



## AVERTISSEMENT

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

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

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

Contact : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

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

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

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



**Ecole Doctorale BioSE (Biologie-Santé-Environnement)**

**Thèse**

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE**

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

par **Song XU**

**Impact du délai de transmission des informations en  
téléchirurgie & formation en chirurgie robotique : travaux  
réalisés sur les simulateurs robotiques en réalité virtuelle**

Soutenue le 23/07/2015

**Membres du jury :**

Rapporteurs : Professeur Luc CORMIER, CHU de Dijon, Département d'Urologie, Dijon, France (Président)

Professeur Alexandre de la TAILLE, CHU Mondor, Département d'Urologie, Créteil, France

Examineur : Madame Sandrine VOROS, Laboratoire TIMC-IMAG, Faculté de Médecine, La Tronche, France

Directeur de thèse : Professeur Jacques HUBERT, CHU de Nancy & Université de Lorraine

Co-directeur de thèse : Docteur Manuela PEREZ, CHU de Nancy & Université de Lorraine

---

**Laboratoire Imagerie Adaptive Diagnostique et Interventionnelle  
CHU de Nancy-Brabois, 5 rue du Morvan, 54511 Vandoeuvre-lès-Nancy**



## REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à adresser mes remerciements à Pr Jacques Hubert, pour son encadrement et son aide pendant ces quatre années d'étude. Je le remercie pour son encouragement et pour m'avoir fait la confiance. Il m'a donné des opportunités pour avancer mon travail, mes connaissances, mes capacités et aussi ma carrière. Je tiens à exprimer mon admiration pour son enthousiasme et sa gentillesse, et aussi pour ses compétences professionnelles tant dans sa spécialité que dans la recherche. Souvent avec lui, je me sens la confiance et la puissance. Il aura toujours ma profonde gratitude et mon profond respect.

Je tiens à remercier Dr Manuela Perez, ma co-directrice de thèse, pour m'avoir encadré et m'avoir approuvé tout au long de ces quatre années. Avec son aide et ses idées et conseils toujours disponibles, et ainsi que sa supervision, je suis arrivé à avancer petit à petit pendant la thèse. Je tiens à exprimer mon admiration pour son enthousiasme, sa gentillesse, son efficacité et ses réalisations professionnelles. Je tiens et tiendrai mon estime et mon profond respect pour elle.

Je tiens également à remercier Pr Jacques Felblinger pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire IADI. Je lui remercie pour son aide généreuse et ses conseils précieux. J'admire beaucoup sa sincérité et gentillesse, les qualités spécialement précieuses en tant qu'un directeur et un professeur. Je tiens aussi à exprimer mon admiration et mon profond respect pour son efficacité et son professionnalisme.

Je tiens à remercier Pr Alexandre de la Taille et Pr Luc Cormier pour avoir accepté de juger ce travail en qualité de rapporteur.

Je tiens à remercier Madame Sandrine Voros pour avoir suivi mon travail en qualité de rapporteur (du comité de suivi de thèse) et pour avoir accepté de juger ce travail en qualité d'examineur.

Je remercie Dr Cyril Perrenot pour m'avoir beaucoup aidé dans mon travail et surtout dans l'étude de validation du XTT. C'était avec lui que je me suis initié au simulateur robotique.

Je remercie tous mes collègues et amis du laboratoire IADI : Damien, Romain, Yu, Lin, Jie, Bailiang, Freddy, Aboubaker, Pierre-André, Oliver, Sarra, Crystophe, Marine, Céline, Jessica...

Je remercie Dr Nguyen Tran et tous ses collègues dans l'Ecole de Chirurgie de Nancy pour m'avoir soutenu dans mon travail. Merci pour Antoine Chalon pour son aide lors de la panne du XTT.

Je remercie Jean-Pierre Henry, Alexandre Thouroude et Erwan De Penfentenyo du STAN Institute de Nancy pour m'avoir aidé pendant le DIU de chirurgie robotique.

Je remercie Rick Corlett, Todd Larson et Andreas Koch du Mimic Technologies des Etats-Unis pour leur aide concernant les simulateurs robotiques.

Merci à tous mes amis chinois en France pour m'avoir accompagné et m'avoir aidé pendant ces dernières années : Chongsheng, Fengwei, Yihua, Zhe, Zhen, Ganggang, Chaohua, Yong, Huili, Qian, Gaili, Feng, Min, Jing, Yingying, Lu, Xiaomeng, Yu...

Merci à notre pays qui nous a soutenus pour notre étude en France.

Merci à tous les autres que je ne peux citer tant la liste est longue, mais que je n'oublie pas.

En fin, toujours merci à mes parents et mes sœurs pour leur amour inestimable et leur soin et soutien. Merci à ma femme, qui m'a accompagné, soutenu et encouragé, pour ses efforts dans notre vie ensemble. Je tiendrai toujours à son amour précieux.

## **PREAMBULE**

Le concept de téléchirurgie a été proposé en 1972 et a bénéficié de progrès remarquables dans les années 1980. Le premier prototype de robot téléchirurgical a ensuite été développé en 1991. D'autre part, la chirurgie mini-invasive (CMI) a explosé à la fin des années 1980 avec des avantages spécifiques comparée à la chirurgie ouverte. Cependant, la CMI laparoscopique présente aussi quelques inconvénients dus à la limitation inhérente de cette technologie. Afin de renforcer la capacité des chirurgiens dans la chirurgie laparoscopique, les chercheurs ont combiné la conception de la CMI et de la téléchirurgie robotique, et ils ont finalement développé et commercialisé les robots chirurgicaux qui possèdent simultanément la fonction de téléchirurgie et de CMI. Depuis, les robots ont été introduits en clinique et sont couramment utilisés en chirurgie appelée robot-assistée. Par ailleurs, la recherche en téléchirurgie se poursuit continuellement.

Techniquement, la limitation principale de la téléchirurgie est le délai de communication inhérent à la transmission des données sur le réseau et au traitement des images. La désynchronisation entre le mouvement de la main des chirurgiens et le feed-back des images peut dégrader les performances chirurgicales. Il est donc important de clarifier l'impact du délai sur la gestuelle chirurgicale et également d'apprécier la capacité des chirurgiens à s'adapter au délai avant la mise en œuvre clinique de la téléchirurgie. Malheureusement, peu de données précises et fiables sont à disposition afin d'évaluer l'impact du délai, et peu d'études ont étudié le potentiel d'adaptation des chirurgiens et leur capacité à se former au délai.

L'introduction du robot en chirurgie a créé de nouvelles exigences en termes d'éducation chirurgicale qui, du fait de l'expansion rapide de cette technologie n'a que tardivement été prise en compte par les chercheurs et enseignants. La formation en chirurgie robotique utilisant des robots est coûteuse et difficilement envisageable dans une grande majorité de centres. Un moyen valide et pratique avec un bon rapport temps/coût-efficacité est donc indispensable pour apprendre la chirurgie robotique. La simulation en réalité virtuelle présente le meilleur potentiel pour répondre à ces besoins. Cependant, les simulateurs robotiques actuellement disponibles sur le marché fournissent peu d'exercices reproduisant une réelle procédure chirurgicale. Ils sont généralement utilisés pour la formation technique de base. D'autre part, en chirurgie robotique, le chirurgien n'a pas d'accès direct au patient, et l'aide fournie par son assistant est importante et parfois cruciale dans ces procédures.

Cependant, actuellement on n'accorde pas une attention suffisante à la formation et la certification des assistants.

L'objectif de cette étude est donc, d'une part, de déterminer l'impact du délai sur la performance chirurgicale et l'effet de la formation téléchirurgicale sur des délais différents, et d'autre part, de valider le rôle du simulateur robotique dans la formation en chirurgie robotique et de trouver un moyen de manière à mieux utiliser le simulateur pour la formation à des procédures robotiques spécifiques.

Ce travail est composé de trois parties. Dans la partie 1, nous développerons le contexte de la recherche dans deux chapitres : le chapitre I sur la chirurgie robotique et le chapitre II sur la téléchirurgie. Dans la partie 2, nous présenterons les quatre études que nous avons réalisées sur deux sujets : le sujet I concernant l'impact du délai en téléchirurgie, et le sujet II concernant la formation en chirurgie robotique. Dans la partie 3, nous tiendrons des conclusions pour toutes les études et développerons des perspectives.

# TABLE DES MATIERES

<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....	4
<b>PARTIE 1 : CONTEXTE</b> .....	5
<b>I - Chirurgie robotique</b> .....	6
I.1 - Histoire des robots chirurgicaux .....	6
I.1.1 - Étymologie .....	6
I.1.2 - Premiers robots modernes .....	6
I.1.3 - Évolution de la laparoscopie vers la chirurgie robotique .....	8
<i>I.1.3.1 - Chirurgie laparoscopique</i> .....	8
<i>I.1.3.2 - Développement des robots chirurgicaux de téléprésence</i> .....	11
I.2 - Robot da Vinci® .....	14
I.2.1 - Caractéristiques techniques .....	14
<i>I.2.2.1 - Structure du système</i> .....	14
<i>I.2.2.2 - Scène chirurgicale</i> .....	16
I.2.2 - Avantages et inconvénients .....	16
I.2.3 - Dissémination .....	18
I.2.4 - Application en clinique .....	19
<i>I.2.4.1 - Expansion dans divers spécialités</i> .....	19
<i>I.2.4.3 - Evènements indésirables</i> .....	22
<i>I.2.4.3 - Problèmes médico-légaux</i> .....	23
I.3 - Formation en chirurgie robotique .....	24
I.3.1 - Etat des lieux .....	24
I.3.2 - DIU de chirurgie robotique .....	26
<i>I.3.2.1 Etablissement du programme</i> .....	26
<i>I.3.2.2 Didactique</i> .....	27
<i>I.3.2.3 Simulation en réalité virtuelle</i> .....	28
<i>I.3.2.4 Microchirurgie</i> .....	29
<i>I.3.2.5 Exercices sur matériel inanimé et sur tissus</i> .....	29
<i>I.3.2.6 Exercices sur animaux et sur cadavres</i> .....	30
I.3.3 - Formation clinique .....	30

I.3.3.1	<i>Observation</i>	30
I.3.3.2	<i>Assistance au chevet du patient</i>	30
I.3.3.3	<i>Pratique à la console</i>	31
I.3.3.4	<i>Courbe d'apprentissage</i>	31
I.4	Simulateurs robotiques	32
I.4.1	Systèmes disponibles	32
I.4.2	Simulateur dVT	34
I.4.2.1	<i>Modules d'exercices</i>	34
I.4.2.2	<i>Système de notation</i>	36
I.4.2.3	<i>Xperience™ Team Trainer</i>	37
II	Téléchirurgie	39
II.1	Histoire du développement	39
II.1.1	Définition	39
II.1.2	Avantages	39
II.1.3	Brève histoire	40
II.2	Défis de la téléchirurgie	45
II.2.1	Aspects techniques	45
II.2.2	Aspects non-techniques	47
II.3	Délai en téléchirurgie	48
II.3.1	Origine	48
II.3.2	Impact	49
II.3.2.1	<i>Expérimentations en laboratoire « humide »</i>	49
II.3.2.2	<i>Expérimentations en laboratoire « sec »</i>	50
II.3.3	Contrôle de l'impact du délai	53
<b>PARTIE 2 : TRAVAUX REALISES</b>		55
Objectifs		56
Sujet I - Impact du delai en téléchirurgie		57
I.1	Impact du délai sur la performance chirurgicale	57
I.1.1	Organisation de l'étude	57
I.1.2	Publication	58
I.1.3	Résultats principaux et conclusions	72

I.2 - Effet de l'entraînement au délai .....	73
I.2.1 - Organisation de l'étude .....	73
I.2.2 - Publication.....	74
I.2.3 - Résultats principaux et conclusions .....	85
Sujet II - Formation en chirurgie robotique .....	86
II.1 - Curriculum de chirurgie robotique en RV.....	86
II.1.1 - Organisation de l'étude .....	86
II.1.2 - Publication .....	88
II.1.3 - Résultats principaux et conclusions .....	99
II.2 - Validation du simulateur XTT .....	100
II.2.1 - Organisation de l'étude .....	100
II.2.2 - Manuscrit .....	102
II.2.3 - Résultats principaux et conclusions .....	119
III - Etudes comme coauteur.....	120
III.1 - Etude comme deuxième auteur .....	120
III.2 - Etude comme troisième auteur .....	121
<b>PARTIE 3 : CONCLUSIONS</b> .....	122
Conclusions.....	123
Perspectives.....	125
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	127
<b>LISTE DES PUBLICATIONS</b> .....	136
<b>RESUME</b> .....	138

## LISTE DES ABREVIATIONS

CMI	Chirurgie Mini-invasive
CSTAR	<i>Canadian Surgical Technologies and Advanced Robotics</i> (Centre Canadien de Technologies Chirurgicales et de Robotique de Pointe)
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Administration</i> (Agence Américaine pour les Projets de Recherche Avancée de Défense)
ddl	Degrés de Liberté
dVSS	da Vinci® Skills Simulator™
dVT	dV-Trainer®
EM	Économie du Mouvement
FDA	<i>Food and Drug Administration</i> (Administration Américaine des Aliments et des Médicaments)
FLS	<i>Fundamentals of Laparoscopic Surgery</i> (Principes Fondamentaux de Chirurgie Laparoscopique)
FRS	<i>Fundamentals of Robotic Surgery</i> (Principes Fondamentaux de Chirurgie Robotique)
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> (Administration Nationale de l'Aéronautique et de l'Espace)
RNIS	Réseau Numérique à Intégration de Services
RoSS	<i>Robotic Surgery Simulator</i> ®
RV	Réalité Virtuelle
SEP	<i>SimSurgery Educational Platform</i> ®
SRI	<i>Stanford Research Institute</i> (Institut de Recherche de Stanford)
TATRC	<i>Telemedicine &amp; Advanced Technology Research Center</i> (Centre de la Télémédecine et de la Recherche d'Technologie Avancée)
TRT	Temps de Réalisation de la Tâche
XTT	<i>Xperience</i> ™ Team Trainer

## **PARTIE 1 : CONTEXTE**

---

*Dans cette partie, nous développerons le contexte de la recherche dans deux chapitres : le chapitre I sur la chirurgie robotique et le chapitre II sur la téléchirurgie.*

# **I - Chirurgie robotique**

## **I.1 - Histoire des robots chirurgicaux**

### **I.1.1 - Étymologie**

Un robot est par définition un dispositif automatique qui exécute les fonctions attribuées normalement à l'homme ou d'une machine sous la forme d'un être humain [1]. Le terme « robot » vient du mot tchèque « *robota* » qui signifie corvée ou travail forcé, il a été initialement utilisé par l'écrivain tchèque Karel Čapek pour les besoins de sa pièce de théâtre *Rossumovi Univerzální Roboti* (R.U.R) écrite en 1920 et jouée pour la première fois en 1921 [2]. Bien que Karel Čapek soit souvent considéré comme l'inventeur du mot, il a lui-même désigné son frère Josef, peintre et écrivain, comme étant l'inventeur réel du mot. Le terme « robotique » est dérivé de « robot », il se rapporte à l'étude et à l'utilisation des robots. Le mot a été utilisé pour la première fois par Isaac Asimov, écrivain américain né en Russie, dans son récit de science-fiction *Menteur*, publié en 1941. Asimov est surtout connu par ses trois lois de la robotique [3].

Bien que appelé « robot », le système utilisé en chirurgie robotique est plutôt un télémanipulateur, qui signifie des bras robotisés commandés à distance par un opérateur qui est posté derrière un écran de contrôle.

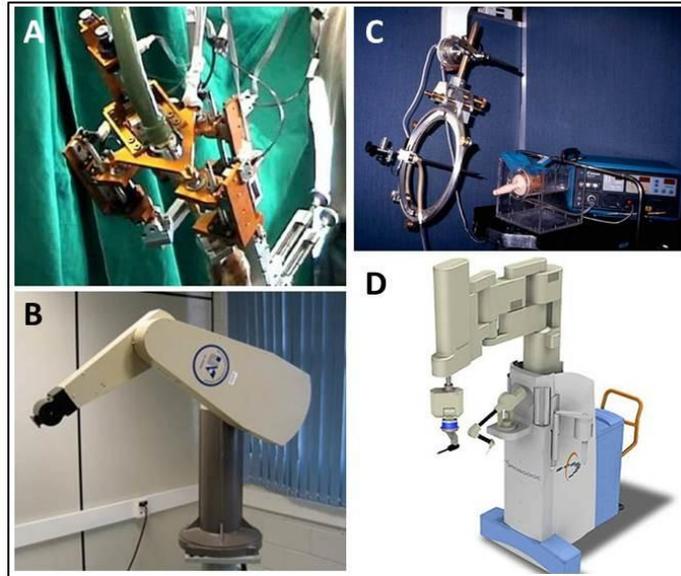
### **I.1.2 - Premiers robots modernes**

Le développement de robots pratiques est un phénomène récent qui se concentre sur des manipulateurs non-anthropomorphes. Les premiers manipulateurs industriels programmables ont été développés dans les années 1940. George Devol, qui est considéré comme le père du robot, a développé un contrôleur de processus magnétique qui pourrait être utilisé pour gérer ces premières machines robotisées [4]. L'avancement de la technologie informatique a promu le développement de la robotique. En 1954, Devol a fait breveter le premier manipulateur à mémoire de lecture. Cet événement pourrait bien marquer le début de l'ère robotique moderne. Le dispositif de Devol était capable du mouvement point-à-point et était le précurseur des dispositifs utilisés par l'industrie d'aujourd'hui. En 1961, Engelberger a formé une entreprise appelée *Unimation* et a commencé la production commerciale de robots pour l'industrie [4].

Le développement du robot était souvent motivé par le besoin de manipuler des objets dangereux, comme des matériels toxiques ou radioactifs. Dans les années 1940, des manipulateurs à distance, ou des systèmes de téléopérateur, ont commencé à apparaître. Face au besoin de réaliser des tâches complexes avec la technologie existante, ces dispositifs ont été contrôlés par les humains. En utilisant des dispositifs d'affichage visuels et tactiles pour permettre aux humains de voir et de sentir les tâches à distance qu'ils ont exécutées, ces systèmes ont fournis aux opérateurs humains des dispositifs d'entrée de « maître » pour faciliter l'exécution de tâches complexes à une certaine distance de sécurité [5]. Dès lors, les robots ont été utilisés dans l'industrie pour toutes sortes de tâches allant du soudage à l'arc à l'assemblage de dispositifs électroniques complexes. Les applications ont dépassé le domaine industriel et se sont développés dans d'autres domaines tels que l'agriculture, l'exploration spatiale, l'armée, l'exploration océanographique, l'éducation, et maintenant la chirurgie [6].

Le premier robot utilisé en chirurgie était l'Arthrobot, conçu pour faciliter des procédures orthopédiques, et utilisé pour la première fois à Vancouver, Canada en 1983 [7] (Figure 1A). En 1985, le Puma 560, un bras robotique industriel, a été utilisé par le professeur japonais San Kwoh afin de placer une aiguille pour une biopsie de cerveau [8] (Figure 1B). Le même système a été utilisé trois ans plus tard pour effectuer une résection trans-urétrale de la prostate (RTUP) par Davies et ses collègues [9]. Ce système n'était pas devenu un outil de choix pour la RTUP à cause de mauvaises capacités d'imagerie à ultrasons de la prostate, mais il a finalement conduit à la mise au point d'un robot conçu spécifiquement pour la RTUP, le Probot, développé à l'Université Impériale Londres (Figure 1C). Ce système était guidé par l'image et était à base de modèles, avec la simulation et le contrôle de vidéo en ligne [10].

Tandis que le Probot a été développé, le *Integrated Surgical Supplies Ltd* (Sacramento, États-Unis) a développé le Robodoc, un système robotique conçu pour faciliter la mise en place de prothèse de hanche en orthopédie [11] (Figure 1D). Le Robodoc était le premier système robotique approuvé par l'administration américaine des aliments et des médicaments (*Food and Drug Administration*, FDA). Il a été utilisé pour la première fois en 1992 et a été commercialisé en Europe et au Japon, mais il n'était pas parvenu à se répandre à grande échelle dans le monde médical car les capteurs pourraient générer des problèmes infectieux [12–14]. Le Robodoc constituait une avancée technologique considérable pour la chirurgie : le robot apporte une précision de l'ordre du dixième de millimètre au lieu des deux millimètres du chirurgien.



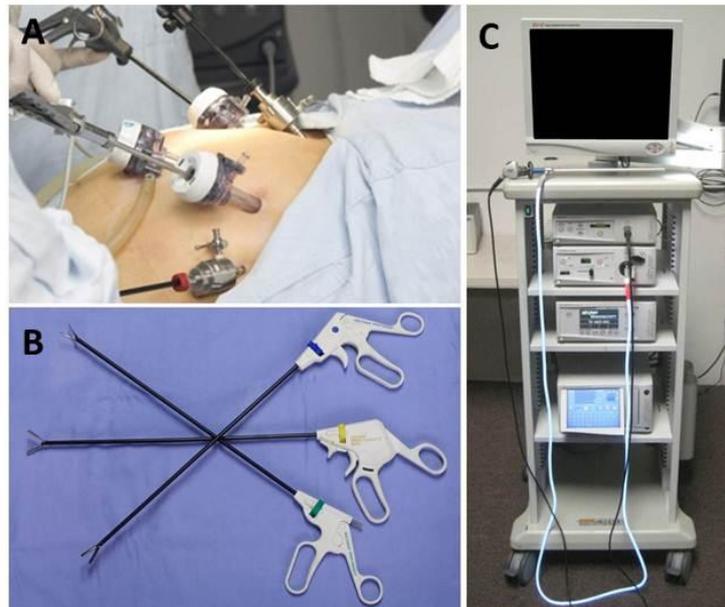
**Fig.1** Les premiers robots utilisés en chirurgie: l'Arthrobot (A), le Puma 560 (B), le Probot (C) et le Robodoc (D)

### **I.1.3 - Évolution de la laparoscopie vers la chirurgie robotique**

La technologie laparoscopique a explosé à la fin des années 1980 avec la première cholécystectomie laparoscopique effectuée en 1987. La chirurgie laparoscopique présente plusieurs avantages comparée à la chirurgie ouverte traditionnelle, mais elle est aussi accompagnée de contraintes techniques inhérentes qui ont progressivement mis en évidence les limites techniques de son application. La « téléprésence » robotique commençait à fleurir en même temps que la laparoscopie éprouvait des limitations. Des chercheurs clairvoyants ont reconnu une occasion potentielle de combiner les deux techniques pour renforcer la capacité des chirurgiens en chirurgie laparoscopique. Ils ont finalement mis au point et commercialisé les robots chirurgicaux, et la chirurgie laparoscopique robot-assistée s'est développée pour plusieurs spécialités de chirurgie.

#### *I.1.3.1 - Chirurgie laparoscopique*

La chirurgie mini-invasive (CMI) consiste à réaliser des procédures chirurgicales grâce à des petites incisions (généralement de 0.5 à 1.5 cm de long) alors que de plus grandes incisions nécessaires dans des procédures chirurgicales ouvertes (Figure 2). La CMI au sein de la cavité abdominale ou pelvienne est appelée la laparoscopie ou cœlioscopie, alors que la CMI réalisée sur la cavité thoracique est appelée la thoracoscopie. La chirurgie laparoscopique et thoracoscopique appartiennent au domaine plus large de l'endoscopie.



**Fig. 2** La chirurgie laparoscopique (A) et les instruments (B) et chariot (C) de laparoscopie

La chirurgie laparoscopique basée sur l'utilisation d'un laparoscope affiche des images agrandies du site opératoire sur le moniteur. Il existe actuellement deux types de laparoscope: un système de lentilles à tige télescopique, qui est généralement connecté à une caméra vidéo ; et un laparoscope numérique où le dispositif à couplage de charge (*Charge-Coupled Device*, CCD) est placé à l'extrémité du laparoscope, ainsi éliminant le système de lentilles à tige. Lui est connecté un système de câble à fibre optique associé à une source lumineuse « froide » (halogène ou xénon) pour illuminer le champ opératoire [15].

L'abdomen est gonflé comme un ballon avec du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Ceci surélève la paroi abdominale au-dessus des organes comme un dôme pour créer un espace de travail et de visualisation. On crée donc un pneumopéritoine. Le CO<sub>2</sub> est utilisé parce qu'il est commun au corps humain et peut être absorbé par des tissus et éliminé par le système respiratoire. Il est également non-inflammable, ce qui est essentiel car des instruments d'électrochirurgie sont couramment utilisés dans les procédures laparoscopiques.

