

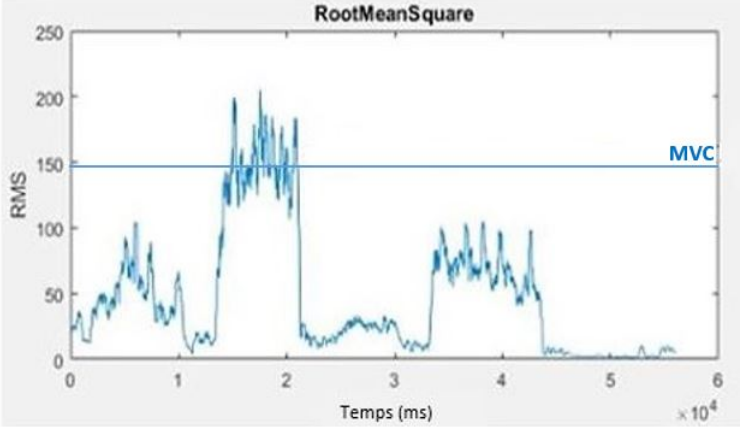

Figure 4.12 – *Contraction maximale volontaire.*

une tablette tactile placée entre les yeux et les mains du sujet (Figure 4.13b). Ensuite, venait l'apprentissage de la coordination main-oeil avec l'écran qui était alors décalé par rapport au sujet (Figure 4.13c). La quatrième séance portait sur la réduction du mouvement à 4 degrés de liberté avec l'introduction du pelvi-trainer dans l'entrainement (Figure 4.13d). A la cinquième séance, les sujets travaillaient la difficulté qui leur avait posé le plus de problèmes lors des séances précédentes, le choix se faisant sur le résultat obtenu au questionnaire de fin de séance (voir ci-après). Enfin, les élèves terminaient avec une séance consacrée à toutes les difficultés (Figure 4.13e).

Tableau 4.1 – *Protocole d'entrainement*

Séance	**Groupe division des difficultés**	**Groupe de contrôle**
1	Découpe et utilisation des instruments de laparoscopie	Exercice complet
2	Vision 2D dans l'axe	Exercice complet
3	Vision 2D désaxée	Exercice complet
4	4 degrés de liberté et inversion des mouvements	Exercice complet
5	Séance adaptée à la difficulté la moins maitrisée	Exercice complet
6	Exercice complet	Exercice complet

Les critères de performance pour qualifier la découpe sont les mêmes que ceux du chapitre 3, section 3.3. Ils comprennent :

— le temps total d'exécution de la tâche (s) : le temps démarre lorsque la pointe du ciseau arrive sur le cercle et s'arrête lorsque le cercle est entièrement découpé,

— l'amplitude de déviation (mm) :

$$AD = (30 - r_{min}) + (r_{max} - 30),$$

— l'aire incorrect (mm^2) :

$$IRA = S_{in} + S_{out},$$

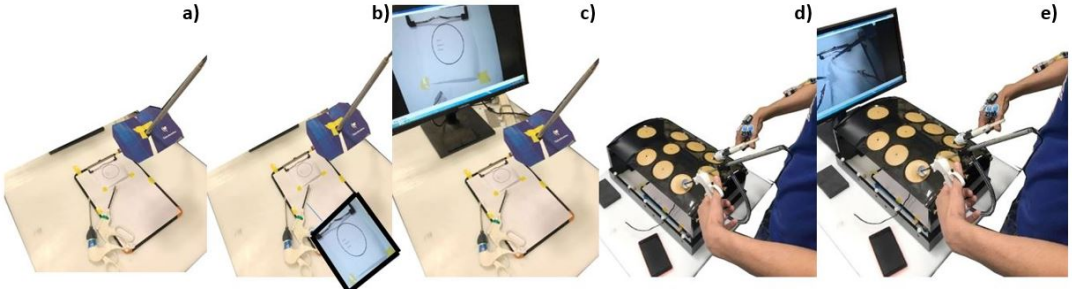

FIGURE 4.13 – *Set-up de chaque séance pour le groupe division des difficultés - a) Séance 1 ; b) Séance 2 ; c) Séance 3 ; d) Séance 4 ; e) Séance 6.*

L'amplitude de déviation (AD) et l'aire incorrecte (IRA) ont été déterminées en post-traitement par analyse d'image à l'aide du même programme décrit dans le chapitre 3 à la section 3.3 (Figure 3.15).

Comme il était demandé aux étudiant(e)s d'être à la fois précis et rapides, nous avons synthétisé, comme au chapitre 3, les critères de performance en un score unique :

$$Score = \frac{(Temps_{norm} + 0.5 \times AD_{norm} + 0.5 \times IRA_{norm})}{2}$$

Ce score s'appuie sur les grandeurs temps, AD et IRA normalisées par rapport au premier essai de chaque sujet (les données des populations sont similaires sur cet essai : p=0.2000 pour le temps, p=0.7000 pour AD et p=0.7000 pour IRA, test de Wilcoxon).

Les courbes d'apprentissage sont par ailleurs comparées à un essai réalisé par un expert dont le score est quant à lui normalisé par la moyenne des premiers essais de tous les sujets. Il correspond à la valeur cible que les sujets doivent tenter d'atteindre en fin d'apprentissage et représente environ 50% de leur score initial (Figure 4.14).

A la fin de chaque séance les étudiants évaluaient la difficulté de l'exercice sur une échelle de 1 à 10.

4.3.3 Résultats

La progression des sujets a été évaluée au regard du score de la tâche de découpe, de l'activité musculaire et des questionnaires de fin de séance.

Courbes d'apprentissage

Le score de découpe correspond au score obtenu sur l'exercice complet, ie. obtenu au dernier essai de chaque séance (*learning*).

Les scores des deux groupes ne semblent pas atteindre de plateau d'apprentissage en fin d'entrainement. Il reste également une marge importante d'amélioration comparée à la valeur cible (Figure 4.14). Cependant, les deux groupes ont clairement amélioré leur performance au cours de l'apprentissage. Le score regroupant le temps et la précision (AD et IRA) a en effet diminué de 20% pour le groupe de contrôle et de 33% pour le groupe division, avec également une dispersion légèrement plus faible des sujets en fin d'apprentissage dans le groupe GD.

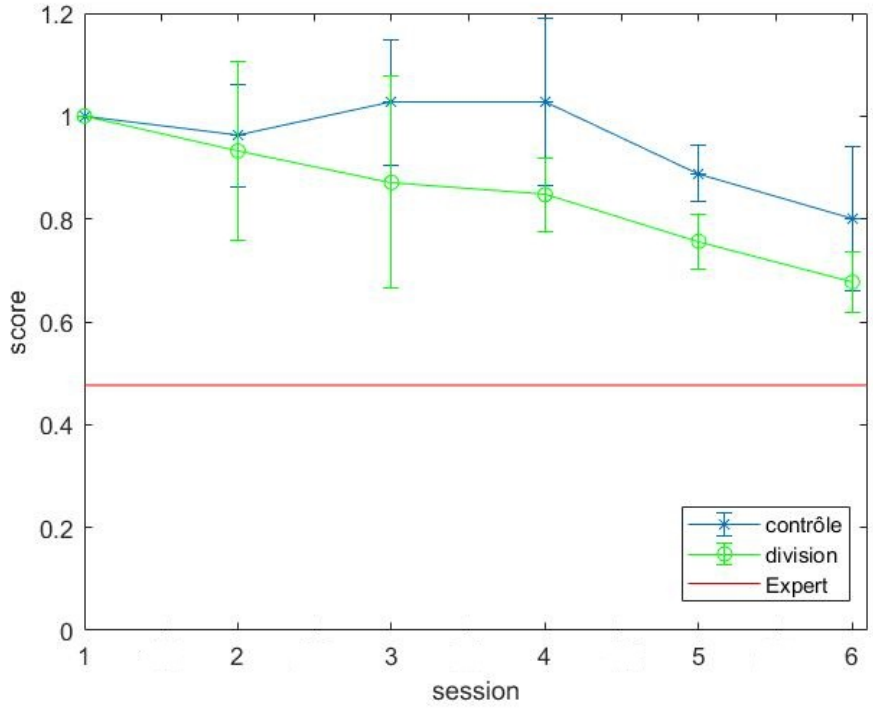

Figure 4.14 – *Score de découpe.*

Le nombre limité de sujets dans chaque groupe (3) ne nous a pas permis de faire une analyse statistique de type ANOVA pour vérifier si les améliorations étaient statistiquement significatives au cours de l'apprentissage.