La première procédure laparoscopique, la cholécystectomie, sur un patient humain a été réalisée en 1987 par un français, le Dr Philippe Mouret (certains argumentent que c'était le chirurgien allemand Erich Mühe qui aurait effectué cette première procédure en 1985 [16]). Depuis lors, cette technologie a progressé de manière surprenante, et actuellement, elle arrive à maturité et permet d'effectuer une grande partie des interventions autrefois pratiquées en chirurgie à ciel ouvert.

Comparée avec la chirurgie ouverte, la procédure laparoscopique présente plusieurs avantages et a introduit, comme indiqués ci-dessous, des intérêts tangibles pour les patients [17,18]:

- Hémorragie réduite du fait d'une électrocoagulation minutieuse pas à pas, ce qui réduit le besoin de la transfusion sanguine ;
- Diminution de l'agression chirurgicale, d'où une symptomatologie douloureuse moindre en post-opératoire ;
- Réduction de l'exposition des organes internes aux possibles contaminants extérieurs réduisant ainsi le risque d'infection ;
- Diminution du risque de complications « pariétales » (abcès de paroi, éventration), ceci est particulièrement intéressant chez le sujet obèse ;
- Diminution de la durée d'hospitalisation associée à une reprise des activités précoce ;
- Intérêt esthétique, puisque les cicatrices sont de très petite taille.

Malgré ces intérêts séduisants, l'expansion plus étendue de la laparoscopie devient difficile en raison de la contrainte de cette technologie. Inhérente à l'équipement laparoscopique on note une perte de la coordination œil-main naturelle, de retour tactile et de dextérité [19] :

- Déplacer les instruments laparoscopiques est quelque peu contre-intuitif du fait de l'effet pivot, le chirurgien doit bouger la main dans la direction contraire au mouvement de l'extrémité endocorporelle des instruments ;
- Le chirurgien regarde un moniteur de vidéo, voit donc en deux dimensions et perd la notion de profondeur de champ. Il n'a pas d'information tactile directe, mais seulement un retour de force qu'il perçoit à travers les instruments, ce qui rend la manipulation des tissus plus fortement dépendante de la visualisation ;
- La plupart des instruments laparoscopiques a seulement cinq degrés de liberté (ddl), tandis que le poignet et la main humains ont 7 ddl ; le chirurgien perd ainsi la mobilité des instruments qu'il aurait en chirurgie ouverte. En outre, les tremblements physiologiques de la main du chirurgien sont facilement amplifiés par la longueur de ces instruments rigides. Ces limites rendent la dissection et la suture plus délicates difficiles, voire impossibles ;

- En fin, la complexité de cette technologie nécessite une courbe d'apprentissage longue. Il a été rapporté que la courbe d'apprentissage pour la prostatectomie radicale laparoscopique variait de 200 à 750 cas [20].

### *1.1.3.2 - Développement des robots chirurgicaux de téléprésence*

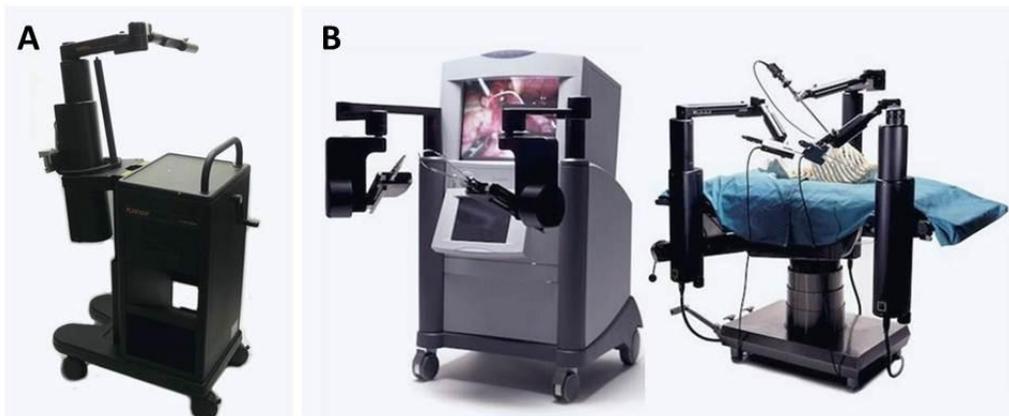
En 1972, l'administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (*National Aeronautics and Space Administration*, NASA) des États-Unis a proposé le concept de téléchirurgie, qui se réfère à la commande à distance d'un robot (ou télémanipulateur) pour exécuter la procédure chirurgicale, pour offrir des soins chirurgicaux aux astronautes [21]. Cependant, les limitations des systèmes robotiques et informatiques à cette époque-là ont rendu le développement d'un tel concept impossible. Dans les années 1980, certains des chercheurs de la NASA et de l'institut de recherche de Stanford (*Stanford Research Institute*, SRI) ont respectivement travaillé sur la « téléprésence » et la télémanipulation. Les deux groupes ont finalement coopéré, en lien avec les progrès de l'informatique et la miniaturisation des composants, ce qui a permis l'établissement des fondements de la téléchirurgie [22],[23]. En 1991, un premier prototype de robot téléchirurgical a été mis au point pour aider à la réalisation de micro-sutures vasculaires et nerveuses en chirurgie de la main [24]. Peu après, il a été présenté à ces chercheurs la technologie de la chirurgie laparoscopique, et ils ont eu l'idée de combiner ces deux technologies pour surmonter les limitations de la laparoscopie.

Le succès du robot téléchirurgical a attiré l'attention de l'agence américaine pour les projets de recherche avancée de défense (*Defense Advanced Research Projects Administration*, DARPA) du département de la Défense des États-Unis. Les planificateurs de DARPA, dirigés par le Dr Richard Satava, ont envisagé l'utilisation de la téléchirurgie par des chirurgiens militaires dans le cadre de la chirurgie de sauvetage sur des soldats blessés en zone hostile jusqu'à ce qu'ils puissent être évacués vers un hôpital militaire [25]. Avec le financement de DARPA, le SRI a développé le système chirurgical de téléprésence « Green » qui a été testé en 1994 dans une expérimentation de téléchirurgie pendant un exercice de combat [22],[24].

Plusieurs chirurgiens et ingénieurs travaillant sur les systèmes robotiques chirurgicaux pour l'armée américaine ont progressivement formé une force commerciale pour introduire cette technologie dans la chirurgie civile. En 1993, Yulun Wang a fondé l'entreprise

*Computer Motion* (Santa Barbara, CA, États-Unis). Dans un projet financé en partie par la DARPA, il a développé l'AESOP<sup>®</sup> (*Automated Endoscopic System for Optimal Positioning*), un bras robotique qui sert à porter l'endoscope sous commande du chirurgien. Le but était de rendre au chirurgien le contrôle du champ visuel qu'il perd pendant la chirurgie laparoscopique où l'endoscope est toujours contrôlé par l'assistant. Le premier modèle de l'AESOP<sup>®</sup> 1000 était contrôlé soit manuellement ou à l'aide de pédales [26]. Ce type de contrôle a été remplacé par un système de commande vocale dans l'AESOP<sup>®</sup> 2000, le deuxième modèle construit en 1996, donnant ainsi au chirurgien un « troisième bras ». L'AESOP<sup>®</sup> 3000 a été commercialisé en 1998 avec plus de ddl (Figure 3A), et la quatrième génération de l'AESOP<sup>®</sup> HR a intégré à la commande vocale des fonctions multiples telles que la position de la table d'opération et l'éclairage du bloc [27].

Basé sur l'AESOP<sup>®</sup>, *Computer Motion* a développé Zeus<sup>®</sup>, un système robotique intégré composé de deux sous-systèmes physiquement séparés : une console de contrôle est connectée à trois bras robotiques attachés à la table d'opération, formant ainsi un système de maître-esclave (Figure 3B). Le bras porte-endoscope est également à commande vocale, tandis que les deux autres bras, qui ont 4 ddl, tiennent une variété d'instruments manipulés avec des manettes depuis la console du chirurgien. Le système informatique qui connecte les deux parties agit comme une interface électromécanique qui peut filtrer le tremblement de la main et réduire le mouvement par un facteur de 2 à 10. Le champ opératoire est visualisé sur un écran standard sur la console (image 2D) ou par des lunettes polarisées avec un axe différent pour chaque œil, qui perçoit l'image endoscopique transmise alternant rapidement sur un écran équipé d'une matrice de polarisation active (image 3D) [28]. Zeus<sup>®</sup> a obtenu l'approbation de la FDA en 2001.



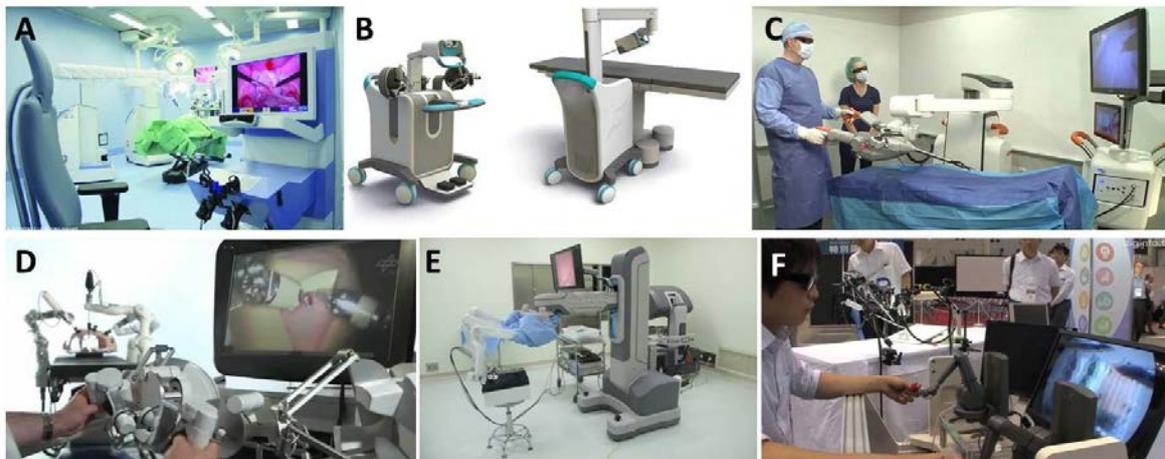
**Fig. 3** Le bras robotique AESOP 3000<sup>®</sup> (A) et le robot chirurgical Zeus<sup>®</sup> (B) développés par *Computer Motion* (Santa Barbara, CA, États-Unis)

En 1995, Frederic H. Moll fonde *Intuitive Surgical* (Sunnyvale, CA, États-Unis) pour développer la technologie commerciale visant à apporter les capacités télérobotiques à la CMI. Le nom de l'entreprise provient de l'un des principaux objectifs de la téléchirurgie : la création d'une interface chirurgien-robot assez transparente pour le chirurgien afin que l'ensemble de ses compétences puisse être utilisé d'une manière naturelle et instinctive. *Intuitive Surgical* obtient la licence de technologies de la NASA, du SRI, d'IBM et de plusieurs universités. En 1997, le premier prototype du robot téléchirurgical, le Lenny, est développé pour les essais sur des animaux. Ensuite, le Mona est construit pour les premiers essais humains incluant des procédures vasculaires et gynécologiques à l'hôpital Saint-Blaise. Basé sur ces expériences initiales, le modèle commercialisable du robot (nommé da Vinci pour honorer le grand inventeur) avait un contrôle avancé et des améliorations ergonomiques par rapport au Mona [29]. Les essais cliniques finaux ont commencé en 1999, et la FDA américaine a approuvé le système pour la chirurgie laparoscopique générale en Juillet 2000, suivie par de nombreuses autres approbations [30]. Le service d'urologie de Nancy a participé à l'agrément pour le traitement du syndrome de la jonction pyélo-urétérale.

La compétition entre *Intuitive Surgical* et *Computer Motion* était devenue inévitable. Après une bataille juridique féroce, *Intuitive Surgical* a finalement remporté la victoire (avec le support puissant d'IBM) et a acheté *Computer Motion* en 2003 pour 150 millions de dollars. Après la fusion, la production du système Zeus a été arrêtée, le service après-vente non honoré et 90% des employés du *Computer Motion* ont été licenciés. Depuis lors, le da Vinci<sup>®</sup> est devenu le seul système disponible sur le marché, et *Intuitive Surgical* a obtenu le monopole tout en continuant à perfectionner son robot chirurgical [31]. Les deuxième (da Vinci<sup>®</sup> S) et troisième (da Vinci<sup>®</sup> Si) générations, ont été délivrées en 2006 et 2009 respectivement, et la dernière génération, le da Vinci<sup>®</sup> Xi, est disponible depuis 2014. Le revenu de l'entreprise a augmenté de 138 millions \$ en 2004 à 2,13 milliards \$ en 2014, et le cours de l'action a passé de 15 \$ à 500 \$ [32].

Durant ces dernières années, des concurrents sont apparus sur le marché de la robotique chirurgicale et il est anticipé que l'*Intuitive Surgical* ne détiendra plus le monopole dans quelques années [33]. Une variété de systèmes a été développée ou est en développement aux quatre coins du monde, tels que le Telelap ALF-X en Italie, le SPORT<sup>™</sup> au Canada, le SurgiBot<sup>™</sup> et l'ASRS aux États-Unis, le MiroSurge en Allemagne, le Micro Hand S en Chine, le Sofie aux Pays-Bas et l'IBIS au Japon (Figure 4) [34,35]. Les entreprises *Olympus* et *Samsung* sont en train de développer de nouveaux systèmes robotiques, avec une promesse de

moindre coût et de machines plus compactes. Il a été récemment annoncé que le *Johnson & Johnson* et le géant de l'internet *Google* vont fabriquer ensemble des robots chirurgicaux.



**Fig. 4** Des robots chirurgicaux en développement : l'ALF-X (A), le SPORT (B), le SurgiBot (C), le MiroSurge (D), le Micro Hand S (E) et l'IBIS (F)

Quelques systèmes principalement utilisés pour la recherche ont été développés en laboratoire tels que le robot M7 du SRI et le Raven de l'Université de Washington (Seattle, États-Unis). Ces systèmes seront décrits dans le chapitre II.

## **I.2 - Robot da Vinci®**

### **I.2.1 - Caractéristiques techniques**

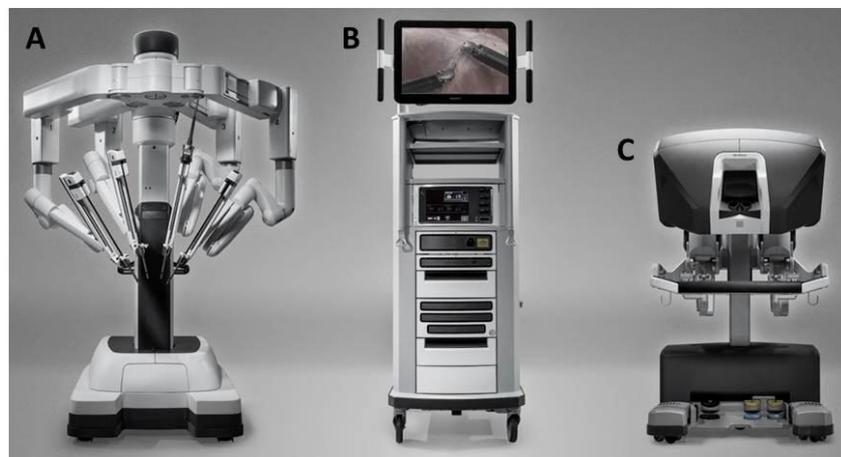
#### *I.2.2.1 - Structure du système*

Le robot da Vinci® est conçu dans une configuration maître-esclave, et il se compose de trois parties qui sont connectées par des câbles de fibre optique : la console de chirurgien, le chariot côté patient et le système d'imagerie ([Figure 5](#)).

La console de chirurgien est composée d'un système de vision stéréoscopique binoculaire, de deux manettes de commande et d'une unité de pédale. Le système de vision fournit les images 3D du champ opératoire, et les deux manettes permettent au chirurgien de contrôler les instruments chirurgicaux installés sur les bras du robot et insérés dans le corps du patient. À travers le pédalier, le chirurgien est capable de contrôler le mouvement de l'endoscope (pédale de caméra), de rajuster la position de la main (pédale de débrayage), et d'appliquer différents types de cautérisation (pédales d'énergie).

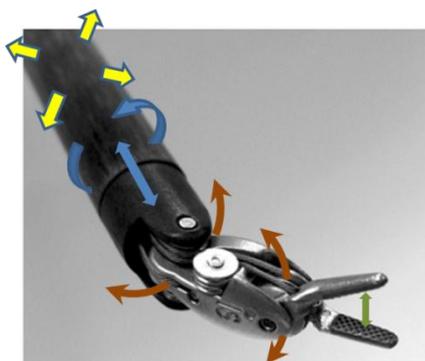
Le chariot patient est porteur de trois bras dans la première génération du système da Vinci<sup>®</sup> et de quatre bras dans les modèles suivants dont un bras spécifique porte l'optique de l'endoscope alors que les deux ou trois autres portent des instruments chirurgicaux. Avec le dernier système du da Vinci Xi<sup>®</sup>, l'endoscope peut être installé sur n'importe quel bras [36].

Le système de vision est équipé d'un endoscope de haute définition et de l'équipement de traitement des images. L'endoscope (12 mm) comporte deux canaux optiques reliés à deux caméras à couplage de charge transmettant respectivement les images vers chaque œil de la console et permet ainsi une vision 3D. La vue du champ opératoire est aussi disponible sur un moniteur annexe pour transmettre des images aux assistants et aux observateurs [37].



**Fig. 5** Le système robotique da Vinci Xi<sup>TM</sup> : le chariot côté patient (A), le système d'imagerie (B) et la console du chirurgien (C)

Les instruments articulés appelés EndoWrist<sup>®</sup> sont un élément clé du système da Vinci<sup>®</sup>. Le mouvement de l'EndoWrist<sup>®</sup> est contrôlé par l'ordinateur qui convertit les mouvements de la main du chirurgien aux mêmes mouvements des instruments robotiques, ceci évite les mouvements inverses induits par l'effet pivot comme dans la laparoscopie traditionnelle [38]. Le poignet des instruments permet le mouvement de roulis, de tangage et de prise, fournissant au chirurgien un total de 7 ddl pour chaque main (Figure 6).



**Fig. 6** L'instrument EndoWrist<sup>®</sup> du robot da Vinci<sup>®</sup> avec sept degrés de liberté

### *1.2.2.2 - Scène chirurgicale*

Pendant la chirurgie robotique, le chirurgien s'assoit à la console avec la tête inclinée vers l'avant, les yeux regardant vers le bas, et les mains sous le système de vision. L'ensemble fournit une position confortable. Un ordinateur surveille le positionnement des mains. Il est échantillonné à une fréquence de 1300 fois par seconde lors de la procédure. En utilisant des informations des capteurs de mouvement et des modèles cinématiques du maître et de l'esclave, le système informatique émet des commandes nécessaires d'entraînement de l'actionneur pour déplacer les bras du robot et fournir un feed-back. La position de l'endoscope peut être réglée par le chirurgien et une magnification visuelle est possible (x2 à x10), en association avec la capacité de régler l'échelle du mouvement de la main. Cela augmente la précision chirurgicale et affine le contrôle du mouvement en réduisant les grands mouvements de la main du chirurgien à l'échelle de la vue de la caméra. Les tremblements sont filtrés simultanément ce qui permet des mouvements naturels ressemblant beaucoup à la chirurgie ouverte [39]. En outre, le système peut appliquer la force différente de quelques grammes pour la suture délicate à plusieurs livres de force nécessaire pour tracter des grandes structures tissulaires [40].

Au niveau du champ opératoire, le chirurgien peut voir les effecteurs terminaux des bras robotiques (les bouts d'instruments). Le chirurgien perçoit une certaine sensation de retour de force ou feed-back tactile des instruments qui est actuellement limité à l'interaction avec des structures rigides, comme les collisions d'outil-sur-outil, et non pas avec des tissus mous [41]. Ceci nécessite une détermination du feed-back essentiellement basée sur le visuel à partir de la déformation des tissus. Le chirurgien doit ainsi faire attention au retour visuel lorsqu'il réalise une suture, sinon le fil se casse facilement avant qu'il ne sente la tension excessive.

### **I.2.2 - Avantages et inconvénients**

Le robot da Vinci<sup>®</sup> a surmonté plusieurs des obstacles de la laparoscopie conventionnelle. Il augmente la dextérité et précision des instruments, restaure la coordination œil-main naturelle et améliore la visualisation :

- Dextérité et précision renforcée : les instruments EndoWrist<sup>®</sup> de 7 ddl (au lieu de 5 ddl des instruments laparoscopiques), alliés à la capacité de réduire les tremblements et de

réglage l'échelle du mouvement permettent la manipulation d'une grande précision et dextérité ;

- Coordination œil-main naturelle : le chirurgien s'installe de façon ergonomique à la console et travaille naturellement tout comme ce qu'il fait dans une opération ouverte. Ses mains étant dans l'axe de sa vision, il a l'impression de les plonger dans le champ opératoire. Les deux avant-bras sont appuyés sur un support diminuant ainsi la fatigue ;
- Visualisation avancée : la vision 3D de haute définition, en association avec la capacité du chirurgien de directement contrôler un champ visuel stable d'un grossissement et d'une manœuvrabilité élevés améliorent significativement la capacité du chirurgien d'identifier et de disséquer des structures anatomiques, et ainsi faire des micro-anastomoses ;
- Compatibilité avec des innovations futures : le robot da Vinci<sup>®</sup> est conçu pour intégrer des innovations futures, tels que l'instrumentation avancée, la simulation de techniques chirurgicales, et la mise à jour de logiciels dans une plate-forme dynamique.

En outre, les systèmes Si et Xi peuvent être équipés d'une deuxième console pour la collaboration et l'enseignement lors de procédures chirurgicales robotiques. Le contrôle des instruments peut être facilement échangé entre les deux consoles, et il est même possible que deux chirurgiens contrôlent des bras différents du robot pour réaliser une chirurgie en binôme [42].

Malgré tous ces intérêts, le robot da Vinci<sup>®</sup> présente aussi des inconvénients, et le plus significatif est son coût élevé. Le prix d'achat du système est de 1-2,3 millions \$, et les frais d'entretien annuel coûtent 100-170.000 \$. En outre, des consommables d'une valeur comprise entre 700-3200 \$ et comportant un nombre limité d'utilisations sont utilisés pour chaque opération robotique. Les mises à jour du système sont également onéreuses [32],[43].

Un autre inconvénient est la lourdeur du système. Le positionnement des instruments sur le patient demande une certaine expertise et du temps. Ceci augmente le temps d'occupation de la salle d'opération et la durée de l'anesthésie. Par ailleurs, les instruments introduits dans le champ opératoire sont strictement liés au patient pour assurer l'uniformité des manœuvres robotiques, mais cette rigidité du système peut entraîner des difficultés et prendre beaucoup de temps lors de la conversion en urgence, et ce n'est pas sans risques en cas de complication hémorragie brutale [44].

L'absence de feed-back tactile est un autre problème qui peut causer par inadvertance des plaies d'organes ou de tissus, et exiger parfois plus de temps pour réaliser des tâches chirurgicales [45].

L'assistance robotique est une nouvelle tendance en chirurgie qui présente un grand potentiel de développement. Il est fort probable que tous ces inconvénients soient transitoires et seront surmontés grâce aux avancées technologiques. Le retour de force et la compacité du robot sont déjà introduits sur certains systèmes robotiques en développement ou de laboratoire. Par ailleurs, le da Vinci<sup>®</sup> Xi est plus compact que les modèles précédents. Avec l'introduction sur le marché d'autres systèmes robotiques, on peut espérer que le prix baisse.

Les avantages et les inconvénients du robot da Vinci<sup>®</sup> et de la laparoscopie conventionnelle sont résumés dans la [Table 1](#).

**Table 1** Les avantages et les inconvénients du robot chirurgical et de la laparoscopie conventionnelle

	<b>ROBOT</b>	<b>LAPAROSCOPIE</b>
<b>Avantages</b>	Instruments EndoWrist <sup>®</sup> articulés Vision 3D d'un grossissement élevé Contrôle libre et stable de l'endoscope Coordination œil-main naturelle Filtration de tremblements Réglage de l'échelle du mouvement Compatibilité avec des innovations futures	Technique mature Prix abordable Équipement léger
<b>Inconvénients</b>	Coût élevé Absence de feed-back tactile Équipement lourd et volumineux Entraînement supplémentaire de l'équipe	Vision 2D Dextérité compromise Effet pivot Longue courbe d'apprentissage

### I.2.3 - Dissémination

La FDA américaine a approuvé le robot da Vinci<sup>®</sup> pour la chirurgie laparoscopique générale (pathologies de la vésicule biliaire et du reflux) en juillet 2000, pour la chirurgie thoracique en mars 2001, la prostatectomie radicale en mai 2001, la réparation valvulaire mitrale en novembre 2002 et les procédures gynécologiques en avril 2005 [30],[46]. En 2011, *Intuitive Surgical* a introduit des instruments spécifiques pour la chirurgie mono trocart (*Single-Site instruments*) avec le système Si pour la procédure de cholécystectomie. Ces

instruments ont été approuvés par la FDA pour l’hystérectomie et la salpingo-ovariectomie bénigne en 2013.

Au 30 septembre 2014, un total de 3174 robots da Vinci® étaient installés dans le monde dont la plupart (2185) aux États-Unis, 516 en Europe et 339 en Asie (Figure 7). Environ 523 000 procédures da Vinci® ont été effectuée durant l’année 2013, et la majorité en gynécologie, urologie et chirurgie générale. Parmi ceux-ci, les procédures les plus fréquemment effectuées étaient l’hystérectomie, la prostatectomie et la cholécystectomie. D’autres spécialités couvertes ont compris la chirurgie cardiaque, thoracique, ORL, pédiatrique, vasculaire, etc. [32].

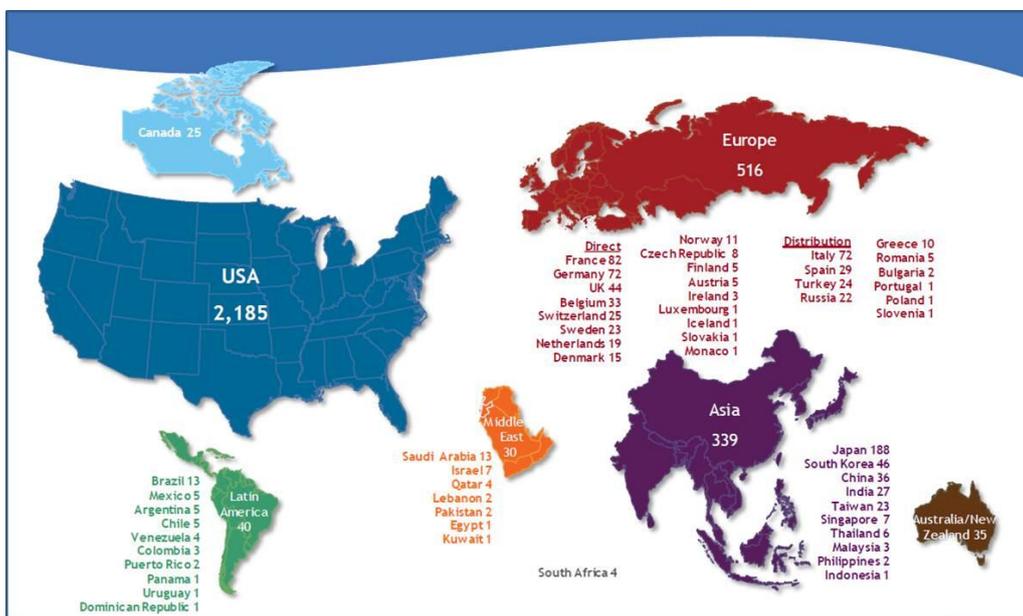


Fig. 7 Nombre de robots da Vinci® installés dans le monde au 30 septembre 2014

## I.2.4 - Application en clinique

### I.2.4.1 - Expansion dans divers spécialités

La robotique a été utilisée dans nombre de spécialités chirurgicales pendant les dix dernières années, et une expérience clinique préliminaire a été obtenue. Il est évident que la technologie robotique a simplifié la chirurgie laparoscopique et a diminué la courbe d’apprentissage. Cependant, les résultats cliniques n’ont pas montré dans bien des cas, de différences significatives entre la chirurgie robotique et la chirurgie laparoscopique traditionnelle.

La première procédure robotique cardiaque a été effectuée aux États-Unis en 1999, le robot ayant été conçu au départ pour cette application [47]. Depuis lors, l'assistance robotique a été utilisée pour réparer et remplacer la valve mitrale, ponter les artères coronaires, fermer le défaut septal atrial, implanter des stimulateurs ventriculaires gauches et réséquer des tumeurs intracardiaques [48]. En dépit d'être l'une des premières spécialités à utiliser la robotique, il est encore difficile d'évaluer les avantages pour les patients puisque les résultats sont mitigés, sans preuve claire de la supériorité de l'approche robotique. En chirurgie thoracique, les procédures robotiques englobent les résections du cancer primitif du poumon, des tumeurs de l'œsophage, des maladies du thymus et des tumeurs médiastinales [49].

L'utilisation du robot en urologie et particulièrement dans la chirurgie prostatique a réellement contribué à lancer la robotique. La prostatectomie radicale est l'option standard du traitement pour le carcinome localisé de prostate, mais la difficulté technique de la prostatectomie laparoscopique constituait un frein à l'essor de cette technologie. L'introduction du robot da Vinci<sup>®</sup> a simplifié cette procédure et l'a rendu plus accessible : plus de 80% de prostatectomies sont maintenant réalisées avec l'approche robotique aux États-Unis [50]. D'autres procédures urologiques sont également de plus en plus réalisées à l'aide du robot, tels que la néphrectomie (totale ou partielle), la pyéloplastie et la cystectomie [51],[52].

La chirurgie robotique en gynécologie a débuté tardivement en 2005 mais avec une augmentation rapide, et elle a dépassé la chirurgie robotique en urologie. L'assistance robotique a été utilisée dans nombre de procédures gynécologiques comme l'hystérectomie, la myomectomie, l'ovariectomie, la cystectomie ovarienne, la résection de l'endométriose et la lymphadénectomie, avec un rôle croissant en oncologie gynécologique. L'hystérectomie bénigne robot-assistée a considérablement augmenté entre 2007 et 2012, et en terme de nombres de procédures, elle a dépassé la prostatectomie robotique depuis 2010 [53]. Cependant, des études cliniques actuelles montrent que l'hystérectomie robotique offre peu d'avantages à court terme mais conduit à un coût plus élevé en comparaison avec l'approche laparoscopique [54].

L'approche laparoscopique était le standard du traitement en chirurgie colorectale, et le rôle de la robotique dans ce type de procédures reste controversé. Certaines études ont démontré que la colectomie robotique était faisable et sûre, mais elle n'a montré aucun avantage clinique. De plus, elle était associée à une durée d'opération plus longue et un coût

plus élevé par rapport à la chirurgie laparoscopique conventionnelle [55,56]. Le nouveau rôle du robot en chirurgie colorectale se situe dans les pathologies rectales, et surtout chez les patients avec un bassin étroit. L'excision totale du méso rectum (*Total Mesorectum Excision*, TME) dans un bassin étroit par voie laparoscopie est une procédure techniquement exigeante, et la TME robotique peut avoir des intérêts potentiels [57,58].

L'application du robot en chirurgie générale s'est développée et le nombre de procédures a augmenté au cours de la dernière décennie, en particulier en chirurgie bariatrique, pour la fundoplicature et en chirurgie hépatobiliaire, bien que l'approche robotique ne soit pas systématiquement utilisée pour ces procédures. En ce qui concerne la chirurgie endocrinienne, l'utilisation du robot en chirurgie de la thyroïde augmente rapidement, notamment par voie axillaire [59]. La chirurgie robotique a révolutionné le traitement chirurgical des maladies de thyroïde, elle est associée à une meilleure visualisation et à une manipulation délicate améliorée dans l'espace cervical profond et étroit [60].

La première série de chirurgie robotique ORL a été rapportée en 2006 [61]. L'approche robotique a fourni aux chirurgiens la capacité d'accéder aux espaces anatomiques qui n'étaient auparavant gérés que par des techniques ouvertes. Cela a abouti à une morbidité globale diminuée et à d'excellents résultats fonctionnels avec des résultats oncologiques équivalents.

Dans l'ensemble, la chirurgie robotique avec les systèmes da Vinci<sup>®</sup> se développe sans cesse dans une vaste gamme de spécialités chirurgicales. Cette technologie a apporté aux chirurgiens les avantages de l'ergonomie, et la facilité d'apprentissage et d'utilisation. Elle a aussi rendu possibles certaines procédures auparavant irréalisables en laparoscopie traditionnelle grâce à la visualisation avancée et la dextérité de manipulation surtout pour les chirurgiens novices. Cependant, dans la majorité des cas, elle n'a pas démontré de bénéfices francs pour les patients par rapport à la laparoscopie traditionnelle concernant les résultats oncologiques ou fonctionnels. Elle pourrait conduire à l'hémorragie réduite ou une hospitalisation plus courte, mais souvent elle est associée à une durée opératoire plus longue et à un coût plus élevé [62]. De plus, le succès de la chirurgie robotique repose plus sur le travail en équipe, dans laquelle l'assistant de chevet joue un rôle important.

Il n'y a pas actuellement de preuves irréfutables de la supériorité de la chirurgie robotique et son utilisation reste, et restera encore pour une certaine période, controversée.

Toutefois, la robotique a plus de potentiel de développement que la laparoscopie n'en possède, et elle va sûrement encore évoluer.

#### *1.2.4.3 - Evènements indésirables*

Accompagnée avec l'enthousiasme à la technologie robotique, il y a une préoccupation sur les défaillances techniques du robot, surtout lors de l'exécution des procédures complexes. Des dysfonctionnements du système peuvent conduire aux conversions en chirurgie ouverte ou laparoscopique et, dans les cas plus critiques, provoquer des blessures voire des décès des patients.

La FDA des Etats-Unis exécute une base de données de « MAUDE » (*Manufacturer and User Facility Device Experience*) qui est un système de déclaration volontaire des événements indésirables (EIs) impliquant des dispositifs médicaux depuis 1993. Les EIs sont définis comme des erreurs d'utilisation potentielles et réelles et ainsi des problèmes de qualité des produits. Tous les EIs ne sont pas associés à des blessures de patients. Andonian *et al* ont effectué une revue de la MAUDE, et ils ont identifié un total de 168 EIs avec le robot da Vinci<sup>®</sup> déclarés de 2000 à août 2007. Parmi les 168 EIs, neuf étaient associés à la blessure du patient. Le taux de conversion en chirurgie ouverte a diminué de 94 % en 2004 à 16 % en 2007 grâce à l'expérience croissante des chirurgiens [63].

Avec l'augmentation des procédures robotiques effectuées, les rapports des EIs ont aussi augmenté. Lucas *et al* ont consulté la MAUDE de 2003 à 2009, et un total de 1914 EIs ont été identifiés (991 da Vinci<sup>®</sup> S et 878 da Vinci<sup>®</sup>, 45 non classés) avec des années record de 2007 pour da Vinci<sup>®</sup> (211) et de 2008 pour le système S (571). La majorité des EIs étaient des dysfonctionnements des instruments. Le taux de blessure du patient était 0,5-5,4 % des EIs. La conversion ouverte a diminué de 21,3 % avant 2007 à 9,9 % au-delà de 2007, mais le taux de décès a augmenté de 0,0031 % à 0,0061 %. L'augmentation des décès peut être due à la volonté des chirurgiens de tenter les procédures plus difficiles [64]. En outre, Friedman *et al* ont identifié 565 rapports sur les dysfonctionnements des instruments dans la MAUDE de 2009 à 2010 [65].

La base de données de MAUDE est un système volontaire de déclaration des EIs. Il est probable que beaucoup de dysfonctionnements n'ont pas été rapportés, et le taux des EIs a été sous-estimé. Les patients doivent être conscients de la possibilité d'échecs du système et de conversion en chirurgie ouverte. Les chirurgiens et le staff du bloc opératoire doivent être

formés pour éviter et récupérer les échecs. En plus, les chirurgiens doivent être capables d'effectuer les procédures par laparoscopie ou l'approche ouverte lors de l'échec du robot. Il est important en outre pour les fabricants de prendre la responsabilité d'améliorer la sécurité et la stabilité des systèmes.

#### *1.2.4.3 - Problèmes médico-légaux*

Avec l'introduction rapide de la technologie robotique, les fournisseurs de soins de santé sont confrontés à de nouveaux problèmes légaux et éthiques. Le litige après la chirurgie robotique peut être complexe. En chirurgie traditionnelle, il est rare qu'un instrument médical blesse un patient sans qu'un chirurgien soit en faute. Cependant, lorsque des dispositifs sophistiqués sont utilisés pour effectuer une procédure robotique, les fabricants de produits sont également confrontés à la responsabilité. Dans le cas d'un résultat indésirable, en plus de médecins et des hôpitaux, le fabricant du robot peut être poursuivi. Les lois impliquées dans ce type de litige sont généralement peu familières aux fournisseurs de soins de santé. Les chirurgiens devraient avoir une connaissance de la responsabilité des produits, et ainsi du fait que le fabricant n'est pas toujours un ami [66].

En plus d'allégations de négligence médicale traditionnelle, les avocats de la demanderesse cherchent aussi des fautes d'absence du consentement explicite et de certification négligente des chirurgiens robotiques. Il est essentiel de fournir aux patients des informations formelles et adéquates concernant la chirurgie robotique pour qu'ils comprennent l'application, les limites et les risques potentiels de cette technologie. Pour les chirurgiens novices en robotique, chercher l'assistance des instructeurs experts dans leurs premières séries de procédures permet de réduire les risques de responsabilité [67]. Pourtant la fourniture d'un tel service peut alors exposer les instructeurs à la responsabilité. Les chirurgiens sont attendus de mieux comprendre les principes de l'obligation des soins et la relation médecin-patient, ainsi que l'applicabilité potentielle de ces principes à la cour. Ceci probablement aidera à éliminer certaines des incertitudes sur la responsabilité [68]. Il est encore plus important d'établir ou de perfectionner les standards associés à la chirurgie robotique pour protéger les patients, les chirurgiens, les instructeurs et les instituts, et aussi de normaliser leur action. La certification doit être apportée au personnel pour les qualifier pour l'intervention robotique et les actions relatives. En ce qui concerne les problèmes éthiques, la sécurité et la fiabilité d'équipements, et le maintien de la confidentialité sont tous d'une importance primordiale [69].

La technologie robotique est encore en développement, et l'application du service de télémédecine, comme le « télémentoring » et le « téléproctoring », va sûrement rendre la situation médico-légale encore plus complexe. Les fournisseurs des télécommunications seront également impliqués. En l'absence de principes communs indiquant clairement la responsabilité de chacun ou d'assurance de l'immunisation contre le litige, il sera difficile de convaincre le personnel concerné de se consacrer à la pratique. Ceci représente un obstacle restant à surmonter.

## **I.3 - Formation en chirurgie robotique**

### **I.3.1 - Etat des lieux**

En général, la mise en place du « curriculum » de chirurgie robotique standardisé et validé a pris du retard ; il en est de même pour le standard d'évaluation et de certification des chirurgiens et des techniques chirurgicales robotiques. Il y a beaucoup de questions sans réponses concernant la stratégie optimale de l'enseignement, telles que le rôle de diverses modules de formation, le nombre de procédures nécessaire pour maîtriser la technique, et l'équilibre entre la formation des stagiaires et la sécurité des patients.

La formation chirurgicale traditionnelle a été premièrement introduite par William Halsted à l'hôpital Johns Hopkins il y a plus d'un siècle [70]. Basé sur le compagnonnage, à deux chirurgiens autour d'un patient, il permettait à un novice de voir opérer un senior, d'être aidé par lui puis de pratiquer lui-même [71]. La formation en chirurgie robotique exige non seulement l'acquisition de techniques chirurgicales ouvertes, mais aussi une compétence sur les techniques mini-invasives et robotiques. Une variété de facteurs cliniques et sociaux remettent en question l'adéquation du modèle Halsted pour l'éducation des stagiaires d'aujourd'hui. Les limites du temps de travail, la crainte de litiges et les contraintes financières ont tous été cités comme des obstacles. Avant l'apprentissage des techniques, une connaissance de la manipulation de la plate-forme du robot lui-même est obligatoire. De plus, au cours de la chirurgie ouverte et laparoscopique, le chirurgien mentor est à côté du stagiaire et a la même vue de la procédure ; il est capable de reprendre en charge la procédure à n'importe quel moment dès lors que la sécurité des patients pourrait être compromise. Ceci n'est pas le cas en robotique car dans la plupart des cas le chirurgien est seul à la console de

contrôle. Bien qu'une deuxième console soit disponible, son coût significatif (500.000 \$) rend son utilisation pour la formation inopérante et rare.

La demande augmentée a poussé de nombreux chirurgiens à chercher la formation robotique. Corrélativement, une grande variété de programmes de chirurgie robotique est apparue en particulier aux Etats-Unis. Ces programmes existent dans de divers formats et durent de différentes périodes [72]. Afin de standardiser la formation et aussi d'éviter la répétition de recherche, certains programmes ont commencé à se dévouer pour établir des principes, dans lesquels les experts ont été réunis et les ressources ont été concentrées.

En 2004, la société américaine de chirurgie gastro-intestinale et endoscopique (SAGES) a lancé le curriculum de principes fondamentaux de chirurgie laparoscopique (*Fundamentals of Laparoscopic Surgery*, FLS). Ce curriculum a été promu comme un standard minimum avant qu'un chirurgien ne puisse être autorisé à effectuer des procédures laparoscopiques indépendamment [73]. Avec des subventions du Département de la Défense des États-Unis et de l'industrie, un curriculum similaire pour la chirurgie robotique a été lancé avec le programme de « principes fondamentaux de chirurgie robotique » (*Fundamentals of Robotic Surgery*, FRS). Ce programme a réuni des représentants des 14 spécialités chirurgicales utilisant la robotique chirurgicale, et il a créé un curriculum commun de techniques de base qui sera validé par des essais cliniques multi-institutionnels auxquels participe l'équipe de Nancy. Le curriculum FRS se compose de trois éléments : les compétences cognitives, les compétences psychomotrices, et les compétences de formation et de communication d'équipe. Un dispositif a été conçu pour la formation de compétences psychomotrices qui peut être une version soit mécanique soit en réalité virtuelle (RV) (Figure 8) [74].



**Fig. 8** Le dispositif de dôme de FRS pour la formation de compétences psychomotrices

En Europe, la section robotique en urologie de l'association européenne d'urologie (*European Association of Urology Robotic Urology Section*, ERUS) a collecté les opinions

d'experts robotiques pendant trois congrès internationaux, et un curriculum standardisé en chirurgie robotique a été proposé, qui est maintenant dans son processus de validation initiale. Ce curriculum se compose de quatre étapes qui couvrent l'apprentissage des connaissances de base, la formation basée sur la simulation, la pratique en clinique, et finalement la certification de techniques [75].

Il a été reconnu que la formation de chirurgie robotique tout simplement « sur le tas » est difficile et inacceptable, les directeurs du programme se sont ainsi tournés vers des méthodes alternatives [76]. Bien que le consensus n'ait pas été atteint sur la forme concrète des formations, il est généralement agréé qu'un curriculum systématique de chirurgie robotique doit incorporer tant une session préclinique qu'une session clinique, et chaque session inclut de multiples modalités ou étapes [77–83].

La session préclinique permet aux stagiaires de se familiariser avec les aspects généraux des systèmes robotiques. Idéalement, ceci nécessite pendant plusieurs jours, d'enseignement didactique concernant la mécanique robotique et l'opération du système, d'effectuer des tâches de base sur les modèles inanimés ou par la simulation en RV, ensuite de s'entraîner sur des animaux ou cadavres. La session clinique commence par l'observation des procédures in « live », suivie par assister au chevet du patient, et finit par la pratique progressive sur la console du robot.

## **I.3.2 - DIU de chirurgie robotique**

### *I.3.2.1 Etablissement du programme*

Le CHU de Nancy a été un des premiers centres hospitaliers en Europe à acquérir le robot da Vinci® en 2000. En l'absence d'expérience mondiale antérieure, les chirurgiens ont décidé de réaliser un apprentissage par étapes. Ceci s'est déroulé pendant un an à l'École de Chirurgie de l'Université Lorraine où le robot avait été installé. La première partie était basée sur l'apprentissage de la maîtrise du robot. Ils réalisaient des exercices sur des kits d'entraînements. L'étape suivante a consisté à réaliser des gestes sur des modèles porcins. Après un an de formation individuelle, la première intervention robot-assistée a été réalisée avec succès en novembre 2001. Il s'agissait d'une cholécystectomie. Depuis lors, ces chirurgiens sont devenus graduellement des experts de la technologie robotique. Tirant parti

de cette expérience, un diplôme interuniversitaire (DIU) de chirurgie robotique a été créé à Nancy en 2008 sous la direction du professeur Jacques Hubert.

Le DIU de chirurgie robotique a pour but d'apporter une formation théorique et pratique aux chirurgiens quelle que soit leur spécialité (chirurgies urologique, digestive, gynécologique, cardiovasculaire, ORL, pédiatrie, etc.) mais aussi aux infirmiers de bloc opératoire et aux ingénieurs et techniciens biomédicaux. Le programme de l'enseignement a été conçu de façon multimodale avec une progression étape par étape pour permettre d'acquérir de façon optimale les compétences indispensables à l'utilisation du robot da Vinci<sup>®</sup>. Il y a aussi un intérêt médico-légal puisque le programme fournit un diplôme universitaire après un contrôle strict des connaissances. Pendant sa thèse, l'auteur a eu l'opportunité de participer au DIU en tant qu'apprenant et enseignant des simulateurs robotiques.

### *1.3.2.2 Didactique*

La session didactique fournit aux stagiaires les connaissances nécessaires sur la technologie robotique, telles que les fonctions et les paramètres des appareils, le dépannage de base et les limites du système. Il est également important de développer les connaissances sur la méthode d'application du robot en clinique. Par exemple, la sélection des patients et les indications de chirurgie, la préparation préopératoire, le positionnement du patient et du robot, le placement de trocars, ainsi que les complications possibles et leur prise en charge. Le DIU dispense des cours sous la forme d'un enseignement traditionnel. Il a aussi développé des cours « e-learning » sur l'internet pour l'auto-étude des stagiaires. Dans le monde, un cours standardisé de chirurgie robotique n'est actuellement pas disponible. L'association urologique américaine (*American Urological Association*) a développé un cours complet en ligne appelé « les bases de la laparoscopie et de la robotique en urologie » (*Basics of Urologic Laparoscopy and Robotics*) dans leur curriculum [84].

Des cours de pratique également font partie importante de la phase didactique. Les stagiaires sont donnés l'opportunité d'apprendre, sous supervision d'un expert et sur un vrai robot, le docking du robot, l'insertion et l'échange des instruments, le dépannage, ainsi que de se familiariser à la console.

### *I.3.2.3 Simulation en réalité virtuelle*

La simulation chirurgicale est un moyen important dans l'apprentissage des techniques chirurgicales à l'extérieur du bloc opératoire. Elle a été largement appliquée dans plusieurs domaines de la chirurgie, y compris la chirurgie laparoscopique. Il a été démontré que la formation sur les simulateurs améliorait la performance clinique ultérieure et raccourcissait la courbe d'apprentissage associée à l'acquisition d'une nouvelle compétence technologique [85,86].

La formation directe sur le robot exige un robot fonctionnel souvent dédié. Ce qui est quasi infaisable dans la majorité des centres. Même si cela est possible, l'accès est encore très limité. De plus, les stagiaires sans expérience précédente cassent facilement les instruments robotiques (qui sont très onéreux). En tant qu'alternative, le simulateur robotique en RV présente plusieurs avantages spécifiques : un meilleur rapport temps/coût-efficacité, la facilité d'installation et d'utilisation, la reproductibilité des exercices et le feed-back en temps réel de la performance. Il a été admise comme outil important dans la formation en chirurgie robotique [87–89].

Plusieurs simulateurs robotiques sont actuellement disponibles sur le marché, et ils ont bénéficié de différentes phases de validation démontrant des niveaux variables d'impact éducatif. Le groupe DIU dispose actuellement de cinq simulateurs robotiques dV-Trainer<sup>®</sup> (dVT) de *Mimic Technologies*, un système qui a été largement validé. Avec le dVT, les stagiaires apprennent les techniques psychomotrices nécessaires pour contrôler le robot, telles que la manipulation EndoWrist<sup>®</sup>, la navigation de la caméra, la gestion des énergies, la réalisation d'un nœud et la suture.

Le DIU vise également à former l'ensemble de l'équipe puisque l'assistant et l'instrumentiste a un rôle primordial dans cette chirurgie à distance (le chirurgien est stérilisé, à quelques mètres du patient, qui n'a pas de contact visuel avec l'assistant). Les stagiaires sont prévus de développer le leadership en tant que chirurgien de console, et d'assister d'une façon correcte en tant qu'assistant. La communication audio efficace et sécurisée entre les deux rôles est aussi soulignée. Le *Mimic Technologies* a délivré le Xperience<sup>™</sup> Team Trainer (XTT) en 2014. En tandem avec le dVT, ce système fournit une plate-forme permettant à l'assistant de travailler ensemble avec le chirurgien robotique. Le DIU 2015 a introduit le XTT dans son curriculum pour la formation de l'équipe.