Etude de l'activité musculaire

A chaque séance, nous avons relevé, sur tous les essais et pour tous les sujets, l'activité musculaire des muscles du bras droit. Pour le groupe de contrôle, la moyenne a été faite sur les 3 essais réalisés pendant la séance (Figure 4.15a). Pour le groupe division des difficultés, nous avons fait la moyenne sur les 2 premiers essais de chaque séance afin d'analyser l'activité musculaire liée à chaque difficulté (Figure 4.15b).

Comme nous pouvons le voir sur la figure 4.15, quel que soit le groupe, les muscles de la loge thénarienne, les extenseurs et les fléchisseurs ont été fortement sollicités tout au long de l'apprentissage. Le trapèze, le biceps et le deltoïd n'ont pas beaucoup été utilisés et ce, tout au long de l'entrainement.

Il n'apparait pas de grands changements dans l'activité musculaire du groupe de contrôle au cours de l'apprentissage (Figure 4.15a). La seule évolution notoire est l'utilisation des muscles de la loge thénarienne (pouce) au cours de l'entrainement. En début d'apprentissage, ces muscles sont très utilisés par les sujets. Puis l'activité baisse fortement lors des séances 3 et 4 ce qui s'accompagne d'une dégradation du score à la tâche de découpe (Figure 4.14). Lors des séances 5 et 6, l'activité ré-augmente légèrement, sans atteindre les pourcentage de début d'apprentissage et le score, lui,

s'améliore.

En ce qui concerne le groupe GD, l'activité des muscles de la loge thénarienne décroît également au cours de l'entrainement (Figure 4.15b). Le trapèze est très peu sollicité lors des 3 premières séances d'entrainement qui correspondent aux séances de travail dans un espace à 6 degrés de liberté. Lors des séances 4 et 6 qui impliquent le trocart (réduction du mouvement à 4 degrés de liberté) l'activité du trapèze est par contre deux fois plus élevée. L'activité du deltoïd est également plus grande lorsque le trocart est présent.

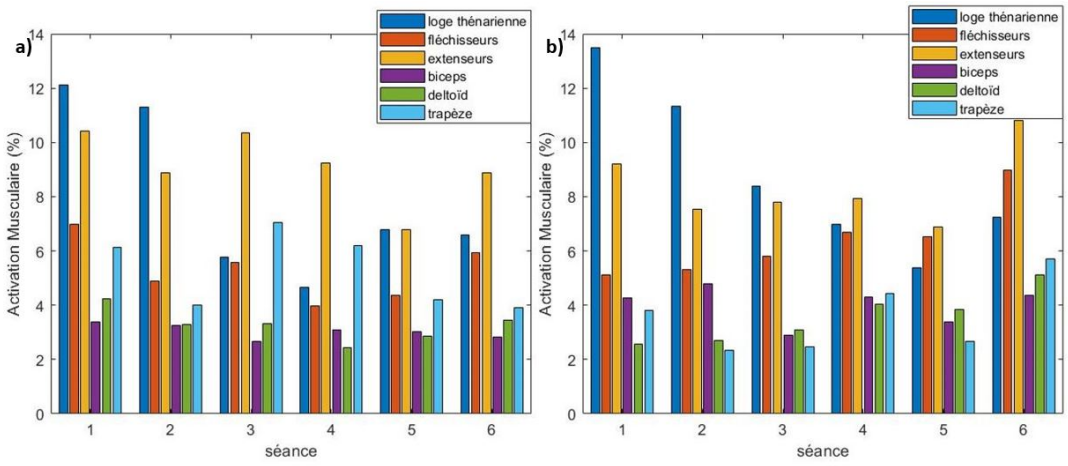

FIGURE 4.15 – *Pourcentage d'activation musculaire à chaque séance - a) groupe de contrôle ; b) groupe division des difficultés.*

Questionnaire

A chaque séance, nous avons demandé aux sujets de noter la difficulté nouvelle sur une échelle de 1 à 10. Le but était d'estimer i) si la tâche de découpe était assimilée au fil des séances ; ii) quelle difficulté est la plus compliquée à surmonter. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.2.

Nous pouvons remarquer que les sujets semblent se familiariser avec la tâche de découpe au fil des séances. Le groupe "division" se familiarise plus rapidement et en fin d'entrainement la tâche leur semble plus facile que pour le groupe de contrôle. La première séance a été jugée la plus difficile. Nous pouvons penser qu'à ce stade les sujets prennaient connaissance de la tâche de découpe et des instruments. C'est la deuxième séance (travail vision 2D) qui, ensuite, leur a semblé la plus ardue. D'ailleurs, tous les sujets du groupe GD ont choisi de retravailler la vision 2D à la séance libre (s5).

4.3.4 Discussion

Dans cette partie, nous avons étudié l'effet de la division des difficultés sur l'apprentissage d'une tâche de laparoscopie. Quatre difficultés ont été ciblées : longueur des instruments, vision 2D, désalignement de la vision et réduction du mouvement à 4 degrés de liberté. Ces difficultés ont été étudiées séparément les unes des autres avant d'être toutes regroupées lors de la dernière séance.

Tableau 4.2 – *Réponses au questionnaire de fin de séance*

Division	Contrôle	Division
	Moyenne (std dev)	Moyenne (std dev)
Séance 1	8.0 (0.0)	8.0 (1.7)
Séance 2	6.3 (2.1)	7.3 (0.6)
Séance 3	7.0 (1.0)	5.7 (1.1)
Séance 4	6.3 (1.1)	5.3 (1.1)
Séance 5	5.3 (1.5)	5.0 (1.0)
Séance 6	5.0 (1.0)	3.3 (1.5)

Malgré l'impossibilité de vérifier si les résultats de cette étude sont statistiquement significatifs, ils semblent tout de même indiquer qu'un apprentissage séparé des difficultés en laparoscopie peut être bénéfique en terme de rapidité de progression des apprentis. A la fin de l'entraînement, le score final du groupe GD est encore relativement éloigné du score de référence. Cependant, une marge de progression semble exister au vu de l'allure de la courbe qui n'a pas atteint de plateau d'apprentissage. Nous constatons par ailleurs que le score moyen dans le groupe division des difficultés présente une tendance à l'amélioration plus continue et plus prononcée au cours des séances que celle du groupe de contrôle.

Le score moyen du groupe de contrôle semble en effet stagner durant les quatre premières séances d'entraînement ce qui représente au total une série de 12 essais de découpe dans des conditions normales d'apprentissage. A partir de la séance 5, la courbe de ce score adopte une pente comparable à celle de la courbe du groupe GD mais avec un écart par rapport à celle-ci qui se maintient à plus de 15% au dessus jusqu'à la fin de l'étude.