#### *1.3.2.4 Microchirurgie*

Plusieurs similitudes existent entre la microchirurgie et la pratique du robot : l'ergonomie (position générale de l'opérateur, position des avant-bras et des doigts), la dissociation main-vision, les gestes, la dépendance du feed-back visuel, etc. Les vertus pédagogiques de la pratique de la microchirurgie dans l'apprentissage de la chirurgie robotique ont été démontrées. Perez M. *et al* ont prouvé que l'expérience précédente en microchirurgie améliore la performance dans la formation robotique [90]. L'intérêt spécial de cette modalité est qu'elle est économique et pourrait être facilement incorporé dans le programme basique de chirurgie robotique avec peu de frais supplémentaires. Bien que beaucoup moins chers comparés au robot, les simulateurs robotiques restent encore coûteux dont l'utilisation est limitée plutôt aux grands instituts.

#### *1.3.2.5 Exercices sur matériel inanimé et sur tissus*

Les simulateurs robotiques sont capables d'imiter la performance du robot dans une grande mesure, mais en tout cas, ils n'arrivent pas à reproduire parfaitement la réalité. Si les conditions sont réunies, une formation directe sur le robot est toujours valable. Comme les simulateurs le permettent, la pratique sur matériel inanimé aide les stagiaires à maîtriser la manipulation de base du robot. À travers la répétition des exercices, les stagiaires acquièrent une familiarisation avec l'environnement 3D ainsi qu'une habileté dans le mouvement et l'articulation des instruments. Tous ceux-ci sont indispensables pour pouvoir effectuer des tâches plus complexes [91]. A l'exception des modèles traditionnels comme le « *Peg Transfer* », le DIU 2015 a introduit le dispositif de dôme de FRS pour la formation.

Des exercices sur tissus ou organes *ex vivo* sont utilisés pour combler le fossé entre les exercices sur matériel inanimé et les exercices *in vivo*. Les stagiaires pratiquent des techniques chirurgicales avancées ou certaines étapes d'une procédure chirurgicale avec des tissus ou des organes d'animaux afin de mieux comprendre la manipulation du robot [92,93]. En outre, du fait de l'absence du feed-back tactile, l'opération sur des tissus fragiles apprend au stagiaire à contrôler la force appliquée et à prendre soin de son mouvement pour éviter d'endommager les tissus.

### *1.3.2.6 Exercices sur animaux et sur cadavres*

Les exercices sur des animaux in vivo permettent aux stagiaires de mettre en pratique toutes les techniques robotiques acquises antérieurement. Ils sont donnés l'opportunité d'opérer dans un environnement clinique simulé mais à faible risque, et ainsi de résoudre des problèmes potentiels qui peuvent être rencontrés dans les expériences cliniques avec l'aide des chirurgiens robotiques experts. Le cadavre est une autre alternative au modèle animal pour la formation. En comparaison avec ce dernier, il fournit une anatomie précise, tandis que le modèle animal présente l'avantage de tissus perfusés et vivants [94,95]. Comme lors des exercices sur matériel inanimé ou sur tissus, cette modalité demande la disponibilité d'un robot fonctionnel, et elle est encore plus onéreuse et plus complexe à mettre en œuvre.

## **I.3.3 - Formation clinique**

### *1.3.3.1 Observation*

L'observation des interventions est le composant initial de la session clinique d'un curriculum structuré de la chirurgie robotique. Les vidéos préenregistrées des interventions ou l'observation in live au bloc opératoire fournissent aux stagiaires l'occasion d'observer l'exécution des différentes étapes d'une procédure robotique. La possibilité d'interagir avec le chirurgien expert en temps réel est un avantage supplémentaire de l'observation in live, tandis que la capacité d'examiner à plusieurs reprises certaines étapes des procédures chirurgicales rend les vidéos préenregistrées avantageuses. Le DIU donne aussi aux stagiaires l'accès des vidéos préenregistrées d'experts internationaux et ainsi l'opportunité d'observer au bloc opératoire.

### *1.3.3.2 Assistance au chevet du patient*

La prochaine étape dans un programme structuré devrait permettre au stagiaire de devenir compétent comme un assistant de chevet pendant les procédures robotiques spécifiques. Comme un assistant de chevet, le stagiaire apprendra les principes d'accès laparoscopique dans l'abdomen, le placement correct des trocars, le « docking » (l'installation) du robot, l'instrumentation robotique de base et le dépannage. Par ailleurs, il va progressivement apprendre les étapes de chaque opération. Il n'y a pas de preuves irréfutables sur combien de temps un stagiaire doit être un assistant avant de passer à la console du

chirurgien, mais la plupart des rapports ont suggéré un minimum de 10 cas pour la prostatectomie radicale [83,96].

### *1.3.3.3 Pratique à la console*

Malgré la formation précédente, une fois que le stagiaire se trouve à la console, il fera face à une courbe d'apprentissage significative. Afin d'assurer les résultats chirurgicaux et de faciliter l'évaluation des techniques, le stagiaire doit commencer par effectuer les parties spécifiques d'une procédure sous la supervision directe d'un chirurgien mentor. Idéalement, la procédure doit être divisée en segments et le segment le plus simple sera attribué au stagiaire. Il doit devenir compétent dans chaque étape avant qu'il ne soit autorisé à tenter les étapes ultérieures. De cette façon, le stagiaire acquiert des techniques robotiques d'une manière progressive par la répétition des tâches spécifiques. Dans ce système, le chirurgien mentor fournit le feedback direct au stagiaire, et le stagiaire peut être noté pour sa compétence dans chaque étape. L'enregistrement des vidéos chirurgicales est aussi suggéré pour la revue ultérieure. Plusieurs rapports ont décrit la sécurité et l'efficacité d'un tel programme structuré. Il a été démontré que l'implication des résidents (comme chirurgien de console) dans certaines étapes des procédures robotiques n'a pas d'impact négatif sur les résultats chirurgicaux [83,97].

### *1.3.3.4 Courbe d'apprentissage*

La courbe d'apprentissage est à l'origine un terme aéronautique pour caractériser du temps décroissant nécessaire pour effectuer une tâche répétée. En chirurgie robotique, la courbe d'apprentissage décrit un graphique où la maîtrise d'une procédure est mesurée au fil du temps. Le nombre de cas nécessaire pour atteindre le niveau de maîtrise est difficile à établir. Il dépend de l'expérience précédente de la chirurgie ouverte ou laparoscopique, de techniques personnelles et de l'attitude ou la confiance. De plus, des définitions standards sont absentes pour la « maîtrise » ainsi que pour comment la mesurer. Beaucoup d'études ont utilisé un seul critère, la durée opératoire, pour définir la courbe d'apprentissage, ce qui est utile mais simpliste. Certaines autres études ont combiné la durée opératoire avec des mesures oncologiques et fonctionnelles ou des mesures liées à la chirurgie, telles que la perte de sang, le taux de conversion, etc. [98].

En tant que procédure représentative et largement appliquée, la prostatectomie radicale robot-assistée peut servir de bon exemple pour démontrer la courbe d'apprentissage. Malgré

de nombreuses publications, il n'y a toujours pas de consensus sur le nombre de procédures nécessaire pour surmonter la période initiale d'apprentissage. Un nombre variant de 12 à 250 (par rapport à 200-750 pour la prostatectomie laparoscopique) a été proposé en fonction de la définition utilisée [99]. Les premières séries de prostatectomie robotiques basées sur l'expérience précédente en chirurgie ouverte demandent souvent une durée opératoire de plus de 4,5 h ou même 6 h. Certaines études ont donc proposé une durée de 4 h comme le point final de la courbe initiale [100]. Pourtant, des chirurgiens experts à la chirurgie laparoscopique mais novices à la robotique peuvent contrôler le temps opératoire en dessous de 4 h à partir du début [101]. De plus, si évaluée par des résultats oncologiques ou fonctionnels optimaux (définis souvent différemment par des chercheurs), la courbe d'apprentissage peut être beaucoup plus longue [20,102]. Les standards restent à établir pour la définition de la courbe d'apprentissage avant que le consensus puisse être atteint.

## **I.4 - Simulateurs robotiques**

### **I.4.1 - Systèmes disponibles**

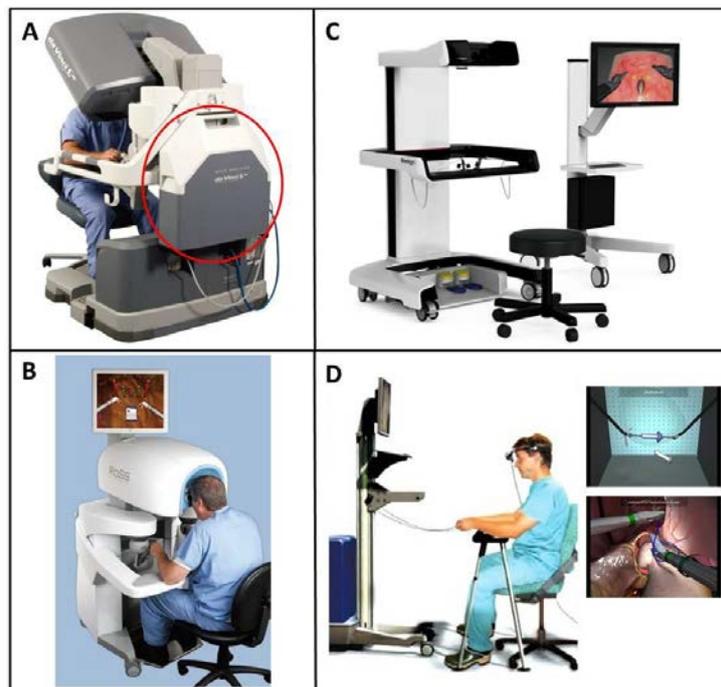
La simulation chirurgicale a considérablement évolué au cours de ces deux dernières décennies avec le développement de la chirurgie laparoscopique et maintenant robotique. Cette approche de la formation chirurgicale a été validée comme un outil de formation et d'évaluation. Il a été démontré qu'elle permet d'améliorer la performance du chirurgien au bloc opératoire [85,86].

La formation sur simulateur chirurgical peut être séparée en deux catégories principales : le simulateur physique (mécanique) – la tâche est exécutée habituellement dans une boîte en utilisant des vrais instruments ; et le simulateur en RV – la tâche est effectuée sur une plate-forme assistée par un ordinateur et dans des environnements virtuels produits artificiellement. Les améliorations du traitement de l'information ont conduit les simulateurs en RV à être plus réalistes. De plus, ils sont maintenant capables de fournir les informations statistiques sur la performance de l'utilisateur, une qualité que ne possède pas le simulateur mécanique [76].

Avant qu'un simulateur chirurgical puisse être utilisé pour évaluer les compétences des chirurgiens, il doit bénéficier de tests initiaux de validation à travers une variété de paramètres. Ceux-ci comprennent l'évaluation de la validité apparente qui examine le réalisme du

simulateur; la validité de contenu examinant si le système enseigne ce qu'il est supposé d'enseigner; la validité de construit concernant sa capacité à différencier les novices et les experts; la validité concurrente qui teste dans quelle mesure les résultats sur le simulateur sont liés aux résultats lors d'un test de référence dans le même domaine; et la validité prédictive qui évalue dans laquelle mesure la performance sur le simulateur prédit la performance future en clinique [103].

Il y a actuellement cinq simulateurs robotiques en RV sur le marché (Figure 9) : le dVT de *Mimic Techlogies* (Seattle, WA, États-Unis), le da Vinci® Skills Simulator™ (dVSS) d'*Intuitive Surgical*, le Robotic Surgery Simulator® (RoSS) de *Simulated Surgical Systems* (Williamsville, NY, États-Unis), le SimSurgery Educational Platform® (SEP) de *SimSurgery* (Oslo, Norvège), et le RobotiX Mentor™ de *Simbionix* (Cleveland, OH, USA) qui a été sorti plus récemment en septembre 2014 [104–108].



**Fig. 9** Les simulateurs robotiques commerciaux : le dVSS (A), le RoSS (B), le RobotiX Mentor (C) et le SEP (D)

Pour l'instant, le dVT est le système le plus largement adopté, avec également le plus d'études de validation [76,109]. Le dVSS d'*Intuitive Surgical* a intégré la technologie de simulation du dVT et du RobotiX Mentor. Il est installé sur la console du da Vinci® Si, le transformant en une plate-forme d'apprentissage qui peut être utilisée dans ou à l'extérieur du bloc opératoire. Il présente des avantages uniques puisqu'il utilise le vrai robot comme interface. Le RoSS dispose d'un modèle qui est connu comme le « HoST » dans lequel le simulateur guide les mains de l'utilisateur à reproduire les mouvements du chirurgien dans

une procédure chirurgicale réelle, sur toute sa durée et en 3D. Le SEP dispose d'une console connectée à deux instruments avec 7 ddl. Contrairement au système de robot, il ne fournit pas d'images 3D. Le RobotiX Mentor est le seul système qui dispose d'exercices permettant aux utilisateurs d'effectuer librement des procédures chirurgicales spécifiques. Il inclut aussi le modèle de dôme développé par le programme de FRS.

Concernant les prix, le RoSS et le dVT coûtent environ 100 000 \$ ; le dVSS coûte environ 90 000 \$ mais auquel il convient d'ajouter la console supplémentaire (500 000 \$) ; le SEP le moins cher coûte environ 60 000 \$.

Les validités apparente, concurrente, de contenu et de construit ont été déterminées pour les systèmes dVT, RoSS et dVSS, mais la validité prédictive a été déterminée uniquement pour le dVSS. En outre, le logiciel d'analyse de performance du dVT a été validé de manière indépendante. L'expérience du SEP est plus limitée par rapport aux autres simulateurs, et certains chercheurs ont déclaré que les validités apparente et de construit devaient être améliorées avant la mise en œuvre du SEP dans son état actuel [63,91,92]. La validité du RobotiX Mentor reste à déterminer.

En outre, l'*Altair Robotics Lab* (Verona, Italie) a présenté le simulateur Xron en 2013 qui comporte plusieurs configurations matérielles. Il est lancé en bêta publique : le logiciel est gratuitement disponible à la demande [111]. Le laboratoire de biomécanique de l'Université du Nebraska à Omaha a développé un simulateur en RV qui n'est pas commercialisé [112]. En outre, le simulateur chirurgical ProMIS<sup>®</sup> (Haptica, Dublin, Irlande) visant à la formation de techniques laparoscopiques a été connecté avec le système da Vinci<sup>®</sup> dans quelques études pour la formation de chirurgie robotique [113].

## **I.4.2 - Simulateur dVT**

### *I.4.2.1 Modules d'exercices*

Le dVT est le simulateur utilisé dans notre centre pour la formation et l'étude. Il a été mis sur le marché par *Mimic Technologies* en 2007. Le dVT est constitué d'une console proche de la console du robot da Vinci<sup>®</sup>, d'un système de vision binoculaire ainsi que de deux manettes dont la position dans l'espace est réglée par des câbles reliés à des micromoteurs. À ses pieds, l'utilisateur dispose d'une réplique du pédalier du robot da Vinci<sup>®</sup> avec les pédales de caméra, de débrayage et de coagulation (Figure 10).



**Fig. 10** Le simulateur robotique dV-Trainer<sup>®</sup> : la vue d'ensemble (A), la manette (B) et le pédalier (C)

La plate-forme MSim<sup>™</sup> du dVT permet la simulation de plus de 60 exercices pour aider les stagiaires à acquérir les connaissances et les techniques de la chirurgie robotique, ce qui recouvre l'aperçu du robot da Vinci<sup>®</sup>, les techniques basiques de manipulation, les techniques chirurgicales avancées et aussi la connaissance des procédures spécifiques [114]:

1) Connaissances et techniques de base

- Aperçu de la console da Vinci<sup>®</sup> – passer en revue les fonctionnalités de base de da Vinci<sup>®</sup>, tels que les icônes, l'ergonomie et les paramètres ;
- Manipulation EndoWrist<sup>®</sup> – développer la dextérité de EndoWrist<sup>®</sup> en travaillant avec deux ou trois instruments chirurgicaux de da Vinci<sup>®</sup> ;
- Caméra et débrayage – améliorer le contrôle de la caméra et apprendre à utiliser le débrayage de manière efficace ; s'entraîner sur le réglage de l'échelle du mouvement ;
- Dépannage – comprendre les messages d'erreur de da Vinci<sup>®</sup> et déterminer comment y réagir.

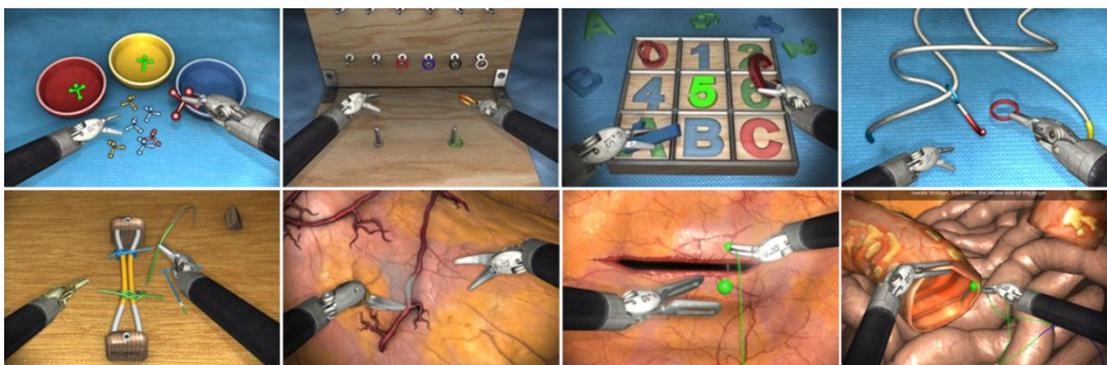
2) Techniques chirurgicales avancées

- Contrôle et conduite de l'aiguille – développer les compétences lors de la manipulation des aiguilles ;
- Suture et nœud – améliorer les techniques de suture et de nœud avec une variété de géométries communes à la chirurgie robotique ;
- Energie et dissection – apprendre à appliquer correctement l'énergie monopolaire et bipolaire ; pratiquer la dissection et gérer le saignement ;
- Jeux – développer les techniques de manipulation en jouant (aux jeux sérieux).

### 3) Connaissances de procédures spécifiques

- Maestro™ AR – Utiliser les instruments virtuels et la vidéo 3D de procédure chirurgicale pour faire avancer la prise de décisions cliniques et la connaissance de procédures ; affiner les techniques spécifiques pour les procédures.

Plus d'exercices, comme le modèle de dôme de FRS, sont en cours de développement et seront disponibles sur le dVT. Certains exemples des exercices du dVT sont illustrés dans la [Figure 11](#).



**Fig. 11** Certains exercices disponibles sur le simulateur robotique dV-Trainer®

#### *1.4.2.2 Système de notation*

Le dVT fournit un système de notation intégré – le MScore™. L'évaluation du MScore™ est basée sur les données de la moyenne et de l'écart type recueillies auprès de plus de 100 chirurgiens expérimentés qui ont chacun réalisé plus de 75 procédures robotiques. Plusieurs mesures sont utilisées pour représenter la performance pendant un exercice :

- Temps de réalisation de la tâche (TRT, en secondes) ;
- Économie du mouvement (EM, en centimètres) – la distance totale parcourue par les instruments ;
- Collisions des instruments – le nombre de fois où un instrument est en collision avec un autre ;
- Chutes – le nombre de fois où la pièce saisie par les instruments tombe sur le plancher ;
- Cibles manquées – le nombre de fois où le but n'est pas correctement touché ou traversé ;

- Instruments hors de vue (en centimètres) – la distance totale parcourue par les instruments lorsqu'ils ne sont pas en vue ;
- Gamme d'espace de travail (en centimètres) – le rayon combiné des deux sphères qui encapsulent le trajet parcouru par chaque manette ;
- Force excessive d'instruments (en secondes) – le temps total pendant lequel la force d'instrument appliquée à l'instrument dépasse le seuil donné ;
- Temps d'énergie mal appliquée (en secondes) – le temps total où l'énergie n'est pas correctement appliquée sur le tissu cible ou celui où une énergie excessive dépasse un seuil donné ;
- Volume total de saignement ;
- Vaisseaux déchirés – le nombre de fois où les vaisseaux sanguins sont déchirés.

Chaque mesure est présentée avec la valeur exacte et un score calculé selon les données d'experts. Un score global est aussi fourni pour synthétiser les résultats de toutes les mesures (Figure 12). L'utilisateur peut choisir deux systèmes de notation selon les besoins: le système classique qui fournit un score sous forme pourcentage, ou le système « basé sur les compétences » qui calcule le score différemment lorsqu'une erreur critique est faite ou non.



Fig. 12 Le système de notation MScore™ du dV-Trainer®

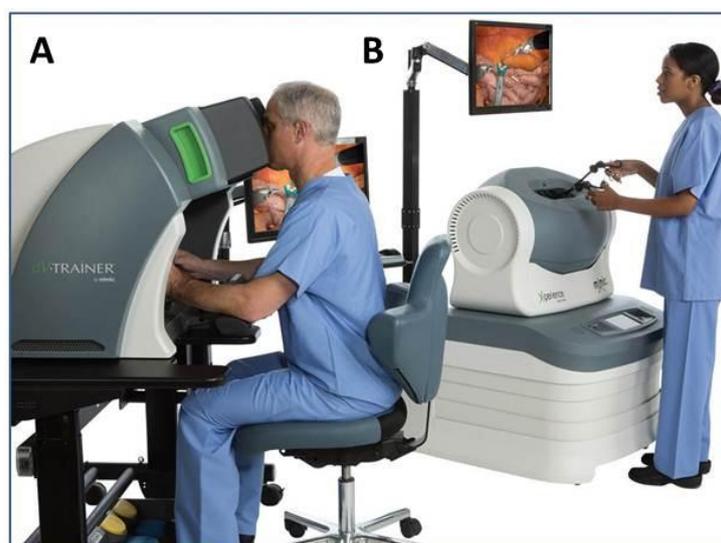
#### 1.4.2.3 Xperience™ Team Trainer

Contrairement à la chirurgie ouverte ou à la chirurgie laparoscopique traditionnelle, le chirurgien robotique et son assistant sont séparés par une distance et ils ne partagent pas la

même vision (3D pour le chirurgien et 2D pour l'assistant). Le chirurgien assis à la console n'a qu'une vision du champ opératoire et perd tout contact visuel avec le reste de l'équipe, alors que celui-ci représente 80% des moyens de communication dans la vie courante. De plus, le chirurgien n'a pas d'accès direct au patient, et l'aide fournie par l'assistant est importante et parfois cruciale dans ces procédures. Tout ceci signifie qu'une nouvelle façon de coopérer doit être établie, et les chirurgiens robotiques ainsi que les assistants doivent être entraînés afin de parvenir à une maîtrise des procédures. Ni les chirurgiens robotiques ni leurs assistants ne devraient effectuer leur courbe d'apprentissage initiale au bloc opératoire. Ils devraient passer par une formation adéquate et leurs techniques devraient être évaluées et certifiées.

En 2014, *Mimic Technologies* a introduit le système XTT sur la base du dVT pour que le chirurgien et l'assistant puissent s'entraîner ensemble. Il consiste en deux simulateurs, l'un (le dVT) simulant la console du robot, et l'autre (le XTT) simulant l'environnement côté patient, auxquels s'exercent respectivement le chirurgien et son aide. Les deux simulateurs sont connectés ce qui permet un travail en équipe (Figure 13). Cette plate-forme peut être valable pour le développement de la communication efficace de l'équipe, et ainsi pour la formation des assistants robotiques.

Actuellement, treize exercices sont disponibles pour le travail en équipe. Ils concernent principalement trois techniques d'assistance : le transfert & la passe, la traction et l'application de clips. Le même système de notation (le MScore™) est appliqué pour évaluer respectivement la performance de l'opérateur sur le dVT et celle de l'assistant sur le XTT.



**Fig. 13** Le travail en équipe d'un opérateur sur dVT (A) et son assistant sur le XTT (B)

## **II - Téléchirurgie**

### **II.1 - Histoire du développement**

#### **II.1.1 - Définition**

La téléchirurgie est la capacité d'utiliser les technologies d'information, les télécommunications et les systèmes robotiques pour permettre l'intervention chirurgicale, quand le chirurgien et le patient sont séparés par une distance [115].

#### **II.1.2 - Avantages**

Les avantages potentiels de la téléchirurgie sont multiples. Souvent, les habitants des régions éloignées n'ont pas de chirurgiens experts à proximité. Pour bénéficier d'une procédure chirurgicale, ils sont forcés de parcourir de grandes distances, ce qui conduit à une inefficacité en temps et en coût et parfois retarde la prise en charge. La téléchirurgie permet au chirurgien d'opérer dans un site éloigné et ainsi fournit une solution appropriée pour ce problème, ceci est surtout important pour les pays très étendus en surface. En outre, les patients qui cherchent l'aide d'un chirurgien spécialisé ne sont plus obligés de se rendre dans un autre pays pour bénéficier de certaines procédures [116].