Ces différentes observations semblent indiquer que le principal avantage d'une approche progressive des difficultés en laparoscopie est de placer l'étudiant dans une situation plus confortable au début de l'entraînement, lui permettant ainsi de progresser rapidement. Les réponses au questionnaire sur la pénibilité de l'apprentissage vont également dans ce sens.

Sur le plan de la comparaison des difficultés, deux d'entre elles semblent poser davantage de problèmes que les autres. Il semblerait que le passage de la vision 3D à la vision 2D, même sans décalage de point de vue, soit ressenti comme critique puisque tous les sujets du groupe "division" ont choisi de dédier la cinquième séance d'entraînement à cette difficulté déjà travaillée auparavant. L'utilité de cette séance supplémentaire dédiée à la vision 2D semble en outre attestée par l'amélioration significative du score du groupe après-coup.

L'introduction des contraintes cinématiques liées au passage par le trocart conduit à un net ralentissement de la progression du score du groupe "division" (séance 4). On note par ailleurs une activité musculaire accrue au niveau des trapèzes et des deltoïdes à cette occasion et donc potentiellement une apparition de fatigue ou de douleurs au cours de l'entraînement.

4.3.5 Conclusion sur la division des difficultés

Nous avons réalisé une étude préliminaire sur l'intérêt d'aborder les difficultés techniques du geste laparoscopique indépendamment les unes des autres. Cette approche est une contribution à la personnalisation de l'apprentissage dans le sens où elle ouvre la porte à une individualisation encore plus poussée des programmes d'entraînement.

Rappelons que cette étude a une portée limitée du fait du relativement faible nombre de séances et du faible nombre de participants.

De plus, l'analyse de l'activité musculaire est une donnée difficile à évaluer de manière précise. En effet, d'une séance à l'autre, les électrodes ne sont pas positionnées de manière précise au même endroit, l'humidité de la peau peut avoir une incidence sur les signaux reçus et la valeur de contraction maximale, par rapport à laquelle l'activité musculaire est normalisée, varie énormément au fil des séances ce qui rend difficile les comparaisons.

Cependant, cette étude nous a permis de pointer certaines tendances concernant, d'une part, l'accélération de l'apprentissage par la division des difficultés et, d'autre part, certaines difficultés qui semblent plus impactantes que les autres (passage de la vision 3D à la vision 2D et contraintes cinématiques).

4.4 Conclusion du chapitre

Nous avons proposé dans ce chapitre deux solutions pour personnaliser efficacement les séances d'entrainement à la chirurgie laparoscopique.

Nous avons, dans un premier temps, essayé de corréler deux capacités psychomotrices au niveau de performance en laparoscopie dans le but de développer des exercices spécifiques à chaque élève selon ses faiblesses.

Nous avons observé une certaine corrélation de la proprioception avec la performance en laparoscopie sur l'ensemble des sujets. Pour des scores élévés à l'exercice de *"peg transfer"* la dispersion entre les sujets est plutôt faible et la corrélation assez bonne. Il apparait donc que même si la proprioception n'est pas la seule capacité nécessaire pour réussir en laparoscopie, elle est indispensable pour réaliser un geste rapide et précis. La corrélation relativement forte entre la proprioception minimale requise pour atteindre un score donné au *"peg transfer"* et ce score lui-même confirme ce résultat. Nous avons également étudié l'influence de la longueur des instruments de laparoscopie sur la proprioception. Nous avons pu observer que l'instrument de chirurgie perturbe la proprioception notamment dans les mouvements verticaux ce qui montre que la longueur de l'instrument est un paramètre qui mérite d'être pris en compte.

Nous avons étudié la capacité à réaliser deux tâches visuelles simultanément. Cette capacité a été fortement corrélée au niveau de performance des élèves en laparoscopie ce qui montre que la capacité à traiter l'information visuelle n'est pas le même pour tous les élèves et que cette capacité est déterminante pour démarrer en laparoscopie.

Dans un second temps, nous avons étudié les avantages qu'il y a à travailler les difficultés de la laparoscopie indépendamment les unes des autres. Une étude préliminaire sur 6 sujets a été réalisée. Une analyse de l'activité musculaire du bras droit des

sujets a complété cette étude.

A la fin d'une semaine d'entrainement, le groupe division des difficultés a significativement amélioré son score total comparé au groupe de contrôle. Ce score regroupe à la fois le temps total et la précision de la découpe. L'analyse de la courbe d'apprentissage nous amène à penser que la perte de perception de profondeur et la réduction du mouvement à 4 degrés de liberté sont les difficultés les plus ardues à prendre en main. Ainsi, travailler dans un premier temps ces deux difficultés seules semble être une approche intéressante pour accélérer la courbe d'apprentissage.

L'activité musculaire étant un bon indicateur de fatigue, il est intéressant de l'utiliser dans un apprentissage pour prévenir les élèves en cas d'activité trop intense ou inefficace. Ainsi, elle nous a permis d'observer que l'activité des muscles de la loge thénarienne variait beaucoup au cours de l'apprentissage. Il semble que les élèves cherchent à trouver un juste milieu entre sur-utilisation (douleurs musculosquelletiques) et sous-utilisation (gestes moins efficaces) de ces muscles. Les muscles de l'épaule semblent quant à eux subir une sollicitation accrue lors de la réduction du mouvement à 4 degrés de liberté par passage au trocart.

4.5 Perspectives

La personnalisation de l'apprentissage, sous l'angle des capacités psychomotrices individuelles et de la division des difficultés, semble être une solution valable pour améliorer l'apprentissage de la laparoscopie. A l'avenir, nous aimerions développer des exercices spécifiques pour travailler la proprioception et la capacité à réaliser deux tâches en même temps. Il sera intéressant d'étudier en quelle proportion ces exercices doivent être pratiqués pour améliorer la courbe d'apprentissage.

Concernant la division des difficultés, nous souhaitons étudier la manière d'intégrer des exercices propres à la perception de profondeur et au passage à 4 degrés de liberté dans un programme d'apprentissage de la laparoscopie. Il serait également intéressant de tester l'empilement des difficultés. Ajouter une difficulté après une difficulté maitrisée permettrait de travailler les connections entre ces difficultés, et ce, avec une charge cognitive moins élevée.

Enfin, nous souhaiterions faire des études plus fines de l'activité des muscles de la loge thénarienne, du trapèze et du deltoïde afin de mieux conseiller l'élève sur l'utilisation de ces muscles au cours des séances d'entrainement.

Chapitre 5
Conclusions et perspectives

La pratique de la chirurgie laparosopique pose de nombreux problèmes pour le chirurgien et les étudiant(e)s à cause des difficultés mécaniques, visuelles et ergonomiques qu'elle implique. Jusque dans les années 90, la majorité de l'apprentissage se déroulait au bloc opératoire et suivait le paradigme "observe, fait, enseigne". Celui-ci n'est malheureusement plus envisageable dans le cadre de l'apprentissage de la laparoscopie à cause de la vision limitée et l'accès indirect aux organes.

Ainsi, des séances d'entrainement en dehors de la salle d'opération se sont développées. Les étudiant(e)s s'entrainent sur cochons, cadavres et surtout sur simulateurs de laparoscopie. Il en existe deux types, passifs et de réalité virtuelle, le choix du simulateur se faisant sur le type d'exercice pratiqué. Malheureusement, ces séances en dehors du bloc opératoire ne sont pas assez nombreuses et efficaces par rapport aux exigences que requière la chirurgie laparoscopique. Elles sont standardisées et non-adaptées à l'élève. Il y a aussi un manque de retour sur la performance de l'étudiant(e) que ce soit pendant son exercice ou quand celui-ci est terminé. Enfin, de par la configuration de la laparoscopie, le guidage du geste ne se fait généralement que vocalement.