La téléchirurgie favorise aussi la communication entre chirurgiens. Habituellement, les chirurgiens dans un hôpital de catégorie inférieure doivent quitter leur poste de travail pour apprendre de nouvelles techniques ou se perfectionner. Cependant, grâce à une double console, la téléchirurgie robotique permet la coopération entre le chirurgien expert à distance et le chirurgien local, ce qui rend possible une formation de proximité virtuelle [117].

Dans un environnement extrême tel que les champs de bataille, la téléchirurgie présente des avantages uniques puisqu'elle évite aux chirurgiens d'être exposés en situation dangereuse mais dans le même temps, préserve la vie des blessés en les rendant accessibles à une chirurgie d'urgence. En outre, dans les missions spatiales, la téléchirurgie peut être le seul moyen de fournir des soins chirurgicaux aux astronautes [29].

### II.1.3 - Brève histoire

Comme mentionné dans chapitre I, l'intérêt de la téléchirurgie a été identifié par la NASA en 1972, et le premier prototype du robot téléchirurgical a été développé en 1991. L'armée américaine s'est intéressée à cette technologie et a sponsorisé le développement du système « Green ». En 1994, l'unité chirurgicale de ce système a été installée dans l'équipe chirurgicale en zone médicale d'avant (*Medical Forward Area Surgical Team*, MEDFAST) pendant un exercice de combat. Le chirurgien vasculaire Jon Bowersox a effectué la première procédure de téléchirurgie, une anastomose intestinale ex vivo sur une console intégrée dans un hôpital chirurgical avancé mobile (*Mobile Advanced Surgical Hospital*, MASH). Peu après, ce programme a été suspendu en raison de la situation militaire et politique de l'époque, tandis qu'un projet similaire, le « Trauma Pod », a été initié en 2005 avec l'objectif de renforcer les soins aux blessés sur le champ de bataille par le développement de plateformes mobiles autonomes et semi-autonomes grâce à l'intégration des systèmes télérobotiques et robotiques médicaux. La première phase de Trauma Pod a été terminée en 2007. Elle a réussi à automatiser des fonctions typiquement effectuées par l'infirmière instrumentiste et l'infirmière circulante (Figure 14). La deuxième phase du programme sera de développer les méthodes pour le contrôle autonome de la voie aérienne et de l'accès intraveineux. Finalement, ces systèmes seront miniaturisés et intégrés dans une plate-forme tactique capable d'opérer sur un champ de bataille [118].



Fig. 14 Trauma Pod Phase 1 – Vue panoramique

*Computer Motion* et *Intuitive Surgical* ont mis au point respectivement le robot Zeus<sup>®</sup> et da Vinci<sup>®</sup> en 1999. Ils n'ont pas été conçus pour la téléchirurgie mais se sont avérés être des plates-formes solides pour tester différents scénarios téléchirurgicaux.

Entre 1994 et 2003, l'Institut de Recherche contre les Cancers de l'Appareil Digestif (IRCAD, Strasbourg, France) et le *Computer Motion* ont travaillé ensemble sur plusieurs expérimentations de téléchirurgie [119]. Après six cholécystectomies porcines, la première procédure humaine transatlantique, l'opération « Lindbergh », a été réalisée avec Zeus<sup>®</sup> le 7 septembre 2001 [120]. Elle a été baptisée du nom de l'aviateur Charles Lindbergh qui a effectué la première traversée de l'Atlantique sans escale entre New York et Paris à bord de l'avion *Spirit of St. Louis*. Jacques Marescaux et ses collègues ont contrôlé le robot à partir de New York, alors que le patient était 7000 km de Strasbourg. Une femme de 68 ans avec un antécédent de lithiase biliaire symptomatique a bénéficié d'une cholécystectomie sans incident. Un lien dédié de fibre optique de grande qualité du mode de transfert asynchrone (MTA) a été fourni par France Télécom, avec un délai de télécommunication détecté d'une moyenne de 155 ms.

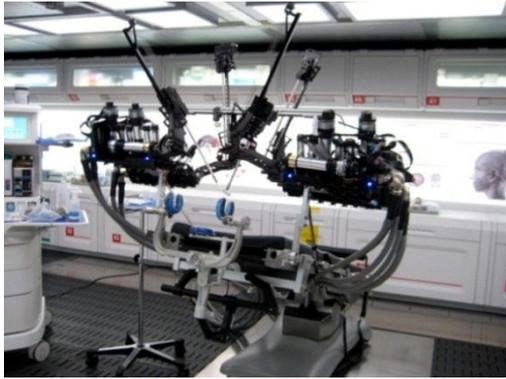
Moins de deux ans après, le premier réseau ordinaire du service téléchirurgical au monde a été construit au Canada et géré régulièrement entre *St. Joseph's Healthcare*, un hôpital d'enseignement affilié à l'Université McMaster (Hamilton, Ontario), et un hôpital communautaire à *North Bay* distant de 400 km, en utilisant le robot Zeus<sup>®</sup> [117]. Le délai moyen enregistré était d'environ 150 ms en utilisant un lien commercial Internet à haut débit sur le réseau privé virtuel (RPV). Ce succès, comme les fondateurs l'ont déclaré, a marqué la transition de la téléchirurgie d'une nouveauté expérimentale à une réalité clinique. Dans une publication en 2007, Mehran Anvari et ses collègues ont décrit la réalisation de 22 procédures téléchirurgicales, y compris la fundoplicature, la résection sigmoïde, la réparation herniaire, etc. [121].

Marescaux et Anvari ont tous utilisé des lignes dédiées pour la transmission des informations au cours de leurs procédures téléchirurgicales. En 2005, le *Telemedicine & Advanced Technology Research Center* (TATRC) de l'armée américaine a présenté la téléchirurgie de collaboration avec le système da Vinci<sup>®</sup> modifié en utilisant l'Internet public [21]. Quatre porcs ont subi une néphrectomie droite laparoscopique. Pour l'une des quatre interventions, le chirurgien local contrôlait deux des trois bras du robot, tandis que le chirurgien à distance contrôlait un bras, et ces rôles ont été inversés pour les trois autres

procédures. Le chirurgien local contrôlait la cautérisation électrique via une pédale dans tous les cas. Le délai d'aller-retour moyen était de 450 ms de Denver à Sunnyvale pour deux procédures et de 900 ms de Cincinnati à Sunnyvale pour les deux autres.

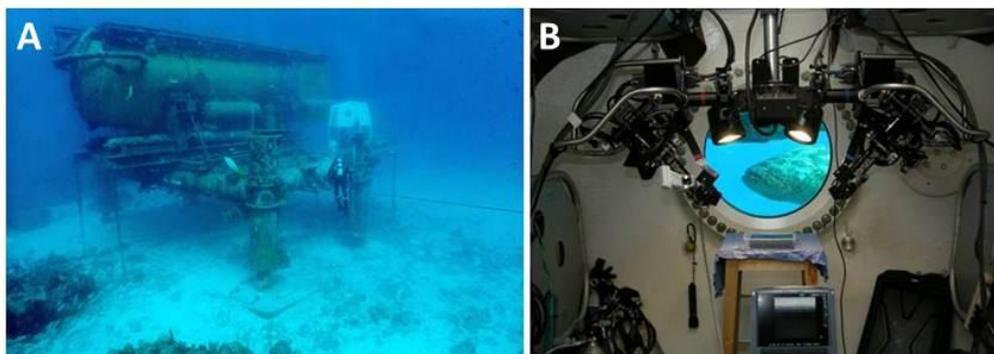
Un autre groupe canadien, le *Canadian Surgical Technologies and Advanced Robotics* (CSTAR), a rapporté une série d'essais téléchirurgicaux avec des robots et des lignes de communication différentes. Dans le premier essai, la dissection de l'artère mammaire interne a été réalisée sur huit porcs en utilisant le Zeus<sup>®</sup>. Chaque procédure a été effectuée pendant 30 min avec le réseau du sol et a commuté pendant les 30 min suivantes sur le réseau satellite [122]. Dans un autre essai, dix-huit pyéloplasties porcines ont été effectuées sur Zeus<sup>®</sup> avec trois types de communication, la liaison en temps réel, la ligne terrestre et la liaison par satellite [123]. Après cela, la capacité de téléchirurgie du système da Vinci<sup>®</sup> a été évaluée dans le même modèle porcin de pyéloplastie. Il a été déclaré que la performance était significativement supérieure avec da Vinci<sup>®</sup> par rapport à Zeus<sup>®</sup> [124].

Les scientifiques du laboratoire *BioRobotics* de l'Université de Washington ont développé un robot chirurgical portable pour le vaisseau spatial d'une masse globale de 22 kg. Le robot sponsorisé par l'armée américaine, appelé Raven, fonctionne avec les mêmes principes que le système da Vinci<sup>®</sup> [125]. En juin 2006, Raven a été déployé dans le désert de *Simi Valley* (CA, États-Unis) pour les expérimentations de téléchirurgie sur un modèle inanimé. Le système a été alimenté par des générateurs de gaz et a été mis en place sous des tentes portables. Séparés par une distance de 100 mètres, les sites chirurgien et patient ont été reliés par un lien de données numériques aérien à bord d'un avion sans pilote, le PUMA d'*AeroVironment*. Deux chirurgiens ont effectué une série de tâches de télémanipulation chirurgicale sur une boîte gantée telle que les sutures [126]. Basé sur Raven, la deuxième génération du système a été développée. Raven II inclut toutes les mêmes capacités de téléprésence de Raven et propose de nombreuses améliorations qui le rendent mieux adapté à un large éventail de recherches en téléchirurgie [127] (Figure 15). En février 2012, sept systèmes Raven II ont été construits et distribués aux chercheurs des États-Unis à l'Université de Harvard, l'Université Johns Hopkins, l'Université du Nebraska, l'Université de Californie (UC) de Los Angeles, d'UC Berkeley et d'UC Santa Cruz, et l'Université de Washington.



**Fig. 15** Le système robotique Raven II développé par l'Université de Washington

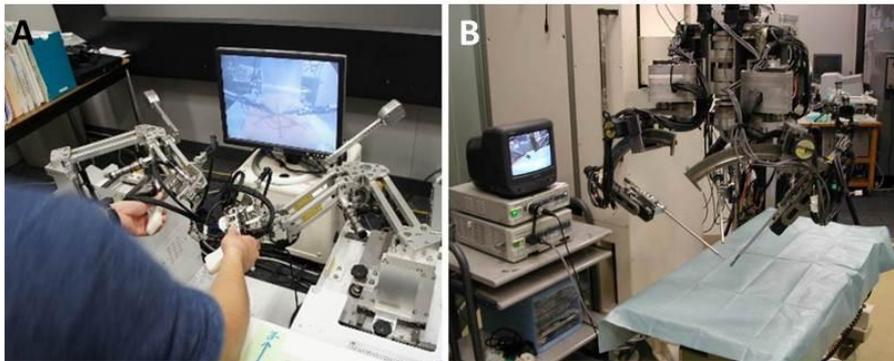
La NASA a réalisé plusieurs essais pour évaluer les technologies de téléchirurgie et télémentoring. Les « opérations de mission d'environnement extrême de NASA » (*NASA Extreme Environment Mission Operations*, NEEMO) ont eu lieu en Floride, dans le seul laboratoire sous-marin permanent du monde, l'Aquarius [128] (Figure 16). Un équipage maximum de six personnes peut vivre dans l'habitable de l'Aquarius. Plus d'une dizaine de projets NEEMO ont été menés depuis 2001, dont trois ont été axés sur la télémédecine. Le 7<sup>e</sup> projet NEEMO a eu lieu en octobre 2004 où une série de procédures médicales simulées avec le robot AESOP<sup>®</sup> ont été réalisées dans des conditions de téléopération et de télémentoring. Lors du 9<sup>e</sup> projet en avril 2006, l'équipage a dû assembler et installer un robot M7, le système développé par SRI, et effectuer une chirurgie abdominale sur un simulateur de patient. Le 12<sup>e</sup> projet s'est déroulé en mai 2007, et l'un de ses principaux objectifs était de mesurer la faisabilité de la téléchirurgie utilisant les robots Raven et M7 [129].



**Fig. 16** Le laboratoire sous-marin Aquarius (A) et la mission de NEEMO (B)

Au Japon, un système robotique a été développé à l'Université de Tokyo et testé lors de plusieurs essais téléchirurgicaux où les réseaux traditionnels ont été utilisés pour la télécommunication (Figure 17). Les cholécystectomies porcines ont été tout d'abord effectuées au Japon intérieur entre Tokyo et Shizuoka (une distance de 150 km). Le réseau numérique à intégration de services (RNIS) a été utilisé, qui représente l'infrastructure de

réseau la plus largement utilisée entre les établissements hospitaliers japonais [130]. Ensuite, la même procédure a été effectuée dans un environnement transnational entre le Japon et la Corée du Sud en utilisant l'Internet de Recherche & Développement, l'APII (*Asia-Pacific Information Infrastructure*), qui consiste en un câble optique sous-marin. Dans cet essai, l'opérateur a été confronté à un délai de 590 ms [131]. Pour diminuer l'impact du délai, un codec nouvellement développé a été utilisé dans un essai suivant entre le Japon et la Thaïlande entraînant un délai de 480 ms [132].



**Fig. 17** Le robot développé à l'Université de Tokyo : la console (A) et le robot d'esclave (B)

En juillet 2009, le programme Plugfest 2009 a été effectué grâce à une collaboration internationale [133]. Quatorze systèmes télérobotiques maître-esclave dispersés dans 9 sites du monde ont été connectés pendant une période de 24 heures. Les utilisateurs ont effectué 30 tâches de manipulation communes, dont 28 étaient un succès. Des délais de 21 à 112 ms ont été observés entre les sites aux États-Unis, et des délais de 115 à 305 ms ont été observés pour la communication intercontinentale. Ce programme a démontré la faisabilité de l'interconnexion d'un grand nombre de systèmes de téléopération hétérogènes en utilisant un protocole commun.

Plus récemment en Corée du Sud, le système robotique Lapabot a été développé au centre national du cancer coréen et aussi évalué dans un environnement téléchirurgical sur des modèles animaux [134,135].

## II.2 - Défis de la téléchirurgie

### II.2.1 - Aspects techniques

Le succès de la téléchirurgie repose sur une ligne de communication fiable et à haute vitesse pour la transmission des données. Dans un contexte réel d'utilisation, l'interruption de la connexion ou l'interférence doit être évitée avec des mesures d'urgence disponibles. Une bande passante suffisante ainsi que la qualité de service (*quality of service*, QoS) doivent être assurées pour la transmission de commandes de télémanipulation et de vidéos volumineuses de haute définition. Le délai de communication et la « gigue » (fluctuation du délai) doivent être minimisés pour la qualité des performances chirurgicales [115].

Le délai et la bande passante sont deux indices principaux de la performance d'un réseau. Le délai est défini comme le temps aller-retour de transmission pour un paquet de données voyageant entre deux points sur un réseau. Il peut être augmenté par un mauvais routage de réseau (trop de sauts), par la congestion du réseau, par des serveurs surchargés et par une faible vitesse des appareils connectés [124]. En téléchirurgie, le délai du réseau ne représente qu'une part du délai détecté par le chirurgien entre le mouvement de sa main et le feed-back de l'image. D'autres processus comme le codage/décodage des vidéos peuvent également introduire un délai significatif. Le délai représente la limitation principale de la téléchirurgie puisqu'un feed-back sensoriel asynchrone peut dégrader l'efficacité et la sécurité de la chirurgie.

Pendant une procédure téléchirurgicale, le chirurgien à distance compte sur la vidéo du champ opératoire pour évaluer l'interaction avec les tissus. Afin d'assurer un feed-back visuel de qualité supérieure, une haute fréquence d'échantillonnage doit être appliquée sur le site du patient. Avec le feed-back de vidéo de haute définition ceci exige une bande passante importante. Dans les circonstances ordinaires, une connexion de 10 Mbps est déjà adaptée à la téléopération, mais dans le cas de la haute définition, l'équipement multimodal et un lien de 40 Mbps à deux canaux seraient nécessaires [136]. De plus, pour assurer une transmission stable des informations critiques, la qualité de service prédéfinie est importante. Habituellement, la priorité de transmission doit être distribuée au signal de contrôle et la vidéo, suivi par d'autres services comme la téléconférence et la gestion du réseau.

La perte de paquets est un autre problème à prendre en compte dans la téléchirurgie. Il correspond à l'échec de réception de paquets de données transmis, et représente la cause la

plus commune des erreurs du réseau. L'échec de réception des paquets peut aggraver le délai et, dans les cas plus critiques, la perte de données et la rupture de communication. Les causes principales de perte de paquets comprennent la surcharge du réseau, la bande passante limitée, les mécanismes d'évitement de congestion et les pannes de matériels [124]. Dans tous les cas, une rupture de communication serait dangereuse compte tenu la nature critique de la chirurgie, et des mesures d'urgence doivent être établies pour la récupération rapide de la connexion. En outre, le cryptage rigoureux du réseau est important pour protéger l'intégrité des données et l'intimité du patient [21].

D'autres difficultés peuvent survenir avec le protocole de données des robots qui relie la console aux bras. Actuellement, la majorité des systèmes de téléprésence applique le *Transmission Control Protocol* (TCP) (protocole de contrôle de transmission) qui est utilisé avec l'*Internet Protocol* (IP) (protocole Internet) pour envoyer les données sous la forme de paquets d'unités individuels. Un autre type commun est l'*User Datagram Protocol* (UDP) (protocole de datagramme utilisateur), un protocole sans connexion qui, comme le TCP, s'exécute au-dessus d'IP. L'UDP/IP fournit très peu de services de récupération d'erreur, au lieu de cela, il offre une manière directe d'envoyer et recevoir des datagrammes. Le MTA (mode de transfert asynchrone) qui code pour le trafic de données en petits paquets de taille fixe est également fréquemment utilisé, mais il manque de services de sécurité avancés, tout comme le protocole UDP/IP. En cas de panne de communication, le temps de récupération peut être critique. Une architecture de passerelle reconçue doit être ajoutée pour permettre au transfert TCP de survivre à un blocage de longue durée [137].

Actuellement, afin de répondre à tous les besoins mentionnés ci-dessus, les chercheurs doivent se tourner vers le service commercial afin d'établir des lignes de communication dédiées, qui sont pourtant coûteuses et souvent absentes dans la plupart des hôpitaux. Certains ont examiné la faisabilité de la téléchirurgie en utilisant l'Internet public, les réseaux traditionnels et le satellite, mais ont été confrontés à des délais significatifs et des échecs de connexion. La téléchirurgie devra attendre les progrès des technologies de communication pour une application étendue.

## II.2.2 - Aspects non-techniques

Il y a de nombreux défis non-techniques : le personnel, le coût, la responsabilité, la licence, des défis culturels et linguistiques, etc. Chacun joue un rôle important dans l'adoption plus large de la téléchirurgie [115].

L'intégration d'une innovation technologique peut perturber des procédures standardisées, en changeant le processus et la structure des tâches exécutées. Le changement des opérations implique le personnel à chaque étape du processus. Si la téléchirurgie s'implante dans l'environnement clinique, le personnel de tous les secteurs de la santé devra être impliqué dans la conception et la mise en œuvre de telles procédures. Selon le rôle de chacun, il devra suivre une formation adaptée.

La téléchirurgie a l'avantage potentiel de réduire le coût et d'améliorer l'efficacité du service chirurgical. Cependant, cet impact positif n'apparaîtra pas à court terme car il y a beaucoup de coûts associés à la téléchirurgie. Ceux-ci comprennent le coût des systèmes robotiques, de la télécommunication, des infrastructures, de la formation du personnel, et le coût de la recherche et du développement.

Les services basés sur des lignes dédiées commerciales sont très onéreux et seuls les gouvernements ou les grands instituts peuvent les financer. L'obtention d'un financement à long terme pour les services de téléchirurgie sera un défi. La plupart des initiatives de téléchirurgie ont été financées par des subventions gouvernementales. Bien que ce financement soit essentiel pour l'initiation, il n'est souvent pas sur le long terme. Des modèles commerciaux rentables et durables doivent être développés.

La téléchirurgie permet la consultation et la participation d'experts. Des frontières étatiques et internationales peuvent être franchies et des conflits juridictionnels peuvent se produire. Les complications sont inévitables en chirurgie, et si celles-ci se produisent en téléchirurgie, la charge de la preuve pour tracer l'erreur du médecin ou la faute technique doit être établie. Pour que la téléchirurgie soit acceptée, les médecins doivent être convaincus que la responsabilité sera précisément évaluée. Dans notre société procédurière d'aujourd'hui, cela peut constituer un obstacle important à surmonter. Non seulement les lois nationales, mais également les lois internationales compliquent la situation. Certains efforts ont été faits pour résoudre ces problèmes, comme par exemple en téléradiologie. Ces premiers efforts constituent une base à partir de laquelle il est possible d'avancer.

La téléchirurgie est un domaine émergent et les principes directeurs pour l'établissement de la configuration du système, l'évaluation de la maîtrise et de compétences n'ont pas été établis. Un programme d'études et des principes directeurs de sa pratique doivent être établis. Les participants doivent exécuter un ensemble standardisé de procédures, et les performances seront évaluées permettant d'accorder une compétence au chirurgien. La licence permettrait une référence qui peut être comptée pour l'excellence.

La gouvernance clinique de la qualité des soins livrés à travers les frontières peut être un défi. Il y a des difficultés potentielles sur le contrôle de la justification des procédures, la qualité et l'entretien de l'équipement et la confidentialité du patient. En outre, l'assurance du consentement éclairé pour le partage des dossiers médicaux et des images peut être difficile dans les établissements des pays à revenu faible ou intermédiaire, en particulier où il y a des taux élevés d'analphabétisme et des connaissances limitées avec les technologies utilisées. Il a été discuté que si les données de santé doivent être partagées au-delà des frontières, ceci devrait être porté à la connaissance des patients par le consentement explicite ou implicite, et il devrait être inclus dans les contrats [138].

Tous les prestataires de services impliqués dans la téléchirurgie transfrontalière doivent surmonter le défi de travailler à travers des cultures et des langues différentes. Il pourrait aussi y avoir la difficulté d'établir la confiance entre les professionnels de santé de différents pays. En outre, Les professionnels de santé peuvent être réticents à de nouvelles façons de travailler et peuvent être résistants aux avancées technologiques dans les services de santé. Dans de nombreuses cultures, il peut être considéré comme un « échec » pour un médecin de demander de l'aide à travers un service de télémédecine, ceci l'obligeant à reconnaître ses limites [139]. Finalement, l'acceptation des patients et du public des services de téléchirurgie et leur confiance envers les professionnels de la santé impliqués seraient un autre défi à surmonter.

## **II.3 - Délai en téléchirurgie**

### **II.3.1 - Origine**

Le délai de communication est la limitation principale de téléchirurgie lorsque la procédure est effectuée sur des grandes distances ou des réseaux de qualité de service faible. Le délai aller-retour en téléchirurgie se présente comme le temps qui s'écoule entre l'initiation

d'un mouvement aux manettes par le téléchirurgien et le retour des images sur la console. Il provient de plusieurs processus [123,134] :

- Détection et renouvellement de la commande de position en suivant la manipulation des manettes par le chirurgien
- Transmission du signal de contrôle sur le réseau
- Réception, interprétation de la commande, et réaction du robot d'esclave
- Codage, transmission et décodage des vidéos du champ opératoire
- Synchronisation des vidéos (pour obtenir une vidéo 3D)

Parmi tous les processus, le codage/décodage et la transmission des vidéos se présentent comme la principale source potentielle du délai.

### **II.3.2 - Impact**

La désynchronisation entre le mouvement des mains et le feed-back des images peut dégrader l'efficacité et la sécurité de la procédure chirurgicale. Il est important de déterminer l'impact du délai sur les performances chirurgicales avant la mise en œuvre clinique de la téléchirurgie. Des efforts ont été faits et l'expérience a été obtenue par différentes expérimentations en laboratoire « humide » (*wetlab*) et ainsi qu'en laboratoire « sec » (*drylab*).

#### *II.3.2.1 - Expérimentations en laboratoire « humide »*

Le groupe de l'opération Lindbergh a réalisé une série d'expérimentations animales avant la procédure humaine transatlantique durant lesquelles les effets et les limites du délai ont été étudiés [119]. Quatre chirurgiens laparoscopiques ont subjectivement jugé l'impact du délai et il a été convenu que la « zone de confort » du délai pour effectuer la téléchirurgie était d'environ 330 ms. Un délai inférieur à cette limite semblait être relativement facile à maîtriser pour les chirurgiens, et les délais de plus de 330 ms étaient plus problématiques. Certains chirurgiens ont estimé qu'ils pourraient apprendre à s'adapter aux délais allant jusqu'à 500 ms, mais ils n'étaient pas à l'aise pour une procédure chirurgicale réelle dans de telles conditions.