Nous avons présenté dans cette thèse trois pistes possibles adressant l'ensemble de ces problématiques.

Nous avons, dans le chapitre 2, développé une expérience qui utilise un bras robotique pour guider kinesthétiquement les gestes des élèves le long d'une trajectoire. Le guidage kinesthésique consistait à corriger la position de la pointe de l'instrument par une force de type ressort virtuel. Deux groupes ont été impliqués : un groupe de contrôle qui n'avait qu'une information globale sur sa performance en fin d'exercice et un groupe kinésthésique qui recevait le guidage robotique. Les sujets ont appris à suivre une trajectoire pendant 4 séances. Nous avons observé une amélioration dans la vitesse d'exécution du geste et dans la fluidité des mouvements dans le groupe avec retour kinesthésique. Cependant, la précision s'est très peu améliorée au cours de l'entrainement en comparaison au groupe de référence.

Il est possible que le guidage que nous avons mis en place (correctif) soit trop aidant et que les étudiant(e)s aient baissé d'attention au cours des séances d'entrainement. Il serait, par conséquent, intéressant d'étudier dans le futur l'utilisation d'un guidage correctif plus individualisé, en diminuant le coefficient de raideur par exemple, pour

que l'étudiant(e) soit de plus en plus actif. L'apprentissage par amplification d'erreur est également à envisager une fois que l'élève a les bases nécessaires à la réussite d'un exercice.

L'utilisation de retours multi-sensoriels, de types visuels ou vibro-tactiles, semble être également une solution pour corriger les élèves en temps réel et les garder actifs tout au long de l'entrainement. Nous avons développé dans le chapitre 3 deux expériences allant dans ce sens.

Dans un premier temps, les élèves ont appris la même trajectoire que celle développée dans le chapitre 2. Trois groupes ont cette fois-ci été impliqués :

— groupe de contrôle, retour global sur la performance en fin d'exercice ;
— groupe visuel, la trajectoire cible pouvait être projetée sur l'image endoscopique ;
— groupe vibro-tactile, un moteur vibrant placé sur l'index vibrait en cas de déviation par rapport à la trajectoire cible.

Il est apparu que le retour tactile améliorait la précision du geste et la confiance en soi des sujets en comparaison du groupe de référence et du groupe avec retour visuel.

Dans une seconde expérience, 6 sujets se sont entrainés sur une tâche bimanuelle du *FLS program* qui est la découpe. Un groupe de référence a été comparé à un groupe avec retour vibro-tactile. Le retour vibratoire a permis, cette fois-ci, d'améliorer la précision et la vitesse d'exécution des gestes.

Il serait intéressant d'étudier dans une expérience future si la combinaison des deux retours, visuel et tactile, améliore la performance en combinant les avantages des deux aides. Comme pour le guidage kinesthésique, la diminution de l'aide au cours de l'entrainement est à envisager pour que les élèves parviennent à d'avantage d'autonomie.

La standardisation des séances d'entrainement peut constituer un problème. Au chapitre 4, nous avons exploré des pistes pour personnaliser les séances d'entrainement au regard des capacités psychomotrices des sujets et de leur aptitude à appréhender plus ou moins bien telle ou telle difficulté sensori-motrice de la laparoscopie.

Ainsi, dans un premier temps, nous avons essayé de corréler le niveau de performance sur une tâche du *"FLS program"* à la proprioception et la capacité à réaliser deux tâches en même temps. Les deux capacités sont apparues nécessaires à l'exercice proposé. Il serait intéressant dans la suite d'envisager la prise en compte effective de ces capacités, ainsi que celles relevées dans la littérature, dans la mise en oeuvre des entrainements à la laparoscopie. Cela passe, par exemple, par la détermination de seuils sur ces capacités pour la constitution de groupes homogènes d'apprentis ou par la question des proportions dans lesquelles des exercices spécifiques aux capacités doivent être pratiqués pour améliorer la courbe d'apprentissage.

Dans un second temps, nous avons étudié les avantages à travailler les difficultés de la laparoscopie indépendamment les unes des autres. Une étude préliminaire sur 6 sujets a été réalisée. Ils/elles se sont entrainés sur la même tâche de découpe que celle du chapitre 3. A la fin d'une semaine d'entrainement, le groupe avec la division des difficultés a significativement amélioré son score total, temps et précision combinés, comparé au groupe de contrôle. L'analyse de la courbe d'apprentissage nous amène à penser que la perte de perception de profondeur et la réduction du mouvement à 4 degrés de liberté sont les difficultés les plus ardues à prendre en main dans le contexte

de la laparoscopie. Ainsi, travailler dans un premier temps ces deux difficultés seules semble être une approche prometteuse pour accélérer la courbe d'apprentissage.

Il faut noter cependant que tous les sujets impliqués dans nos études ont été recrutés dans l'enceinte du laboratoire. Ainsi, ils/elles n'ont pas eu les mêmes motivations que des internes à l'école de médecine, d'autant plus que cette expérience demandait au sujets de revenir à plusieurs reprises. Nous avons jusqu'à présent seulement évalué la dextérité du geste mais il serait intéressant d'évaluer par la suite l'état d'esprit des sujets à chaque séance (motivation, fatigue, etc.) car celui-ci peut avoir une influence sur les résultats. De plus, ces expériences ont été réalisées en salle expérimentale dans un cadre non isolé, les sujets ont alors pu être déconcentrés par les allées et venues. Dans le cadre de prochaines expériences, il serait donc intéressant d'évaluer ces différents paramètres [107].

Il se pourrait également que nous ayons surestimé l'importance du critère temps dans nos évaluations. A l'avenir, nous pourrions définir un nouveau score avec un poids moins élevé pour le temps au profit de la précision.

Un autre facteur important à évaluer dans les prochaines expériences est l'acceptation du retour sensoriel par le sujet. En effet, il est apparu au cours de nos études que certains élèves ont eu une mauvaise interprétation spatiale du retour visuel et que les vibrations sont parues pour certains désagréables et tout cela a pu avoir une incidence sur leurs performances.

Le matériel utilisé a également pu avoir une influence sur nos résultats en terme de précision. L'Haption Virtuose 3D^{TM} [108], le système NDI Polaris^{TM} [109] et la Leap Motion [110] ont une précision d'un millimètre. De plus, nos études statistiques choisies ont été réalisées sur peu de sujets, il serait intéressant de renforcer nos résultats avec plus de recrutements.

A plus long terme, nous souhaitons continuer à explorer le thème de l'aide robotique à la chirurgie laparoscopique suivant plusieurs axes.

Nous souhaitons tout d'abord exploiter les résultats de ce travail de thèse en mettant en place de nouvelles campagnes de test. Ces campagnes porteraient sur les solutions de retours proposées aux chapitres 2 et 3 et concerneraient, cette fois-ci, une population d'internes motivés, sur une tâche plus réaliste et sur un nombre de séances plus important. La présence d'un enseignant expert pourrait modifier les courbes d'apprentissage, notamment en terme de différence entre les groupes. En effet, les consignes communiquées jusqu'à présent avaient seulement portées sur la dextérité et non sur comment améliorer le geste. Il faudra également revoir nos techniques d'évaluation. En effet, l'utilisation du système optique de détection de position, NDI Polaris^{TM}, devient compliquée à cause de possibles occlusions et à l'évaluation de plusieurs set-up simultanément.

Nous souhaitons également explorer davantage les outils de la robotique actuelle et en particulier le traitement d'information avancé et l'intelligence artificielle. Une thèse, démarrée il y a un an dans le laboratoire, porte sur la reconnaissance, l'analyse et l'évaluation automatique des gestes chirurgicaux pour l'aide à l'apprentissage..