Le groupe TATRC a déclaré, dans le rapport sur la téléchirurgie avec da Vinci<sup>®</sup>, que le délai de 450 ms était gérable et 900 ms s'est avéré lourd mais avait été surmonté par le chirurgien. Cependant, des données détaillées telles que la durée de la procédure et le stress mental des chirurgiens n'ont pas été fournies par les auteurs [21].

Dans l'expérimentation de la dissection de l'artère mammaire interne du groupe CSTAR, il n'y avait pas de différence significative dans la longueur de l'artère disséquée ni dans la qualité de la chirurgie en utilisant le réseau au sol et le satellite, bien que le délai sur satellite fût 10 fois plus élevé (600 ms contre 55 ms) [122]. Également, lors des procédures de pyéloplastie avec Zeus<sup>®</sup>, le temps d'intervention n'était pas différent avec les trois lignes de communication (liaison en temps réel, ligne terrestre et liaison par satellite). Cependant, les six premières procédures (sur 18) ont été effectuées à travers le réseau terrestre, et une tendance décroissante du temps opératoire a été clairement observée. On peut considérer qu'une différence existait mais a été gommée par l'effet d'apprentissage. Subjectivement, le chirurgien a déclaré une meilleure performance avec la liaison en temps réel et une difficulté supplémentaire avec le réseau satellitaire [123]. Dans les procédures de pyéloplastie avec da Vinci<sup>®</sup>, le temps moyen d'anastomose était 10,9 min avec la ligne en temps réel contre le 20,7 min avec la ligne terrestre (délai de 370 ms) [124].

Les procédures téléchirurgicales de cholécystectomie porcine avec le système de l'Université de Tokyo ont été effectuées au Japon intérieur, entre Japon-Corée et entre Japon-Thaïlande, et des délais de 482 à 592 ms ont été observés. La durée d'opération était d'environ 90 min y compris le temps d'installation, ce qui est à peu près égal à celui d'une cholécystectomie laparoscopique traditionnelle [130–132].

### *II.3.2.2 - Expérimentations en laboratoire « sec »*

Thompson et ses collègues ont examiné la performance d'un téléchirurgien et un assistant local pour effectuer des tâches laparoscopiques simulées sous différentes conditions de délai, avec les feedbacks de force et la vidéo synchrones ou asynchrones [140]. Le chirurgien de test était un médecin de la salle d'urgence et anesthésiste, et les assistants étaient six étudiants ingénieurs. Il a été constaté que les délais élevés (600 ms et 1200 ms) ont significativement dégradé la performance, et que la manipulation était plus rapide avec les feedbacks (de force et de vidéo) synchrones.

Fabrizio *et al.* ont conçu un essai en deux phases pour évaluer l'impact du délai [141]. Dans la première phase, une série de tâches a été effectuée avec des délais croissants. Dans la deuxième phase, un chirurgien de Baltimore a effectué des tâches à 9000 miles de distance à Singapour. Les résultats ont montré que le nombre d'erreurs et le TRT ont augmenté, et la précision de manipulation a diminué progressivement lorsque le délai augmentait, bien qu'une

courbe d'apprentissage existe pour chaque tâche. Les auteurs ont déclaré un délai acceptable de moins de 700 ms, avec lequel les chirurgiens peuvent compenser la dégradation des performances.

Kim *et al.* ont créé un environnement de téléchirurgie à une station de techniques laparoscopiques. Trois chirurgiens ont réalisé un nœud et 7 résidents ont effectué des tâches plus simples de précision et de dextérité. Des délais consécutivement croissants par incréments de 50 ms ont été introduits [142]. Pour toutes les tâches, une augmentation progressive du délai a été associée à une augmentation significative du TRT. Le délai a influencé le mouvement des instruments à tous les niveaux, mais la performance est devenue problématique au-delà de 400 ms. Une compensation du délai a été observée, et elle était de deux types : l'adaptation initiale impliquait une manipulation plus lente, et l'adaptation tardive comprenait une stratégie de « déplacement-et-attente ».

Anvari *et al.* ont déclaré que le satellite est un mode de communication largement accessible mais pouvant introduire un délai plus de 500 ms. Ils ont ainsi évalué la possibilité d'effectuer des tâches chirurgicales avec la précision adéquate à un délai approchant 500 ms [143]. Cinq chirurgiens laparoscopiques ont réalisé avec succès trois tâches (passage de l'aiguille, suture et coupe) aux délais de 0, 175, 300 et 500 ms, mais plus le délai était long plus il était associé à un TRT et un taux d'erreur (défini par les auteurs) croissant. De plus, il y avait des variations significatives entre les chirurgiens et les tâches. Cette variation dépend-elle du niveau d'expérience chirurgicale ou est-elle associée à la capacité innée des chirurgiens ? Ceci n'a pas été étudié.

Rayman *et al.* ont effectué des expérimentations pour tester la faisabilité de manœuvres typiques dans un environnement téléchirurgical [144]. Quatre exercices robotiques simples sur Zeus<sup>®</sup> ont été conçus pour simuler des manœuvres chirurgicales, y compris la saisie et le déplacement d'objet, la conduite d'objet et la manipulation d'aiguille courbe. Huit sujets ont effectué les quatre exercices aux délais de 0-600 ms, par incréments de 100 ms. En outre, un groupe de quatre sujets a effectué les exercices avec des délais aléatoires entre 0 et 1000 ms. Ces quatre sujets avaient été exposés à la plate-forme cinq jours par semaine pendant une période d'environ quatre mois. Tous les participants ont été capables d'achever les tâches à tous les délais. Dans les essais aléatoires, le TRT a augmenté progressivement lorsque le délai augmentait, mais il n'y avait pas d'augmentation significative du taux d'erreur. Les auteurs ont déclaré que le ralentissement du mouvement

pouvait minimiser les erreurs et simplifier la planification des tâches, mais cette stratégie n'était pas optimale pour la cadence de la chirurgie.

Le système robotique développé à l'Université de Tokyo a été impliqué dans une étude d'Arata *et al.* pour examiner l'impact du délai et du feed-back de force sur la performance téléchirurgicale [145]. Quinze sujets, incluant cinq médecins, ont effectué deux exercices sous différentes conditions de délai (0 ms, 230 ms et 330 ms) et de feed-back de force (avec/sans feed-back). Le TRT a augmenté avec le délai, et le groupe de médecins a surclassé le groupe de non-médecins. L'introduction du feed-back de force a démontré une tendance de réduire le TRT et la force appliquée sur l'extrémité de l'instrument. Les auteurs ont conclu selon ces résultats que le feed-back de force était une technologie essentielle pour les applications avancées de la téléchirurgie, et il pouvait être partiellement utilisé pour compenser l'inconvénient du délai.

Lum *et al.* ont examiné l'effet du délai sur la performance robotique dans une tâche de Transfert de Bloc (*Bloc Transfer*) [146]. Le système Raven de l'Université de Washington a été utilisé et des délais de 0, 250 et 500 ms ont été introduits. Quinze sujets ont été inclus dont 14 (cinq chirurgiens, neuf non-chirurgiens) ont réalisé les tâches. Le temps moyen de transfert de bloc et la longueur du trajet des instruments ont augmenté linéairement avec le délai, mais aucune différence significative n'a été observée entre les chirurgiens et les non-chirurgiens. Le nombre d'erreurs en réponse à l'effet du délai n'était pas significatif.

Kim *et al.* ont prouvé dans leur étude que le feed-back synchrone de la vidéo et la force avait une influence négative sur la performance (le TRT et le l'erreur) de téléopération, la performance était meilleur lorsque le délai du feed-back de force était ajusté au minimum [147].

Pour résumer, les études mentionnées ci-dessus ont démontré une tendance montrant qu'un délai croissant a un impact croissant sur la performance chirurgicale au niveau de l'efficacité (TRT et EM), la sécurité (erreurs) et le stress mental. Cependant, les opérateurs ont démontré la capacité potentielle de s'adapter au délai et d'effectuer des tâches avec des délais allant jusqu'à 1000 ms. Les stratégies principales de manipulation avec un délai utilisées par les opérateurs comprennent le ralentissement des mouvements et le déplacement-et-attente. Ces stratégies sont faisables sous condition expérimentale mais peuvent être problématiques dans un environnement chirurgical réel. En outre, le feed-back de force

pourrait être utile pour diminuer l'impact du délai, et il est optimal de l'appliquer au plus petit délai possible.

### **II.3.3 - Contrôle de l'impact du délai**

Idéalement, le délai doit être contrôlé à un niveau minimum, par l'utilisation des communications de qualité et à grande vitesse, où le téléchirurgien ne pourrait pas le détecter ou qu'aucune dégradation de performance ne se produise. La communication à fibre optique peut, dans une certaine mesure, répondre à cette exigence. En utilisant des lignes commerciales à fibre optique, le délai pourrait être de 20 à 400 ms à travers le monde. Il a été constaté dans le programme Plugfest 2009 que le délai était de 21-112 ms pour les connections à l'intérieur des États-Unis et de 115-305 ms pour les connections transcontinentales [133]. Cependant, cette communication dédiée est trop chère à utiliser et à maintenir donc n'est pas accessible dans la majorité des centres. Par ailleurs, on ne peut pas compter sur elle dans les contrées éloignées ou dans des environnements extrêmes. Les pionniers ont cherché à utiliser des connections plus accessibles telles que les réseaux traditionnels RNIS, l'Internet public et le satellite, mais ont été confrontés à des délais significatifs : plus de 500 ms avec RNIS, 450-900 ms avec l'Internet public, et d'environ 600 ms avec le réseau satellitaire [21,123,132]. Plus important encore, la sécurité et la stabilité de connexion ne peuvent pas être assurées avec des lignes de faible qualité. Le développement de la téléchirurgie dépendra donc principalement du développement des technologies de la communication.

Théoriquement, la communication par satellite a le potentiel de surmonter les lignes filaires essentiellement par la vitesse, la qualité de service et la disponibilité. Les connexions par satellite peuvent utiliser une flotte de satellites en orbite terrestre basse ou moyenne, où le délai d'aller-retour typique est de 40 ms, mais la bande passante est très limitée. Des satellites géostationnaires offrent un délai plus élevé en raison de leur 36 000 km d'altitude, le délai d'aller-retour est de 540 à 700 ms typiquement. Les satellites militaires dédiés peuvent fournir des chaînes de communication beaucoup plus rapides, et le délai minimum d'aller simple par bond de satellite pourrait être de 4,3 à 7,8 ms [148].

Au cas où un délai important est inévitable, des supports techniques peuvent être utiles pour que les chirurgiens s'y adaptent. Lorsque les humains sont confrontés au feed-back sensoriel asynchrone, ils ont tendance à créer une représentation virtuelle du site éloigné pour

prévoir les conséquences de leurs mouvements et planifier les mouvements des outils [149]. Fournir aux chirurgiens des indices visuels de leur position future est techniquement possible. Cette technique pourrait simplifier la procédure sous délai élevé. Une autre solution serait la semi-automatisation de la plate-forme robotique: le chirurgien débute un mouvement et laisse le robot accomplir le reste. Il est concevable en théorie parce que certaines des technologies nécessaires, bien que non pas spécifiquement développées pour la téléchirurgie, sont déjà disponibles ou en développement [62]. En outre, comme mentionné précédemment, la téléchirurgie serait simplifiée par l'existence du feed-back de force. Contrairement à la vidéo, le signal de force est beaucoup moins volumineux donc de délai de transmission plus faible.

Du point de vue des chirurgiens, ils ont eux-mêmes la capacité de s'adapter à un certain niveau de délai. Bien que le groupe Lindbergh ait déclaré la « zone de confort » du délai de 330 ms, les chirurgiens ont été capables d'accomplir des tâches aux délais beaucoup plus élevés, et un effet d'apprentissage a été observé dans certaines études [123,150]. Il est raisonnable de considérer que les chirurgiens peuvent améliorer leur performance en téléchirurgie par la formation aux délais.

## **PARTIE 2 : TRAVAUX REALISES**

---

*Dans cette partie, nous présenterons les quatre études que l'on a réalisées sur deux sujets : le sujet I concernant l'impact du délai en téléchirurgie, et le sujet II concernant la formation à la chirurgie robotique*

## Objectifs

Deux sujets ont été étudiés dans le cadre de cette thèse : la détermination de l'impact du délai en téléchirurgie et la formation aux techniques chirurgicales robotiques par la simulation en RV.

### a) Impact du délai

L'objectif principal était de déterminer, par des données objectives et subjectives précises, l'impact exact de différents délais sur la performance chirurgicale et le niveau de délai acceptable en téléchirurgie. Nous souhaitons ensuite déterminer l'effet de la formation au délai pour améliorer la performance téléchirurgicale. Deux études ont été effectuées et deux publications ont été réalisées.

### b) Formation en chirurgie robotique

L'objectif était de trouver un moyen de mieux utiliser le simulateur pour la formation de procédures robotiques spécifiques, et de déterminer la validité du XTT comme un outil d'évaluation des techniques d'assistance en chirurgie robotique. Deux études ont été effectuées dont une est proposée pour la publication et l'autre est en cours de rédaction.

# **Sujet I - Impact du délai en téléchirurgie**

## **I.1 - Impact du délai sur la performance chirurgicale**

### **I.1.1 - Organisation de l'étude**

Bien que plusieurs groupes de recherche aient essayé d'examiner les effets du délai sur la performance chirurgicale, cette question n'était toujours pas clarifiée à cause des limitations de ces études :

- Le nombre de sujets ou de niveaux du délai était trop petit pour obtenir des données suffisantes ;
- Les tâches étaient trop simples et demandaient peu de techniques chirurgicales ;
- Il manquait des mesures objectives ou subjectives précises ;
- La formation des sujets avec ou sans délai n'était pas suffisante pour obtenir des résultats fiables.

Des expérimentations plus structurées paraissaient donc nécessaires pour révéler les effets et les seuils du délai en téléchirurgie. Elles ont fait l'objet de ce travail.

Après une formation stricte tout d'abord sans délai et puis avec délai, seize étudiants en médecine ont effectué un exercice de dissection (Energy Dissection 1) et un exercice de suture (Tubes 2) sur le simulateur robotique dV-Trainer<sup>®</sup>, et des délais variant entre 0 et 1000 ms avec un intervalle de 100 ms ont été introduits aléatoirement et aveuglément. Le TRT, l'EM et les erreurs (collisions des instruments, instruments hors de vue, cibles manquées, etc.) ont été enregistrés automatiquement par le simulateur ; la difficulté, sécurité, précision et fluidité de manipulation ont été subjectivement évalués par des sujets sur une échelle continue de 0 à 4 (avec 0 le mieux et 4 le pire). L'acceptabilité potentielle des délais en téléchirurgie a aussi été jugée. Chaque sujet a passé plus de 12 h pour les expérimentations.

## I.1.2 - Publication

Article publié dans la revue « *Surgical Endoscopy* »

---

### **Determination of the latency effects on surgical performance and the acceptable latency levels in telesurgery using the dV-Trainer® simulator**

---

Song Xu<sup>1,2</sup>, Manuela Perez<sup>1,2,6</sup>, Kun Yang<sup>1,2</sup>, Cyril Perrenot<sup>1,2,6</sup>, Jacques Felblinger<sup>1,2,3,4,5</sup>, Jacques Hubert<sup>1,2,7</sup>

1. Université de Lorraine, IADI, Nancy, F-54000, France.
2. Inserm, U947, Nancy, F-54000, France.
3. Inserm, CIC-IT 801, Nancy, F-54000, France.
4. CHU Nancy, Imagerie / IADI, Nancy, F-54000, France.
5. CHU Nancy, Recherche / CIC-IT 801, Nancy, F-54000, France.
6. CHU Nancy, Department of Emergency and General Surgery, Nancy, F-54000, France.
7. CHU Nancy, Department of Urology, Nancy, F-54000, France.

#### **Abstract**

**Background:** The primary limitation of telesurgery is the communication latency. Accurate and detailed data are lacking to reveal the latency effects on surgical performance, furthermore, the maximum acceptable latency in telesurgery remains unclear.

**Methods:** Sixteen medical students performed an energy dissection exercise and a needle driving exercise on the robotic simulator dV-Trainer®, latencies varying between 0 and 1000 ms with a 100 ms interval were randomly and blindly presented. Task completion time, instrument motion and errors were automatically recorded. The difficulty, security, precision, and fluidity of manipulation were self-scored by subjects between 0 and 4 (0 the best, 2 moderate, and 4 the worst).

**Results:** Task completion time, motion and errors increased gradually as latency increased. An exponential regression was fit to the mean times and motions ( $R^2 > 0.98$ ). Subjective scorings of the four items were similar. The mean scores were less than 1 at delays  $\leq 200$  ms, then increased from 1 to 2 at 300–700 ms, and finally approached 3 at delays above. In both

exercises, latencies  $\leq 300$  ms were judged to be safe by all, 400–500 ms were accepted by 66–75% of subjects. Less than 20% of subjects accepted delays  $\geq 800$  ms.

**Conclusions:** The surgical performance deteriorates in an exponential way as the latency increases. The delay impact on instrument manipulation is mild at 0–200 ms, then increases from small to large at 300–700 ms, and finally becomes very large at 800–1000 ms. Latencies  $\leq 200$  ms are ideal for telesurgery; 300 ms is also suitable; 400–500 ms may be acceptable but are already tiring; 600–700 ms are difficult to deal with and only acceptable for low risk and simple procedures; Surgery is quite difficult at 800–1000 ms, telementoring would be a better choice in this case.

**Key Words:** Latency; Delay; Telesurgery; Telerobotic surgery; Robotic simulator; Robotics

## Introduction

Robotic telesurgery is a procedure where the surgeon controls the medical instruments via the tele-manipulator. The introduction of a large distance between the surgeon site and the patient site may have many applications (remote medicine for underserved regions, surgery in battlefield, surgery in space, etc.) [1]. Different experiences of telesurgery have been achieved: The first transatlantic human procedure was performed in September, 2001 [2]. Less than a year and a half later, the world's first telerobotic surgical service was established in Canada [3]. The US Army Telemedicine and Advanced Technology Research Center (TATRC) presented the first collaborative telesurgery on the da Vinci robot using the public Internet in a porcine model [4]. The Canadian Surgical Technologies and Advanced Robotics (CSTAR) group reported a series of telesurgical animal trials using both landline and satellite network in 2007–2008 [5-7]. In addition, non-commercialized telesurgical robot systems were built and tested in both dry lab and wet lab conditions around the world [8-13].

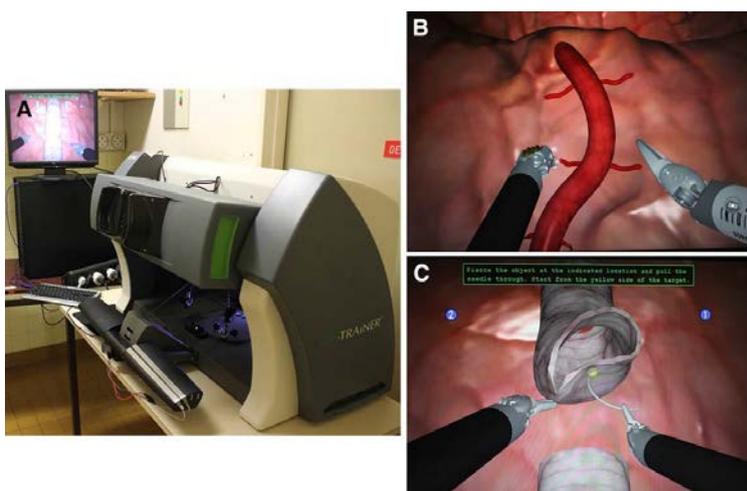
The primary limitation of telesurgery is the communication latency from the time that a movement is initiated by the surgeon until the image is visible on the surgeon's monitor [1,14]. Latency could be minimized using dedicated communication lines, which are, however, costly and not always feasible [2,3]. Time delay becomes considerable when procedures are conducted over long distances or low quality networks. Geosynchronous satellites provide a round trip latency of 540–700 ms, and a 900 ms delay was confronted in one TATRC da Vinci trial with public Internet [1,4,6].

It is important to clarify the effects of various latencies on surgical performance before telesurgery can be implemented in a clinical environment. Some efforts have been made, but several problems existed in the previous trials: The sample size or latency levels were too small to collect significant data [15-19]; Tasks were too simple with low demand on good surgical techniques [15,16]; Accurate objective variables were lacking, or subjective feelings were not precisely evaluated [15-19]; Training with or without delay was not sufficient to obtain reliable results [17-19]. Consequently, data are not sufficient to reveal the latency effects, especially the upper limit of latency in telesurgery.

Our objective is thus to determine the influence of various latencies on surgical performance and the acceptable latency levels in telesurgery.

## Materials and methods

The validated virtual reality simulator dV-Trainer<sup>®</sup> (Mimic Technologies, Seattle, USA) was used in this study [20,21]. Two exercises, “Energy Dissection 1” (ED1) and “Tubes 2”, were chosen for the test by experts as they demand the respective techniques of dissection and suturing, which are the most representative in robotic skills (Figure 1). Sixteen medical students aging from 19 to 25 volunteered for the experiment, none had a previous experience on the robot or the simulator. With a modification of the dV-Trainer program, the engineers of the MIMIC Technologies company allowed us to introduce a modifiable latency in the simulator between the gesture realized at the grips and the visual feedback on the console.



**Fig. 1** Robotic simulator Mimic dV-Trainer<sup>®</sup> (A) and the two test exercises: Energy Dissection 1 (B) and Tubes 2 (C)

Consent was obtained from all participants before entering the study. The study was divided into a non-latency training stage and a latency experimental stage. Through the first non-latency training phase, participants became expert with the simulator manipulation and

the test exercises. The aims were to reach the surgeon's technical proficiency in telesurgery and avoid the learning effect in the formal test. In the second phase, subjects first performed latency training, and then proceeded to the formal test. The latency training allowed the subjects to achieve enough experience of various latencies to properly assess their effects.

### **Non-latency training**

Each subject was given five separate 3.5 hours familiarization periods with the simulator. Sixteen exercises, including the two test exercises, were arranged in order of difficulty and assigned specific target scores. Subjects repeated each exercise and could pass to the next only when the target score was achieved twice consecutively.

### **Latency work**

The latency work was conducted first in ED1 and then in Tubes 2. Each exercise was tested the day after the latency training of that exercise.

#### *A. Latency training*

Subjects repeated the exercise at delays of 0–1000 ms, in increments of 200 ms, with duration of 15–20 minutes at each latency level. The primary requirement was to avoid errors.

#### *B. Latency test*

1) Warm-up: Tasks were performed with no latency inserted, firstly once in two exercises called “Peg Board 1” and “Match Board 1”, then twice in the test exercise. Using the test exercise for warm-up was based on our finding that 1–3 repetitions of an exercise were often necessary for the operators to reach their common levels.

2) Formal test: Subjects performed the exercise under the observation of a supervisor, latencies varying between 0 and 1000 ms with a 100 ms interval were randomly and blindly presented. The exercise was performed only once at each latency level. The main objective was to avoid errors, and if any bleeding happened in ED1, the task should be redone. Furthermore, in order to reduce the carry-over effect of delays, a simple exercise was performed with no delay, once in ED1 and twice in Tubes 2, between any two latency tasks. The performances were evaluated both objectively and subjectively:

- Objective metrics: dV-Trainer recorded the performance automatically using a built-in algorithm. The common metrics for the two exercises included time to complete

exercise (in seconds), economy of motion (total distance travelled by instruments, in centimeters), master workspace range (in centimeters), excessive instrument force (in seconds), instrument collisions, and instruments out of view (in centimeters). There were also specific measurements for each exercise: misapplied energy time (in seconds) for ED1 and missed targets for Tubes 2. An overall score was calculated by aggregation of these metrics. In addition, the average individual instrument speed was calculated as half the total economy of motion for both instruments divided by the task completion time (in centimeters per second).

- Subjective evaluations: After each latency task, subjects gave their judgment of the latency level and scored the difficulty, security, precision, and fluidity of manipulation on 4 cm vertical lines, and then gave their opinion on whether the latency could be safely accepted or not in surgery (Table 1).