Il serait par ailleurs intéressant d'étudier nos outils sur d'autres techniques d'entrainement. Par exemple, une nouvelle collaboration avec l'école de médecine de Paris

V nous donne accès à un simulateur de réalité virtuelle avec retour d'effort que nous pourrions coupler avec nos techniques de guidage sensoriel.

Enfin, nous pourrions tester nos méthodes sur d'autres types de chirurgie. Une thèse commencée cette année porte sur les différences en apprentissage de deux dispositifs d'assistance robotisée à la chirurgie par cœlioscopie (comanipulation vs téléopération).

Annexe A

Questionnaire

Tableau A.1 – *Questionnaire de fin de séance*

Questions	Pas du tout d'accord **(1)**	Pas d'accord **(2)**	Neutre **(3)**	D'accord **(4)**	Très d'accord **(5)**
Q1 : Est-ce que le retour vous a aidé ?					
Q2 : Est-ce que le retour vous a dérangé ?					
Q3 : Est-ce que le retour a aidé à mieux réaliser et comprendre la tâche ?					
Q4 : Est-ce que vous pensez vous être amélioré au cours de cette séance ?					
Q5 : Est-ce que la tâche vous est apparue difficile ?					

Annexe B

Liste de publications

1. Candalh-Touta, N. and Szewczyk, J., How can we improve the Training of Laparoscopic Surgery thanks to the Knowledge in Robotics ?, 15th International Conference on Education and Information Systems, Technologies and Applications. pp.137. 2017.
2. Candalh-Touta, N. and Szewczyk, J., Is proprioception a key sensory modality to be successful in laparoscopy training ?, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery. Vol.12, pp.S132. 2017.
3. Candalh-Touta, N., Poignet, P. and Szewczyk, J., Can Multi-Sensory Feedbacks Improve Laparoscopic Surgery Training ?. Surgetica. 2017.

Bibliographie

[1] Hasegawa, H., Kabeshima, Y., Watanabe, M., Yamamoto, S., and Kitajima, M., Randomized controlled trial of laparoscopic versus open colectomy for advanced colorectal cancer. Surgical Endoscopy and Other Interventional Techniques. 17(4), 636-640. 2003. *Cité page 1*

[2] Li, J., Ji, Z., and Li, Y., Comparison of laparoscopic versus open procedure in the treatment of recurrent inguinal hernia : a meta-analysis of the results. The American Journal of Surgery. 207(4), 602-612. 2014. *Cité page 1*

[3] Ding, J., Xia, Y., Liao, G. Q., Zhang, Z. M., Liu, S., Zhang, Y., and Yan, Z. S., Hand-assisted laparoscopic surgery versus open surgery for colorectal disease : a systematic review and meta-analysis. The American Journal of Surgery. 207(1), 109-119. 2014. *Cité page 1*

[4] http://longislandsurgery.org/laparoscopic.html *Cité page 2*

[5] Xin, H., Zelek, J. S., and Carnahan, H., Laparoscopic surgery, perceptual limitations and force : A review. In First Canadian student conf. on biomedical computing. Vol. 144. 2006. *Cité page 2*

[6] Hemal, A. K., Srinivas, M., and Charles, A. R., Ergonomic problems associated with laparoscopy. Journal of endourology. 15(5), 499-503. 2001. *Cité page 2*

[7] Quinn, D., and Moohan, J., The trainees' pain with laparoscopic surgery : what do trainees really know about theatre set-up and how this impacts their health. Gynecological Surgery. 12(1), 71-76. 2015. *Cité page 2*

[8] Elhage, O., Challacombe, B., Shortland, A., and Dasgupta, P., An assessment of the physical impact of complex surgical tasks on surgeon errors anddiscomfort : a comparison between robot-assisted, laparoscopic and open approaches. BJU international. 115(2), 274-281. 2015. *Cité page 2*

[9] Hemal, A. K., Srinivas, M., and Charles, A. R., Ergonomic problems associated with laparoscopy. Journal of endourology. 15(5), 499-503. 2011. *Cité page 2*

[10] Davidson, P. M., The surgeon for the future and implications for training. ANZ journal of surgery. 72(11), 822-828. 2002. *Cité page 2*

[11] Zahiri, H. R., Park, A. E., Pugh, C. M., Vassiliou, M., and Voeller, G., "See one, do one, teach one" : inadequacies of current methods to train surgeons in hernia repair. Surgical endoscopy. 29(10), 2867-2872. 2015. *3 citations pages 3, 5, et 10*

[12] Carlsen, C. G., Lindorff-Larsen, K., Funch-Jensen, P., Lund, L., Morcke, A. M., Ipsen, M., and Charles, P., Is current surgical training efficient ? Anational survey. Journal of surgical education. 71(3), 367-374. 2014. *2 citations pages 3 et 10*

[13] Figert, P. L., Park, A. E., Witzke, D. B., and Schwartz, R. W., Transfer of training in acquiring laparoscopic skills. Journal of the American College of Surgeons. 193(5), 533-537. 2001. *Cité page 3*

[14] Bökeler, U., Schwarz, J., Bittner, R., Zacheja, S., and Smaxwil, C., Teaching and training in laparoscopic inguinal hernia repair (TAPP) : impact of the learning curve on patient outcome. Surgical endoscopy. 27(8), 2886-2893. 2013. *3 citations pages 3, 4, et 10*

[15] Barrie, J., Jayne, D. G., Wright, J., Murray, C. J. C., Collinson, F. J., and Pavitt, S. H., Attaining surgical competency and its implications in surgical clinical trial design : a systematic review of the learning curve in laparoscopic and robot-assisted laparoscopic colorectal cancer surgery. Annals of surgical oncology. 21(3), 829-840. 2014. *Cité page 4*

[16] Voitk, A. J., Tsao, S. G., and Ignatius, S., The tail of the learning curve for laparoscopic cholecystectomy. The American Journal of Surgery. 182(3), 250-253. 2001. *5 citations pages ix, 3, 4, 9, et 10*

[17] Kim, S. Y., Hong, S. G., Roh, H. R., Park, S. B., Kim, Y. H., and Chae, G. B., Learning curve for a laparoscopic appendectomy by a surgical trainee. Journal of the Korean Society of Coloproctology. 26(5), 324-328. 2010. *Cité page 4*

[18] Abboudi, H., Khan, M. S., Guru, K. A., Froghi, S., Win, G., Van Poppel, H., and Ahmed, K., Learning curves for urological procedures : a systematic review. BJU international,. 114(4), 617-629. 2014. *3 citations pages ix, 4, et 7*

[19] Watson, D. I., Baigrie, R. J., and Jamieson, G. G., A learning curve for laparoscopic fundoplication. Definable, avoidable, or a waste of time ?. Annals of surgery. 224(2), 198. 1996. *Cité page 4*

[20] Nomi, T., Fuks, D., Kawaguchi, Y., Mal, F., Nakajima, Y., and Gayet, B., Learning curve for laparoscopic major hepatectomy. BJS. 102(7), 796-804. 2015. *2 citations pages 4 et 68*

[21] Kravetz, A. J., Iddings, D., Basson, M. D., and Kia, M. A., The learning curve with single-port cholecystectomy. JSLS : Journal of the Society of Laparoendoscopic Surgeons. 13(3), 332. 2009. *2 citations pages 4 et 68*

[22] Simons, A. J., Anthone, G. J., Ortega, A. E., Franklin, M., Fleshman, J., Geis, W. P., and Beart, R. W., Laparoscopic-assisted colectomy learning curve. Diseases of the colon and rectum. 38(6), 600-603. 1995. *2 citations pages 4 et 9*

[23] Moore, M. J., and Bennett, C. L., The learning curve for laparoscopic cholecystectomy. The American journal of surgery. 170(1), 55-59. 1995. *Cité page 4*

[24] Scott, D. J., Bergen, P. C., Rege, R. V., Laycock, R., Tesfay, S. T., Valentine, R. J., and Jones, D. B., Laparoscopic training on bench models : better and more cost effective than operating room experience ? 1. Journal of the American College of Surgeons. 191(3), 272-283. 2000. *4 citations pages 3, 6, 7, et 8*

[25] Babineau, T. J., Becker, J., Gibbons, G., Sentovich, S., Hess, D., Robertson, S., and Stone, M., The cost of operative training for surgical residents. Archives of surgery. 139(4), 366-370. 2004. *Cité page 3*

[26] Andreatta, P. B., Woodrum, D. T., Birkmeyer, J. D., Yellamanchilli, R. K., Doherty, G. M., Gauger, P. G., and Minter, R. M., Laparoscopic skills are improved with LapMentor^{TM} training : results of a randomized, double-blinded study. Annals of surgery. 243(6), 854. 2006. *3 citations pages 5, 6, et 7*

[27] Peters, J. H., Fried, G. M., Swanstrom, L. L., Soper, N. J., Sillin, L. F., Schirmer, B., and Sages FLS Committee., Development and validation of a comprehensive program of education and assessment of the basic fundamentals of laparoscopic surgery. Surgery Journal. 135(1), 21-27. 2004. *Cité page 5*

[28] Martin, J. A., Regehr, G., Reznick, R., Macrae, H., Murnaghan, J., Hutchison, C., and Brown, M., Objective structured assessment of technical skill (OSATS) for surgical residents. British journal of surgery. 84(2), 273-278. 1997. *Cité page 5*

[29] Fundamentals of Laparoscopic Surgery. FLS Manual Skill Written Instructions and Performance guidelines. (https://www.flsprogram.org/wp-content/uploads/2014/03/Revised-Manual-Skills-Guidelines-February-2014.pdf). 2014. *9 citations pages 5, 10, 19, 46, 54, 58, 59, 64, et 68*

[30] Madan, A. K., Harper, J. L., Taddeucci, R. J., and Tichansky, D. S., Goal-directed laparoscopic training leads to better laparoscopic skill acquisition. Surgery. 144(2), 345-350. 2008. *2 citations pages 5 et 8*

[31] Grantcharov, T. P., Kristiansen, V. B., Bendix, J., Bardram, L., Rosenberg, J., and Funch-Jensen, P., Randomized clinical trial of virtual reality simulation for laparoscopic skills training. British Journal of Surgery. 91(2), 146-150. 2004. *Cité page 5*

[32] Korndorffer, J. R., Dunne, J. B., Sierra, R., Stefanidis, D., Touchard, C. L., and Scott, D. J., Simulator training for laparoscopic suturing using performance goals translates to the operating room. Journal of the American College of Surgeons. 201(1), 23-29. 2005. *Cité page 6*

[33] Sackier, J. M., Berci, G., and Paz-Partlow, M., A new training device for laparoscopic cholecystectomy. Surgical endoscopy. 5(3), 158-159. 1991. *pas de citations*

[34] Ahlberg, G., Enochsson, L., Gallagher, A. G., Hedman, L., Hogman, C., McClusky, D. A., and Arvidsson, D., Proficiency-based virtual reality training significantly reduces the error rate for residents during their first 10 laparoscopic cholecystectomies. The American journal of surgery. 193(6), 797-804. 2007. *Cité page 6*

[35] Korndorffer, J. R., Hayes, D. J., Dunne, J. B., Sierra, R., Touchard, C. L., Markert, R. J., and Scott, D. J., Development and transferability of a cost-effective laparoscopic camera navigation simulator. Surgical Endoscopy And Other Interventional Techniques. 19(2), 161-167. 2005. *Cité page 6*

[36] Seymour, N. E., Gallagher, A. G., Roman, S. A., O'brien, M. K., Bansal, V. K., Andersen, D. K., and Satava, R. M., Virtual reality training improves operating room performance : results of a randomized, double-blinded study. Annals of surgery. 236(4), 458. 2002. *Cité page 6*

[37] Diesen, D. L., Erhunmwunsee, L., Bennett, K. M., Ben-David, K., Yurcisin, B., Ceppa, E. P., and Pryor, A., Effectiveness of laparoscopic computer simulator versus usage of box trainer for endoscopic surgery training of novices. Journal of surgical education. 68(4), 282-289. 2011. *Cité page 7*

[38] Munz, Y., Kumar, B. D., Moorthy, K., Bann, S., and Darzi, A., Laparoscopic virtual reality and box trainers : is one superior to the other ?. Surgical endoscopy and other interventional techniques. 18(3), 485-494. 2004. *Cité page 7*

[39] Vitish-Sharma, P., Knowles, J., and Patel, B., Acquisition of fundamental laparoscopic skills : is a box really as good as a virtual reality trainer ?. International Journal of Surgery. 9(8), 659-661. 2011. *Cité page 7*

[40] Youngblood, P. L., Srivastava, S., Curet, M., Heinrichs, W. L., Dev, P., and Wren, S. M., Comparison of training on two laparoscopic simulators and assessment of skills transfer to surgical performance. Journal of the American College of Surgeons. 200(4), 546-551. 2005. *3 citations pages 6, 7, et 57*

[41] Tanoue, K., Ieiri, S., Konishi, K., Yasunaga, T., Okazaki, K., Yamaguchi, S., and Hashizume, M., Effectiveness of endoscopic surgery training for medical students using a virtual reality simulator versus a box trainer : a randomized controlled trial. Surgical endoscopy. 22(4), 985-990. 2008. *Cité page 7*

[42] Menachery, E. P., Wright, S. M., Howell, E. E., and Knight, A. M., Physician-teacher characteristics associated with learner-centered teaching skills. Medical teacher. 30(5), 137-144. 2008. *Cité page 8*

[43] Hamdorf, J. M., and Hall, J. C., Acquiring surgical skills. British Journal of Surgery. 87(1), 28-37. 2000. *Cité page 8*

[44] Engels, P. T., and de Gara, C., Learning styles of medical students, general surgery residents, and general surgeons : implications for surgical education. BMC medical education. 10(1), 51. 2010. *Cité page 8*

[45] McClusky, D. A., Ritter, E. M., Lederman, A. B., Gallagher, A. G., and Smith, C. D., Correlation between perceptual, visuo-spatial, and psychomotor aptitude to duration of training required to reach performance goals on the MIST-VR surgical simulator. The American Surgeon. 71(1), 13-21. 2005. *Cité page 8*

[46] Van Veelen, M. A., Kazemier, G., Koopman, J., Goossens, R. H. M., and Meijer, D. W., Assessment of the ergonomically optimal operating surface height for laparoscopic surgery. Journal of laparoendoscopic and advanced surgical techniques. 12(1), 47-52. 2002. *Cité page 8*

[47] Rogers, D. A., Regehr, G., Yeh, K. A., and Howdieshell, T. R.,Computer-assisted Learning versus a Lecture and Feedback Seminar for Teaching a Basic Surgical Technical Skill 1. The American Journal of Surgery. 175(6), 508-510. 1998. *Cité page 8*

[48] McClusky III, D. A., and Smith, C. D., Design and development of a surgical skills simulation curriculum. World journal of surgery. 32(2), 171-181. 2008. *Cité page 9*

[49] Reznick, R. K., and MacRae, H. (2006). Teaching surgical skills—changes in the wind. New England Journal of Medicine, 355(25), 2664-2669. *Cité page 9*