**Table 1** Subjective evaluation metrics and the scoring method

Variables	Scoring
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difficulty: Instruments are easy to manipulate at this latency</li> <li>• Security: Operation is safe at this latency</li> <li>• Precision: Instrument positioning is accurate at this latency if attention is paid</li> <li>• Fluidity: Action is fluid at this latency</li> </ul>	

### Statistical analysis

A Shapiro-Wilk normality test was used to verify the normal distribution of data, the mean values at each latency were calculated in all but three variables: instrument collision was expressed as the median value, excessive instrument force and instruments out of view were presented as the number of subjects who made mistakes. A Wilcoxon signed rank test was applied to compare the objective variables between each of the 11 latency levels, the difference was considered statistically significant when the  $p$  value, adjusted using Bonferroni method, was less than 0.05. The exponential and the linear regression models were used to reveal the changing tendency of objective metrics with the increasing latencies. All the data were analyzed using the software R.

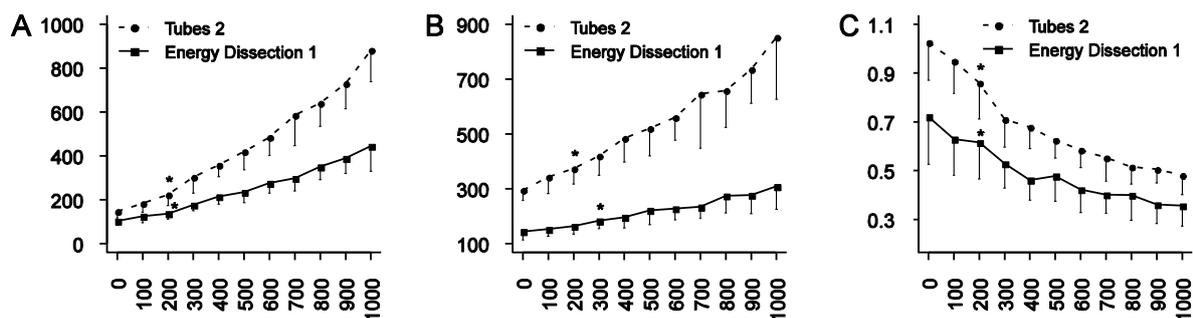
## Results

All 16 subjects completed the non-latency training but three of them did not participate in the latency Tubes 2 exercise. In the formal test, participants succeeded in completing all the tasks with no interruption. Subjects complained of fatigue in the Tubes 2 exercise.

### Objective metrics

Participants, 16 in ED1 and 13 in Tubes 2, achieved a mean score of 95.9% in ED1 and 97.3% in Tubes 2 at 0 ms latency. In both exercises, the task completion time and the instrument motion increased gradually as latency increased, meanwhile, the instrument speed decreased (Figure 2). For errors, an ascending trend was observed in misapplied energy time of ED1 as well as missed targets, instrument collisions, and instruments out of view of Tubes 2 (Figure 3). An exponential regression was fit to the mean times and motions of both exercises ( $R^2 > 0.98$ ), and also the mean missed targets of Tubes 2 ( $R^2 = 0.948$ ). In order to provide a more visual comparison, the individual times and motions at 0 ms were transformed to a base value of 1, values at various latencies were then converted accordingly based on their multiples with respect to this base. The mean increase factors (IF) of the two metrics were also fit to an exponential regression (Figure 4).

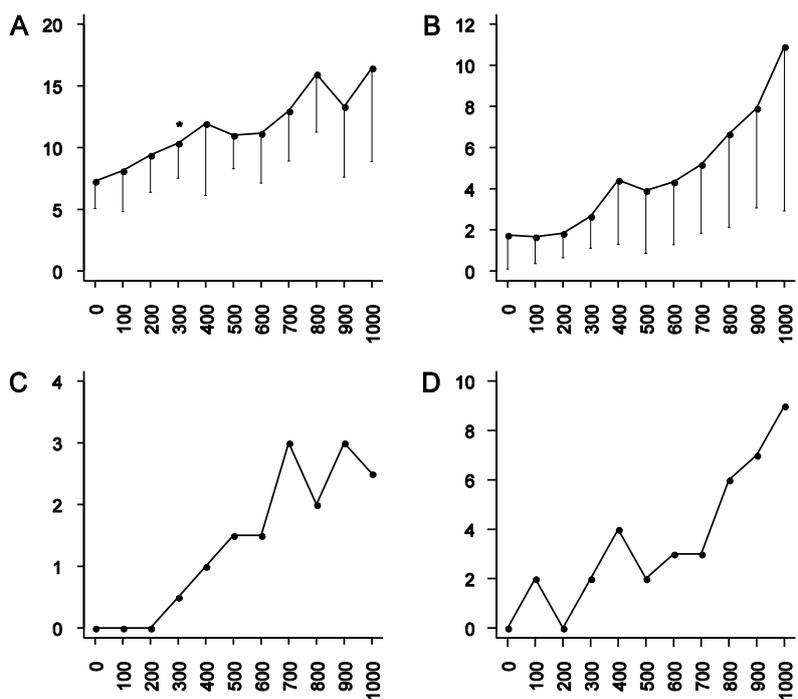
A linear regression was fit to the times and motions of all subjects with  $R^2 > 0.8$  in the former and  $R^2 > 0.5$  in the latter ( $p < 0.01$ ).



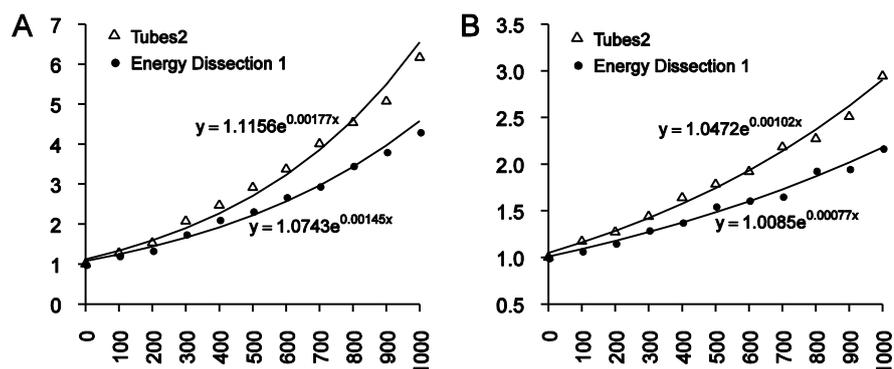
**Fig. 2** Task completion time (a), instrument motion (b), and instrument speed (c) at different latencies in the two test exercises

\* Differences compared to zero are statistically significant at this latency and above ( $p < 0.05$ )

**Fig. 3** Errors at different latencies in the two exercises: Energy Dissection 1–Misapplied energy time (a); Tubes 2–Missed targets (b), median value of instrument collisions (c), number of subjects with instruments out of view (d)  
 \* Differences compared to zero are statistically significant at this latency and above ( $p < 0.05$ )



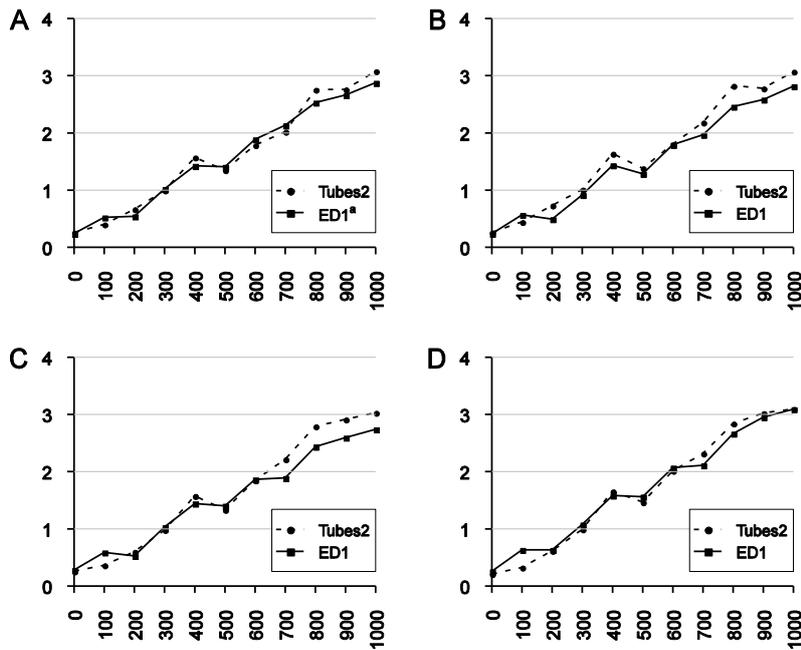
**Fig. 4** The exponential regression curves of the mean increase factors of time (a) and motion (b) at various latencies relative to 0 ms in the two exercises ( $p < 0.01$ ,  $R^2 > 0.98$ )



### Subjective evaluations

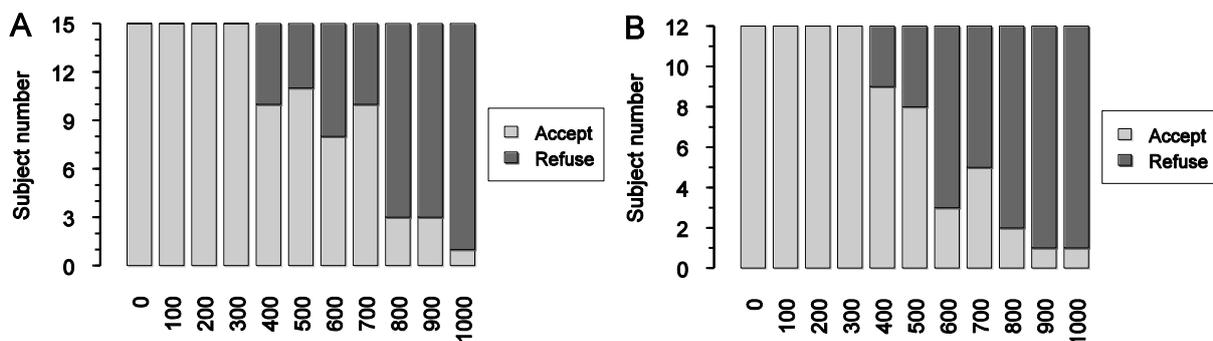
The scorings of one person in the two exercises were judged as outliers and not used for further analysis. Subjective data thus derived from 15 subjects in ED1 and 12 ones in Tubes 2.

Scorings were similar in the two exercises. The mean scores were less than 1 at 0–200 ms, then increased from 1 to 2 at 300–700 ms, and finally reached 3 at 800–1000 ms (Figure 5). In both exercises, delays  $\leq 300$  ms were judged to be safe by all, 400–500 ms were accepted by 66–75% of subjects. 600–700 ms were accepted by more than half of people in ED1 but refused in Tubes 2. Less than 20% of persons accepted delays  $\geq 800$  ms (Figure 6).



**Fig. 5** Mean scores of the four subjective evaluation metrics: Difficulty (a), Security (b), Precision (c) and Fluidity (d).

<sup>a</sup> Energy Dissection 1



**Fig. 6** Acceptability of different latencies to subjects in Energy Dissection 1 (a) and Tubes 2 (b)

## Discussion

The main objectives of our study were to determine the effects of various latencies on surgical performance and the acceptable latencies in telesurgery.

### Latency effects

Our results show that the surgical performance deteriorates in an exponential way as the delay increases. The task completion time, the instrument motion and the error rate increased exponentially with the increasing latencies. The change was relatively small at 0–200 ms. A similar curve of the task time was found in the report of R. Rayman et al [16]. The exponential change of performance could be explained by the stepwise increase of the latency impact on instrument manipulation. According to the subjective scorings, the impact is mild at

0–200 ms, then increases from small to large at 300–700 ms, and finally becomes very large at 800–1000 ms.

It is possible to predict the time or motion IF of a procedure at different latencies relative to 0 ms with the regression equations illustrated in Figure 4. We found that the time IF in previous dry-lab experiments were similar to that of ED1 (because of the task simplicity) [15-17]. Furthermore, in the animal trials of the CSTAR group, the mean duration of telesurgical pyeloplasty procedures ( $347 \pm 46$  ms) compared to that of real-time ones was 20.7 min versus 10.9 min, the IF of 1.9 also supports our hypothesis [7]. Of course, situation could be complex in practice, more evidences are needed to validate the applicability of the equations.

### **Latency acceptability**

In the two exercises, delays  $\leq 300$  ms were accepted by all, 400–500 ms were accepted by 66–75% of subjects. Less than 20% of persons accepted delays  $\geq 800$  ms. The results support the 330 ms “comfort zone” of latency declared by the “Lindbergh operation” group [2,22]. However, in the study of Perez and colleagues with the laparoscopic system, 350 ms was already estimated as impossible by 62% of surgeons [19]. It suggests that latency is more manageable with robot thanks to the 3D vision and the manipulation flexibility.

According to the latency impact classification stated above, the acceptance rate, as well as the time IF, we consider that delays  $\leq 200$  ms are ideal for telesurgery; 300 ms is also suitable; 400–500 ms are still acceptable but already tiring. It should be noted that the procedure duration at 400 ms is more than twice that of the same procedure at 0 ms latency (time IF of 2.1 and 2.5). Prolonged operative time may increase the surgeon’s stress and the patient’s risk. More importantly, a remedy for any errors will be difficult in the event of an accident. Therefore, if telesurgery has to be performed with such latencies, a backup surgical team at the patient side will be necessary. 600–700 ms are difficult to deal with, they are only acceptable for low risk and simple procedures. Surgery is quite difficult at delays of 800-1000 ms, a preferable choice in this case is the telerobotics with local surgeons operating under the guidance of remote experts (Table 2).

**Table 2** The acceptability of various latencies in telesurgery and the basis of deduction

Latency (ms)	Increase factor of time		Impact	Acceptance rate	Deduction
	ED1	Tubes 2			
0–200	1.0–1.4	1.0–1.5	Mild	100%	Ideal for telesurgery
300	1.8	2.1	Small	100%	Suitable
400–500	2.1–2.3	2.5–2.9	Moderate	66%–75%	Acceptable but tiring
600–700	2.7–3.0	3.4–4.0	Large	53%–67% in ED1 25%–42% in Tubes 2	Difficult, only acceptable for simple procedures
800–1000	3.5–4.3	4.5–6.2	Great	< 20%	Quite difficult, telementoring is better

### Latency effect influence factors

The latency effects on surgical performance are related to the procedure complexity and the individual ability.

#### *Procedure complexity*

Delay impact is greater in more complex procedures. The task completion time and the instrument motion increased more rapidly in Tubes 2 than in ED1 (Figure 4). It should be noted that time and motion increase inevitably as latency increases while errors are possible to remain stable in simple procedures.

#### *Individual ability*

The *SD* values of time and motion as well as errors increased with the increasing latencies, it means that the inter-individual differences enlarge gradually. It prompted us to fit the times and motions of all subjects with the linear regression (the exponential regression was not used for the analysis facility). The varying slopes of the regression lines confirmed that the individual delay adaptability was different. The possible factors related to this difference include the manipulation skills, the character (be patient or not), and the inherent ability to cope with latency.

### Limitations

The single repetition of each latency task is one of the shortcomings of our study. R. Rayman et al demonstrated in their report that the operator's task completion time spiked with each newly encountered latency and then decreased as accommodation occurred, which they called

the “short-term learning” [16]. This effect may influence the accuracy of our results. However, it was not observed or not obvious in the latency training stage of our experiments. The progressively increased delays during the training allowing the gradual adaptation is a possible reason. But we believe that the “short-term learning” effect could be reduced or avoided if operators have enough experience of various latencies, especially when the task duration is not too short. The experienced surgeons were not included in the trials, which is another shortcoming of the study. However, subjects became expert with the simulator after a total of 20 hours training without and with latency. In addition, unlike our settings, latencies confronted by remote surgeons in reality are always fluctuant and thus may be more challenging. The influence and the acceptable range of the delay fluctuation remain to be determined.

### **Future study**

Our study clarifies the latency effects and the acceptable delays in telesurgery, which were not achieved in previous reports. A reference of the time and motion IF is also provided. Three questions need to be further investigated in future study: First, could surgical performance at various latencies be improved by practice? In the training stage of our study, the performance did not improve significantly with repetitions of the exercises, especially at delays higher than 600 ms. It may be the result of the gradually increased latencies, the small repetition numbers, and the fatigue. A more targeted experiment is needed to answer this question. Second, what is the effect of latency training on robotic skills? Subjects declared in our study that the manipulation precision improved after latency trainings, and they gained more confidence of the instrument control, which, to their opinions, could not be achieved through a same duration non-latency training. It is interesting to learn which level of latency could produce this effect, how long it will last, and whether the introduction of delay in the robot training will improve real surgical outcomes. Finally, as stated above, the influence of the delay fluctuation deserves to be further studied.

### **Conclusions**

The surgical performance deteriorates in an exponential way as latency increases. The delay impact on instrument manipulation is mild at 0–200 ms, then increases from small to large at 300–700 ms, and finally becomes very large at 800–1000 ms. Latencies  $\leq 200$  ms are ideal for telesurgery; 300 ms is also suitable; 400–500 ms may be acceptable but are already tiring;

600–700 ms are difficult to deal with, they are only acceptable for low risk and simple procedures. Surgery is quite difficult at 800–1000 ms, telementoring would be a better choice in this case. The influence factors of the delay effects on surgical performance include the procedure complexity and the individual ability. Time and motion increase inevitably as latency increases but errors are possible to remain stable in simple procedures.

### **Acknowledgments**

The authors would like to thank l’Ecole de Chirurgie de Nancy and all the participants in this study. We would also like acknowledge Roger D. Smith for his assistance in the English modification and Anou Sewonu for his help in the statistics. The first author is supported by the fellowship provided by the China Scholarship Council for the studies at Lorraine University.

### **Disclosures**

Dr. Song XU, Dr. Perez, Dr. Yang, Dr. Perrenot, Dr. Felblinger, and Dr. Hubert have no conflicts of interest or financial ties to disclose.

### **Reference**

- [1] Haidegger T, Sándor J, Benyó Z (2010) Surgery in space: the future of robotic telesurgery. *Surg Endosc* 25:681–690. doi: 10.1007/s00464-010-1243-3
- [2] Marescaux J, Leroy J, Gagner M, Rubino F, Mutter D, Vix M, Butner SE, Smith MK (2001) Transatlantic robot-assisted telesurgery. *Nature* 413:379–380. doi: 10.1038/35096636
- [3] Anvari M, McKinley C, Stein H (2005) Establishment of the World’s First Telerobotic Remote Surgical Service. *Ann Surg* 241:460–464. doi: 10.1097/01.sla.0000154456.69815.ee
- [4] Sterbis JR, Hanly EJ, Herman BC, Marohn MR, Broderick TJ, Shih SP, Harnett B, Doarn C, Schenkman NS (2008) Transcontinental telesurgical nephrectomy using the da Vinci robot in a porcine model. *Urology* 71:971–973.
- [5] Rayman R, Croome K, Galbraith N, McClure R, Morady R, Peterson S, Smith S, Subotic V, Van Wynsberghe A, Patel R, Primak S (2007) Robotic telesurgery: a real-

- world comparison of ground- and satellite-based internet performance. *Int J Med Robot* 3:111–116. doi: 10.1002/rcs.133
- [6] Nguan CY, Morady R, Wang C, Harrison D, Browning D, Rayman R, Luke PPW (2008) Robotic pyeloplasty using internet protocol and satellite network-based telesurgery. *Int J Med Robot* 4:10–14. doi: 10.1002/rcs.173
- [7] Nguan C, Miller B, Patel R, Luke PP, Schlachta CM (2008) Pre-clinical remote telesurgery trial of a da Vinci telesurgery prototype. *Int J Med Robot* 4:304–309. doi: 10.1002/rcs.210
- [8] Lum MJH, Friedman DCW, Sankaranarayanan G, King H, Fodero K, Leuschke R, Hannaford B, Rosen J, Sinanan MN (2009) The RAVEN: Design and Validation of a Telesurgery System. *Int J Robot Res* 28:1183–1197. doi: 10.1177/0278364909101795
- [9] Arata J, Takahashi H, Pitakwatchara P, Warisawa S, Konishi K, Tanoue K, Ieiri S, Shimizu S, Nakashima N, Okamura K, Kim YS, Kim SM, Hahm J-S, Hashizume M, Mitsuishi M (2006) A remote surgery experiment between Japan-Korea using the minimally invasive surgical system. *Proc. 2006 IEEE Int. Conf. Robot. Autom. 2006 ICRA 2006*. pp 257–262
- [10] Arata J, Takahashi H, Pitakwatchara P, Warisawa S, Tanoue K, Konishi K, Ieiri S, Shimizu S, Nakashima N, Okamura K, Fujino Y, Ueda Y, Chotiwan P, Mitsuishi M, Hashizume M (2007) A remote surgery experiment between Japan and Thailand over Internet using a low latency CODEC system. *2007 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.* pp 953–959
- [11] Choi J, Park JW, Kim DJ, Shin J, Park CY, Lee JC, Jo YH (2012) Lapabot: A compact telesurgical robot system for minimally invasive surgery: Part I. System description. *Minim Invasive Ther Allied Technol* 21:188–194. doi: 10.3109/13645706.2011.579979
- [12] Park JW, Lee DH, Kim YW, Lee BH, Jo YH (2012) Lapabot: A compact telesurgical robot system for minimally invasive surgery: Part II. Telesurgery evaluation. *Minim Invasive Ther Allied Technol* 21:195–200. doi: 10.3109/13645706.2011.579978
- [13] Kim K-Y, Song H-S, Suh J-W, Lee J-J (2013) A Novel Surgical Manipulator with Workspace-Conversion Ability for Telesurgery. *IEEEASME Trans Mechatronics* 18:200–211. doi: 10.1109/TMECH.2011.2164929
- [14] Marescaux J, Leroy J, Rubino F, Smith M, Vix M, Simone M, Mutter D (2002) Transcontinental Robot-Assisted Remote Telesurgery: Feasibility and Potential Applications. *Ann Surg* 235:487–492.

- [15] Lum MJH, Rosen J, Lendvay TS, Sinanan MN, Hannaford B (2009) Effect of time delay on telesurgical performance. *Robot. Autom.* 2009 ICRA09 IEEE Int. Conf. pp 4246–4252
- [16] Rayman R, Croome K, Galbraith N, McClure R, Morady R, Peterson S, Smith S, Subotic V, Van Wynsberghe A, Primak S (2006) Long-distance robotic telesurgery: a feasibility study for care in remote environments. *Int J Med Robot* 2:216–224. doi: 10.1002/rcs.99
- [17] Anvari M, Broderick T, Stein H, Chapman T, Ghodoussi M, Birch DW, McKinley C, Trudeau P, Dutta S, Goldsmith CH (2005) The impact of latency on surgical precision and task completion during robotic-assisted remote telepresence surgery. *Comput Aided Surg Off J Int Soc Comput Aided Surg* 10:93–99. doi: 10.3109/10929080500228654
- [18] Kim T, Zimmerman PM, Wade MJ, Weiss CA (2005) The effect of delayed visual feedback on telerobotic surgery. *Surg Endosc* 19:683–686.
- [19] Perez M, Quiaios F, Andrivon P, Husson D, Dufaut M, Felblinger J, Hubert J (2007) Paradigms and experimental set-up for the determination of the acceptable delay in Telesurgery. 29th Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. 2007 EMBS 2007. pp 453–456
- [20] Perrenot C, Perez M, Tran N, Jehl JP, Felblinger J, Bresler L, Hubert J (2012) The virtual reality simulator dV-Trainer® is a valid assessment tool for robotic surgical skills. *Surg Endosc* 1–7.
- [21] Lee JY, Mucksavage P, Kerbl DC, Huynh VB, Etafy M, McDougall EM (2012) Validation Study of a Virtual Reality Robotic Simulator—Role as an Assessment Tool? *J Urol* 187:998–1002. doi: 10.1016/j.juro.2011.10.160
- [22] Butner SE, Ghodoussi M (2003) Transforming a surgical robot for human telesurgery. *Robot Autom IEEE Trans* 19:818–824.

### I.1.3 - Résultats principaux et conclusions

Dans les deux exercices, le TRT et l'EM ont augmenté, et dans le même temps la vitesse de l'instrument a diminué progressivement lorsque le délai augmentait. Pourtant le changement avec le délai était plus rapide en Tubes 2 qu'en Energy Dissection 1. Une tendance de croissance a aussi été observée dans les mesures d'erreur. Une régression exponentielle a été adaptée aux TRT et EM moyens des deux exercices ( $R^2 > 0.98$ ) et ainsi à la mesure de cibles manquées de Tubes 2 ( $R^2 = 0.948$ ).

Les notations sur les quatre mesures subjectives (difficulté, sécurité, précision et fluidité) ont été similaires dans les deux exercices. Les scores moyens ont été inférieurs à 1 aux délais de 0 à 200 ms, puis ont augmenté de 1 vers 2 à 300-700 ms, et enfin ont approché 3 à 800-1000 ms. Les délais  $\leq 300$  ms ont été jugés sûrs par tous et 400-500 ms ont été acceptés par 66-75% des sujets. Les délais de 600-700 ms ont été acceptés par plus de la moitié des personnes pour ED1 mais ont été refusés pour Tubes 2. Moins de 20% des gens ont accepté les délais  $\geq 800$  ms.