[50] Campbell, J., Tirapelle, L., Yates, K., Clark, R., Inaba, K., Green, D., and Sullivan, M., The effectiveness of a cognitive task analysis informed curriculum to increase self-efficacy and improve performance for an open cricothyrotomy. Journal of surgical education. 68(5), 403-407. 2011 *2 citations pages 9 et 10*

[51] Ericsson, K. A., Deliberate practice and acquisition of expert performance : a general overview. Academic Emergency Medicine. 15(11), 988-994. 2008. *Cité page 9*

[52] Krebs, H. I., Palazzolo, J. J., Dipietro, L., Ferraro, M., Krol, J., Rannekleiv, K., and Hogan, N., Rehabilitation robotics : Performance-based progressive robot-assisted therapy. Autonomous robots. 15(1), 7-20. 2003. *Cité page 9*

[53] Riener, R., Nef, T., and Colombo, G., Robot-aided neurorehabilitation of the upper extremities. Medical and biological engineering and computing. 43(1), 2-10. 2005. *2 citations pages 9 et 14*

[54] Velmahos, G. C., Toutouzas, K. G., Sillin, L. F., Chan, L., Clark, R. E., Theodorou, D., and Maupin, F., Cognitive task analysis for teaching technical skills in an inanimate surgical skills laboratory. The American Journal of Surgery. 187(1), 114-119. 2004. *Cité page 10*

[55] Levinson, K. L., Barlin, J. N., Altman, K., and Satin, A. J., Disparity between resident and attending physician perceptions of intraoperative supervision and education. Journal of graduate medical education. 2(1), 31-36. 2010. *Cité page 10*

[56] Chapman, C. D., Heath, M. D., Westwood, D. A., and Roy, E. A., Memory for kinesthetically defined target location : evidence for manual asymmetries. Brain and cognition. 46(1-2), 62-66. 2001. *2 citations pages 13 et 37*

[57] Chellali, A., Dumas, C., and Milleville-Pennel, I., WYFIWIF : A haptic communication paradigm for collaborative motor skills learning. In Web Virtual Reality and Three-Dimensional Worlds 2010, IADIS. 301-308. 2010. *3 citations pages 14, 18, et 29*

[58] Teo, C. L., Burdet, E., and Lim, H. P., A robotic teacher of Chinese handwriting. 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, HAPTICS 2002, IEEE, Proceedings. 335-341. 2002. *Cité page 15*

[59] Bluteau, J., Coquillart, S., Payan, Y., and Gentaz, E., Haptic guidance improves the visuo-manual tracking of trajectories. PLoS One. 3(3), 1775. 2008. *Cité page 15*

[60] Liu, J., Cramer, S. C., and Reinkensmeyer, D. J., Learning to perform a new movement with robotic assistance : comparison of haptic guidance and visual demonstration. Journal of neuroengineering and rehabilitation. 3(1), 20. 2006. *Cité page 15*

[61] Lüttgen, J., and Heuer, H., The influence of haptic guidance on the production of spatio-temporal patterns. Human movement science. 31(3), 519-528. 2012. *Cité page 15*

[62] Gillespie, R. B., O'Modhrain, M., Tang, P., Zaretzky, D., and Pham, C., The virtual teacher. In Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division, American Society of Mechanical Engineers. Vol. 64, 171-178. 1998. *Cité page 15*

[63] Feygin, D., Keehner, M., and Tendick, R., Haptic guidance : Experimental evaluation of a haptic training method for a perceptual motor skill. 10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, HAPTICS 2002, IEEE, Proceedings. 40-47. 2002. *7 citations pages 15, 18, 29, 44, 45, 54, et 55*

[64] Bayart, B., Pocheville, A., and Kheddar, A., An adaptive haptic guidance software module for i-touch : example through a handwriting teaching simulation and a 3d maze. International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and Their Applications, IEEE. 6-pp. 2005. *3 citations pages 16, 17, et 29*

[65] Reinkensmeyer, D. J., and Patton, J. L., Can robots help the learning of skilled actions ?. Exercise and sport sciences reviews. 37(1), 43. 2009. *Cité page 16*

[66] Milot, M. H., Marchal-Crespo, L., Green, C. S., Cramer, S. C., and Reinkensmeyer, D. J., Comparison of error-amplification and haptic-guidance training techniques for learning of a timing-based motor task by healthy individuals. Experimental brain research. 201(2), 119-131. 2010. *3 citations pages 17, 30, et 55*

[67] Proietti, T., Guigon, E., Roby-Brami, A., and Jarrassé, N., Modifying upper-limb inter-joint coordination in healthy subjects by training with a robotic exoskeleton. Journal of neuroengineering and rehabilitation. 14(1), 55. 2017. *Cité page 17*

[68] Cao, C., MacKenzie, C., and Payandeh, S., Task and motion analyses in endoscopic surgery. In Proceedings ASME Dynamic Systems and Control Division. 583-590. 1996. *Cité page 19*

[69] Howard, T., and Szewczyk, J., Visuo-haptic feedback for 1-D Guidance in laparoscopic surgery. In 5th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, IEEE. 58-65. 2014. *Cité page 29*

[70] Kahn, L. E., Rymer, W. Z., and Reinkensmeyer, D. J. (2004). Adaptive assistance for guided force training in chronic stroke. In Engineering in Medicine and Biology Society, 2004. IEMBS04. 26th Annual International Conference of the IEEE. Vol. 1, 2722-2725. 2004. *7 citations pages 17, 30, 34, 35, 37, 48, et 55*

[71] Sigrist, R., Rauter, G., Riener, R., and Wolf, P., Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning : a review. Psychonomic bulletin and review. 20(1), 21-53. 2013. *2 citations pages 30 et 55*

[72] Proietti, T., Jarrassé, N., Roby-Brami, A., and Morel, G., Adaptive control of a robotic exoskeleton for neurorehabilitation. In Neural Engineering (NER), 7th International IEEE/EMBS Conference on. 803-806. 2015. *Cité page 30*

[73] Sienko, K. H., Balkwill, M. D., Oddsson, L. I. E., and Wall, C., Effects of multidirectional vibrotactile feedback on vestibular-deficient postural performance during continuous multi-directional support surface perturbations. Journal of Vestibular Research. 18(5,6), 273-285. 2008. *Cité page 31*

[74] Kapur, P., Jensen, M., Buxbaum, L. J., Jax, S. A., and Kuchenbecker, K. J., Spatially distributed tactile feedback for kinesthetic motion guidance, In Haptics Symposium, 2010 IEEE. 519-526. 2010. *Cité page 32*

[75] Jansen, C., Oving, A., and van Veen, H. J., Vibrotactile movement initiation, In Proceedings of Eurohaptics. 110-117. 2004. *Cité page 32*

[76] Wang, F., Barkana, D. E., and Sarkar, N., Impact of visual error augmentation when integrated with assist-as-needed training method in robot-assisted rehabilitation. IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation engineering. 18(5), 571-579. 2010. *2 citations pages 32 et 44*

[77] Van Der Linden, J., Schoonderwaldt, E., Bird, J., and Johnson, R., Musicjacket combining motion capture and vibrotactile feedback to teach violin bowing. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 60(1), 104-113. 2011. *Cité page 33*

[78] Spelmezan, D., Jacobs, M., Hilgers, A., and Borchers, J., Tactile motion instructions for physical activities. In Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems, ACM. 2243-2252. 2009. *2 citations pages 33 et 34*

[79] Van Erp, J. B., Saturday, I., and Jansen, C., Application of tactile displays in sports : where to, how and when to move. In Proc. Eurohaptics. 105-109. 2006. *2 citations pages 33 et 34*

[80] Nakamura, A., Tabata, S., Ueda, T., Kiyofuji, S., and Kuno, Y., Multimodal presentation method for a dance training system. In CHI'05 extended abstracts on Human factors in computing systems, ACM. 1685-1688. 2005. *2 citations pages 33 et 35*

[81] Ruffaldi, E., Filippeschi, A., Frisoli, A., Sandoval, O., Avizzano, C. A., and Bergamasco, M., Vibrotactile perception assessment for a rowing training system. In EuroHaptics Conference, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, World Haptics 2009, IEEE. 350-355. 2009. *Cité page 34*

[82] Bluteau, J., Dubois, M. D., Coquillart, S., Gentaz, E., and Payan, Y., Vibrotactile guidance for trajectory following in computer aided surgery. In Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2010 Annual International Conference of the IEEE. 2085-2088. 2010. *2 citations pages 34 et 35*

[83] Vera, A. M., Russo, M., Mohsin, A., and Tsuda, S., Augmented reality telementoring (ART) platform : a randomized controlled trial to assess the efficacy of a new surgical education technology. Surgical endoscopy. 28(12), 3467-3472. 2014. *2 citations pages 34 et 35*

[84] Botden, S. M., de Hingh, I. H., and Jakimowicz, J. J., Suturing training in augmented reality : gaining proficiency in suturing skills faster. Surgical endoscopy. 23(9), 2131-2137. 2009. *Cité page 35*

[85] https://www.precisionmicrodrives.com/product/307-100-9mm-vibration-motor-25mm-type *2 citations pages 37 et 48*

[86] Howard, T., and Szewczyk, J., Assisting Control of Forces in Laparoscopy Using Tactile and Visual Sensory Substitution. In New Trends in Medical and Service Robots. 151-164. 2016. *Cité page 37*

[87] Maschuw, K., Osei-Agyemang, T., Weyers, P., Danila, R., Dayne, K. B., Rothmund, M., and Hassan, I., The impact of self-belief on laparoscopic performance of novices and experienced surgeons. World journal of surgery. 32(9), 1911-1916. 2008. *Cité page 45*

[88] Keehner, M. M., Tendick, F., Meng, M. V., Anwar, H. P., Hegarty, M., Stoller, M. L., and Duh, Q. Y., Spatial ability, experience, and skill in laparoscopic surgery. The American Journal of Surgery. 188(1), 71-75. 2004. *2 citations pages 57 et 58*

[89] Gupta, R., Guillonneau, B., Cathelineau, X., Baumert, H., and Vallencien, G., In vitro training program to improve ambidextrous skill and reduce physical fatigue during laparoscopic surgery : preliminary experience. Journal of endourology. 17(5), 323-325. 2003. *2 citations pages 57 et 58*

[90] Stefanidis, D., Korndorffer, J. R., Black, F. W., Dunne, J. B., Sierra, R., Touchard, C. L., and Scott, D. J. (2006). Psychomotor testing predicts rate of skill acquisition for proficiency-based laparoscopic skills training. Surgery, 140(2), 252-262. *3 citations pages 57, 58, et 63*

[91] Arora, S., Sevdalis, N., Aggarwal, R., Sirimanna, P., Darzi, A., and Kneebone, R., Stress impairs psychomotor performance in novice laparoscopic surgeons. Surgical endoscopy. 24(10), 2588-2593. 2010. *2 citations pages 57 et 58*

[92] Jerosch, J., and Prymka, M., Proprioception and joint stability. Knee surgery, sports traumatology, arthroscopy. 4(3), 171-179. 1996. *Cité page 58*

[93] Vercher, J. L., Gauthier, G. M., Guedon, O., Blouin, J., Cole, J., and Lamarre, Y., Self-moved target eye tracking in control and deafferented subjects : roles of arm motor command and proprioception in arm-eye coordination. Journal of Neurophysiology. 76(2), 1133-1144. 1996. *Cité page 58*

[94] Wilson, M., McGrath, J., Vine, S., Brewer, J., Defriend, D., and Masters, R., Psychomotor control in a virtual laparoscopic surgery training environment : gaze control parameters differentiate novices from experts. Surgical endoscopy. 24(10), 2458-2464. 2010. *Cité page 59*

[95] Balke, M., Liem, D., Dedy, N., Thorwesten, L., Balke, M., Poetzl, W., and Marquardt, B., The laser-pointer assisted angle reproduction test for evaluation of proprioceptive shoulder function in patients with instability. Archives of orthopaedic and trauma surgery. 131(8), 1077-1084. 2011. *Cité page 59*

[96] Stefanidis, D., Scerbo, M. W., Korndorffer, J. R., and Scott, D. J., Redefining simulator proficiency using automaticity theory. The American Journal of Surgery. 193(4), 502-506. 2007. *Cité page 64*

[97] Wickens, C. D., Multiple resources and performance prediction. Theoretical issues in ergonomics science. 3(2), 159-177. 2002. *Cité page 66*

[98] Nagy, A. G., Hierarchical decomposition of laparoscopic procedures. Medicine Meets Virtual Reality : The Convergence of Physical and Informational Technologies : Options for a New Era in Healthcare. 62, 83. 1999. *Cité page 66*

[99] Berguer, R., Forkey, D. L., and Smith, W. D., The effect of laparoscopic instrument working angle on surgeons' upper extremity workload. Surgical endoscopy. 15(9), 1027-1029. 2001. *pas de citations*

[100] Uhrich, M. L., Underwood, R. A., Standeven, J. W., Soper, N. J., and Engsberg, J. R., Assessment of fatigue, monitor placement, and surgical experience during simulated laparoscopic surgery. Surgical endoscopy. 16(4), 635-639. 2002. *pas de citations*

[101] Judkins, T. N., Oleynikov, D., Narazaki, K., and Stergiou, N., Robotic surgery and training : electromyographic correlates of robotic laparoscopic training. Surgical Endoscopy And Other Interventional Techniques. 20(5), 824-829. 2006. *pas de citations*

[102] Kita, K., Kato, R., Yokoi, H., and Arai, T., Analysis of skill acquisition process : A case study of arm reaching task. Robotics and Autonomous Systems. 57(2), 167-171. 2009. *pas de citations*

[103] Wei, S. H., Chiang, J. Y., Shiang, T. Y., and Chang, H. Y., Comparison of shock transmission and forearm electromyography between experienced and recreational tennis players during backhand strokes. Clinical Journal of Sport Medicine. 16(2), 129-135. 2006. *pas de citations*

[104] Reiley, C. E., Lin, H. C., Yuh, D. D., and Hager, G. D., Review of methods for objective surgical skill evaluation. Surgical endoscopy. 25(2), 356-366. 2011. *pas de citations*

[105] FLS Expanded Video Tutorial Series : Task 2 - Pattern Cut (https://www.youtube.com/watch?v=mUBZoSO3KA8) *Cité page 46*

[106] Rosser, J. C., Lynch, P. J., Cuddihy, L., Gentile, D. A., Klonsky, J., and Merrell, R., The impact of video games on training surgeons in the 21st century. Archives of surgery, 142(2), 181-186. 2007. *Cité page 46*

[107] Maschuw, K., Osei-Agyemang, T., Weyers, P., Danila, R., Dayne, K. B., Rothmund, M., and Hassan, I., The impact of self-belief on laparoscopic performance of novices and experienced surgeons. World journal of surgery, 32(9), 1911-1916. 2008. *Cité page 81*

[108] Haption Virtuose 3D^{TM} Documentation (https://www.haption.com/fr/products-fr/virtuose-3d-fr.html) *Cité page 81*

[109] NDI Polaris^{TM} Documentation (https://www.ndigital.com/medical/products/polaris-family/) *Cité page 81*

[110] Leap Motion Documentation (https://developer.leapmotion.com/documentation/) *Cité page 81*