Les résultats ont prouvé que la performance chirurgicale se détériore d'une façon exponentielle lorsque le délai augmente. L'impact du délai sur la manipulation des instruments est léger avec des délais de 0-200 ms, ensuite augmente de léger à important avec 300-700 ms, et finalement devient très important avec 800-1000 ms. Des délais  $\leq 200$  ms sont idéaux pour la téléchirurgie et 300 ms restent adaptés ; 400-500 ms peuvent être acceptables mais génèrent de la fatigue ; 600-700 ms sont difficiles à maîtriser et uniquement acceptables pour des procédures simples et de risque faible. La chirurgie devient très difficile avec des délais de 800-1000 ms, et devrait dans ce cas se limiter au télémentoring (un chirurgien expert à distance dirige un chirurgien du site patient à opérer). Les facteurs influençant l'impact du délai comprennent la complexité des procédures et les capacités individuelles. La durée de la tâche et le mouvement des instruments augmentent quasi inéluctablement lorsque le délai augmente, mais le taux d'erreur n'augmente pas certainement avec le délai surtout dans les tâches simples.

## I.2 - Effet de l'entraînement au délai

### I.2.1 - Organisation de l'étude

L'étude précédente a prouvé que des procédures simples téléchirurgicales restent possibles avec un délai allant jusqu'à 700 ms. Cependant, l'efficacité et la sécurité de performance se détériorent progressivement lorsque le délai augmente. Il a été observé dans certaines études que les chirurgiens ont le potentiel de s'adapter au délai. L'entraînement au délai pourrait améliorer les performances en téléchirurgie et finalement apporter des bénéfices aux patients. Cependant, peu d'efforts ont été dévolus à la recherche sur cette formation au délai. Une seule étude sur ce sujet a été effectuée par Rayman *et al*, dans laquelle ils ont comparé les effets de la formation avec des délais séquentiellement croissants (0, 350, 700 ms) contre un délai constant (700 ms). Ils ont démontré que les deux méthodes étaient également efficaces [150].

L'objectif de notre étude était d'évaluer l'effet de la formation téléchirurgicale aux différents délais sur la performance chirurgicale et la durée de cet effet. Un autre intérêt est d'étudier si la formation au délai dans un exercice simple aide à améliorer les résultats dans un exercice plus complexe. Il a été supposé que la capacité d'opérer sous délai apportait la capacité de prédire et contrôler les mouvements des instruments. Cette capacité peut être apprise lors d'une tâche simple puis être appliquée aux procédures plus complexes.

Les tests ont été réalisés sur le dV-Trainer<sup>®</sup>. Onze étudiants en médecine ont été recrutés et assignés aléatoirement dans deux groupes : groupe de délai de 400 ms (G400, n=5) et groupe de 600 ms (G600, n=6). Après une formation de base, chaque groupe s'entraînait, pendant une période de 90 min, sur un exercice simple (Peg Board 1) avec un délai de 400 ou 600 ms selon le groupe. Un autre exercice de suture plus difficile (Suture Sponge 1) a été effectué avant (prétest) et après (posttest) l'entraînement. Après chaque exercice, le simulateur enregistrait automatiquement les performances, et le sujet évaluait subjectivement la difficulté de l'exercice sur une échelle visuelle. Le suivi de l'effet de l'entraînement a été effectué une semaine après le posttest.

## I.2.2 - Publication

Article publié dans la revue « *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery* »

---

### Effect of latency training on surgical performance in simulated robotic telesurgery procedures

---

Song Xu<sup>1,2</sup>, Manuela Perez<sup>1,2,3</sup>, Kun Yang<sup>1,2</sup>, Cyril Perrenot<sup>1,2,3</sup>, Jacques Felblinger<sup>1,2</sup>, Jacques Hubert<sup>1,2,4</sup>

1. Lorraine University, IADI, Nancy, F-54000, France.
2. Inserm, U947, Nancy, F-54000, France.
3. Department of Emergency and General Surgery, CHU Nancy, Nancy, F-54000, France.
4. Department of Urology, CHU Nancy, Nancy, F-54000, France.

#### Abstract

**Background:** The effect of telesurgical training was evaluated at two latency levels.

**Methods:** Eleven subjects were randomly assigned to two delay groups (400 ms, 600 ms). Each group trained with latency on a simple task of dV-Trainer<sup>®</sup>, and performed a difficult task before (Pre-test) and after (Post-test) the training. The follow-up was conducted one week after the training.

**Results:** The difficulty decreased gradually during training for both groups, while the task completion time and the instrument motion improved only in the 600 ms group. Both groups made progress from Pre- to Post- test, but statistical significance was not achieved. Subjects maintained in the follow-up their highest level achieved during training.

**Conclusions:** Latency training is effective and this effect lasts at least one week. Latency training on a simple task may improve results in complex procedures. However, attention should be paid to avoid the carelessness due to confidence from training.

**Key Words:** Latency training; Surgical training; Telesurgery; Robotic simulator; Robotics

## **Introduction**

In robotic telesurgery, surgeons control the medical instruments via telemanipulator. The ability to introduce a large distance between the surgeon site and the patient site allows for many applications (e.g. surgical service for remote or rural areas, surgery in battlefield, surgery in space) (1). The first transatlantic procedure on a human patient was performed in September, 2001 (2). Less than two years later, the world's first telerobotic surgical service was established in Canada (3).

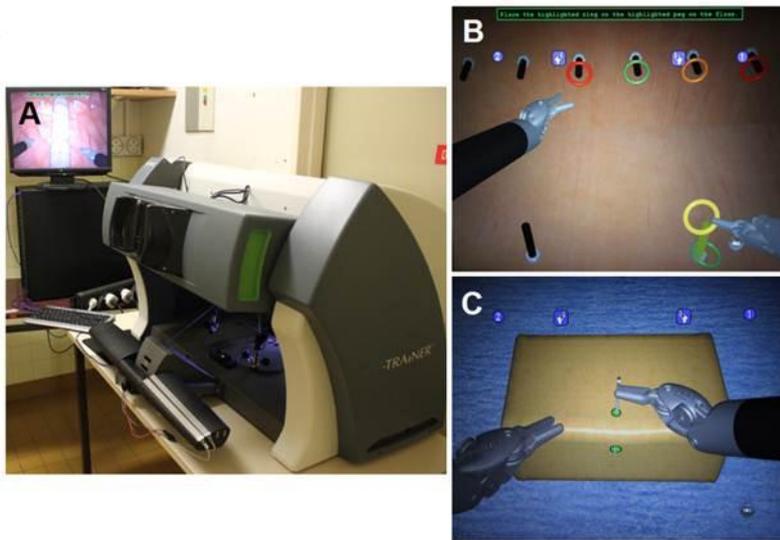
Telesurgery poses the problem of communication latency, mainly due to the data transmission over network and the video encoding/decoding (1). Remote surgeons may be confronted with considerable time delay (500-900 ms) in the absence of dedicated fiber-optic lines (4-7). We demonstrated in a previous study that simple telesurgical procedures remain possible with a delay up to 700 ms (8). However, the surgical performance deteriorates gradually as latency increases (8-10). Training with latency may improve surgeons' performances in telesurgery, but little had been known about the latency training until now. The single study on this topic, to our knowledge, was conducted by the CSTAR (Canadian Surgical Technologies and Advanced Robotics) group. They compared the proficiency of the training with sequentially increasing latency (0, 350, 700 ms) versus constant latency (700 ms) and found that the two training methods were equally effective (11).

The present study aims to evaluate the effect of telesurgical training at different latency levels on surgical performance and the duration of this effect. We are also interested in whether latency training on a simple task helps to improve results in more difficult procedures. We hypothesize that the skill to operate under delay is the ability to predict and control the instrument movements; it could be learned in a simple task and then applied to complex procedures.

## **Materials and methods**

Experiments were performed on the validated robotic simulator dV-Trainer<sup>®</sup> (Mimic Technologies, Seattle, WA) (12). The exercises "Peg Board 1" (PB1) and "Suture Sponge 1" (SS1) were chosen by experts for latency training and testing respectively (Figure 1). By modifying the dV-Trainer<sup>®</sup> program, the engineers of Mimic Technologies allowed us to introduce a fixed latency into the task, which is the time that elapses between the initiation of a movement at the grips and the feedback of image on the console.

Eleven medical students (20-23 years old) volunteered for the experiments. They were previously exposed to the simulator over a mean duration of 7 (2-20) hours, but none had experience with delay. After informed consent was obtained, subjects were randomly split into two groups: the 400 ms delay group (G400, n = 5) and the 600 ms delay group (G600, n = 6). In the previous study, we demonstrated that 400-500 ms and 600-700 ms have a moderate and large impact on instrument manipulation respectively; training at these two latency levels would be representative (8).



**Fig. 1** Robotic simulator dV-Trainer® (A) and the two exercises: Peg Board 1 for training (B) and Suture Sponge 1 for testing (C)

## Experimental procedures

The experimental procedures are detailed as follows and illustrated in Figure 2:

### *Protocol day 1: Basic training & Pre-test*

- A. Basic training: subjects repeated PB1 and then SS1 with no delay until the overall score of the respective exercise stabilized at  $> 98\%$  and  $> 95\%$ . Between the training of PB1 and SS1, they performed a simple exercise called “Pick & Place” once at 400/600 ms according to their assigned group. The objective was to gain a preliminary impression of latency.
- B. Pre-test: subjects performed half of the exercise SS1 at 400/600 ms, stopping once the 6<sup>th</sup> (12 in total) suture point was completed. Completing half of the exercise aimed to prevent long procedure time and delay adaptation. The stated objective was to avoid errors (i.e. instrument collisions, missed targets, needle drops, excessive instrument force, and instruments out of view). The simulator automatically recorded the task completion time,

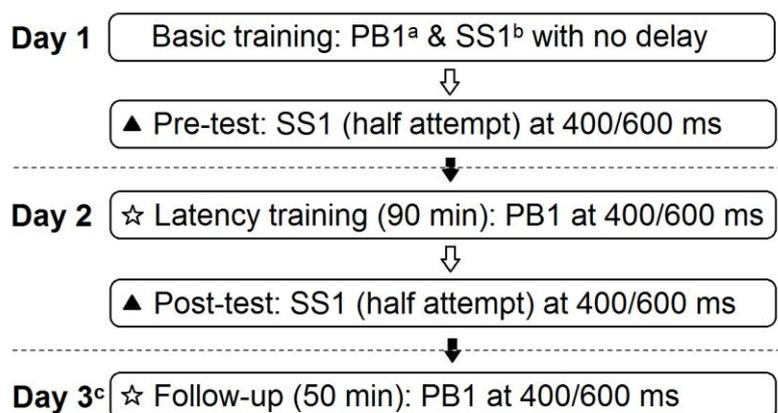
the instrument motion, and the errors; subjects evaluated the difficulty, the security, the precision, and the fluidity of manipulation on 8 cm vertical scales.

*Protocol day 2: Latency training & Post-test*

- C. Latency training: after a 15 minutes warm-up on SS1 and PB1 with no delay, subjects repeated PB1 at 400/600 ms during a 90 minutes period. We encouraged them to make progress and achieve the highest possible scores. After each attempt, they evaluated the manipulation difficulty during a rest time of 1.5-2 minutes.
- D. Subjects completed 6 attempts of PB1 and 3 attempts of SS1 with no delay in order to eliminate the short-term effects of latency training and prepare for Post-test.
- E. Post-test: the method was the same as Pre-test (step B).

*Protocol day 3: Follow-up*

- F. The follow-up was conducted one week after day 2. The method was the same as latency training (step C) but with a shorter duration of 50 minutes.



**Fig. 2** Major steps of experimental procedures: <sup>a</sup>Peg Board 1; <sup>b</sup>Suture Sponge 1; <sup>c</sup>day 3 was one week after day 2

**Statistical analysis**

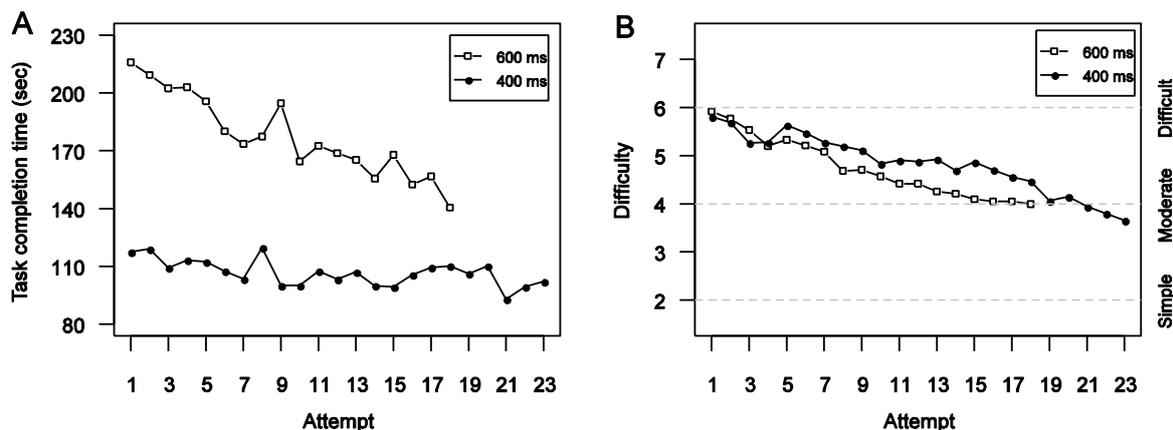
Data were analyzed using R version 3.0.1. The differences in performance between the two groups and the two stages (latency training & follow-up) were determined using the repeated measures ANOVA. The objective metrics in Pre- versus Post-test were compared using a Wilcoxon signed-rank test. Statistical significance was determined at  $p < 0.05$ .

## Results

All subjects succeeded to accomplish day 1 and day 2 tasks with no interruption. One subject of the G600 did not complete the follow-up due to a program problem of the simulator. The data of this person were thus not used when comparing the results of latency training versus the follow-up.

### Latency training

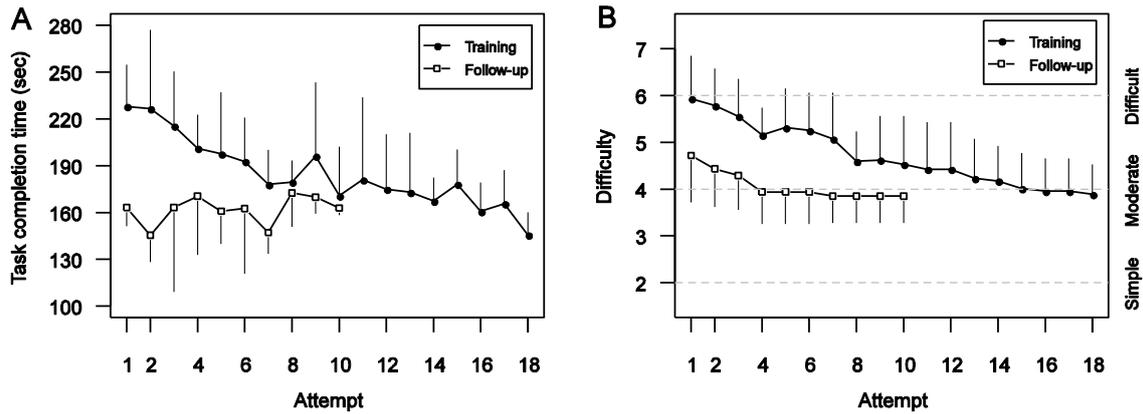
Subjects completed, during the 90 minutes period, 23-24 attempts of PB1 in the G400 and 18-19 attempts in the G600. The G400 outperformed the G600 in the overall score, the task completion time, and the instrument motion (ANOVA,  $p < 0.05$ ). The manipulation difficulty decreased gradually with practice in both groups, while the score, the time, and the motion improved only in the G600 (Figure 3). As for the errors, the mean drops almost stabilized at 0 throughout the training; the mean instrument collisions maintained at 0 in the G400 and less than 2 in the G600.



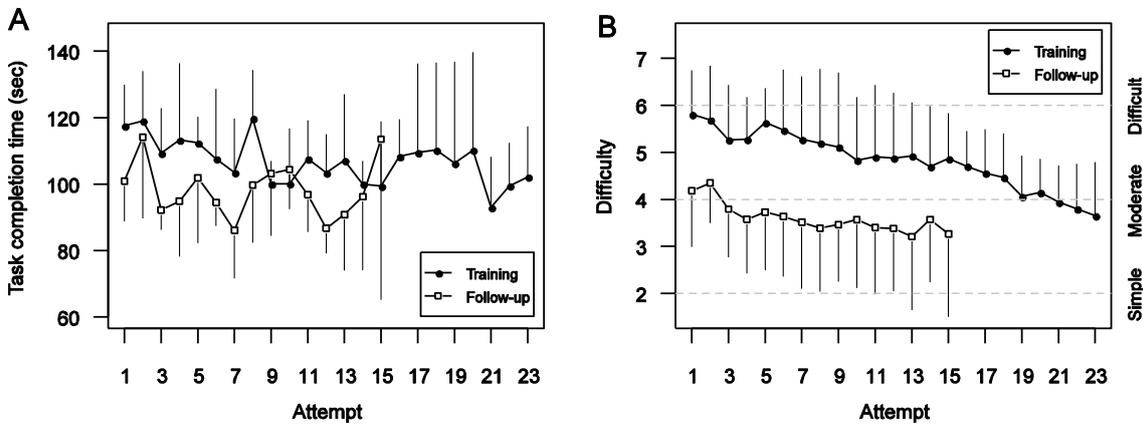
**Fig. 3** Comparison of the mean task completion time (A) and manipulation difficulty (B) between the two groups in latency training

### Follow-up

Subjects completed 15-16 attempts of PB1 during 50 minutes in the G400 and 10-11 attempts in the G600. The superiority of performance in the follow-up compared to latency training was determined in the G600: the score, the time, and the motion in the follow-up continuously outperformed their corresponding values in latency training at each attempt (ANOVA,  $p < 0.05$ ), so did the manipulation difficulty (Figure 4). In the G400, a similar trend was found in the difficulty, whereas it was not clearly reflected in the objective metrics (Figure 5).



**Fig. 4** Comparison of task completion time (A) and manipulation difficulty (B) in follow-up versus latency training of the 600 ms delay group



**Fig. 5** Comparison of task completion time (A) and manipulation difficulty (B) in follow-up versus latency training of the 400 ms delay group

### Pre- versus Post-test

The mean time, motion and errors demonstrated some improvements from Pre- to Post-test in both groups but statistical significance was not achieved ( $p > 0.05$ ) (Table 1). The subjective measures improved in Post-test, but the improvement was mild in the G600 and relatively larger in the G400 (Figure 6).

**Table 1** Comparison of the objective metrics between Pre- and Post-test of the two delay groups

	400 ms group			600 ms group		
	Pre-test	Post-test	<i>p</i> -value	Pre-test	Post-test	<i>p</i> -value
Time (sec)	242.0	211.6	0.4375	356.5	326.6	0.8125
Motion (cm)	198.8	179.7	0.1875	254.5	233.0	0.8125
Missed Targets	5.8	4.8	0.7865	7.0	6.0	1
Collisions	1.2	0.2	0.0890	2.6	1.2	0.2785
Excessive force (sec)	0	0	–	0	0	–
Out of view (cm)	0	0	–	0.2	0	–

The values in both Pre and Post-test columns represent the mean values of metrics

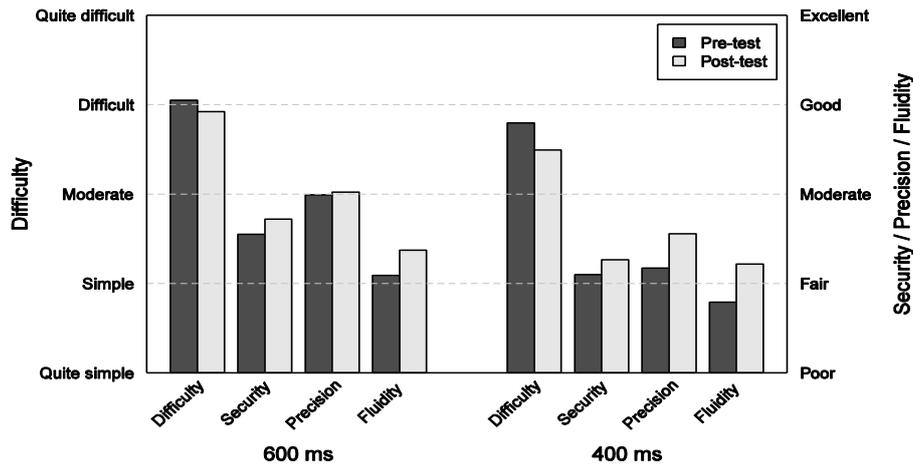


Fig. 6 Comparison of the mean values of subjective metrics in Pre- versus Post-test of the two groups

## Discussion

We aimed to evaluate the effect of latency training on surgical performance and the duration of this effect. Whether latency training on a simple task helps to improve results in more difficult procedures was also explored.

### Latency training effect

Our results proved that latency training is effective, and the greater the delay, the more significant the training effect. The learning effect was clear in the G600 as the manipulation difficulty decreased and the objective metrics improved gradually with repetitions of the task. The situation is more complicated with the G400: they declared a similar decrease of difficulty, but the objective measures did not improve clearly. A possible reason for this inconsistency is that subjects adapted quickly to 400 ms in the simple exercise of PB1 and actually had little room to improve their performances, but their confidence of the instrument control strengthened gradually. Confidence is helpful, but it should not become a source of carelessness. This is important in telesurgery because the operation with delay is a stressful process which demands specific concentration, and any distraction may cause grave consequences in real settings. It is the role of future latency-training programs to help surgeons to fully understand the challenges of delay.

Supports of the latency-training effectiveness could be found in the dry-lab study of the CSTAR group, in which they observed some learning effects in the 700 ms constant latency group (11). In their porcine telesurgical trials, the learning effect also seemed to occur with repetition of the surgical procedure (4,9).

### **Training effect duration**

The latency-training effect is durative and lasts at least one week. The manipulation difficulty in the follow-up of the G600 stabilized, after the first three attempts, at the lowest value achieved in latency training. Correspondingly, the objective metrics in the follow-up continuously outperformed that in latency training. In the G400, a similar tendency was found in the difficulty, but less clearly in the objective measures. It is not surprising considering that the G400 did not make significant progress during latency training. It further suggests that the training is more significant with a greater delay.

### **Training effect extension**

We hypothesized that the operation skill under delay could be learned in a simple task and then applied to more complex procedures. Disappointingly, the results did not meet the expectation. The objective metrics did demonstrate some improvements from Pre- to Post-test, but statistical significance was not achieved. Meanwhile, subjects (especially the G600) were conservative when indicating the improvement of the subjective measures. This likely happened because PB1 is too simple as a training task in which the EndoWrist<sup>®</sup> technique cannot be fully practiced. Some subjects' non-proficiency with the simulator could be another influencing factor. We can only conclude that latency training on a simple task may improve, or at least will not harm results in complex procedures.

As stated above, latency training should introduce practical benefits but not become a source of carelessness – a false confidence can be disastrous in telesurgery. Although not significantly, subjects in this study achieved improved efficiency and a lower error rate in Post-test. In addition, they tended to be more careful in Post-test as the training made them fully aware of the challenges of delay.

### **Role of latency training**

The major limitations of telesurgery over large distances are the access to reliable telecommunication lines and the issue of latency, which is generated mainly in the process of data transmitting and video encoding/decoding (13). Latency is problematical because an asynchronous visual feedback may impair the security and the efficiency of surgery. In order to minimize the delay and provide a high-quality visual feedback, a minimum 10 Mbps-bandwidth connection with quality of service (QoS) would be necessary (14). Dedicated fiber-optic lines could meet the very demands of telesurgery and permit a delay less than 400 ms

anywhere worldwide (1). The problem, however, is the availability. We cannot always expect the availability of dedicated lines in underserved regions or extreme environments, especially considering the significant operating costs. In this case, telesurgeons have to prepare themselves for the possibility of high delays. In addition, unlike our settings in the study, latency in practice is always fluctuant depending on the network condition (jitter), which poses additional challenges to surgeons. Latency training could help surgeons to adapt to different time delays and overcome the impact of jitter, which would become important with the further adoption of telesurgery in the near future.

### **Limitations**

The major shortcomings of the study include the small subject number and some participants' non-proficiency with the simulator. In addition, the one-week follow-up time was short. It would be interesting to know how long the training effect could last.

### **Future study**

Training on fixed latencies is proved to be effective in the present study. The delay jitter needs to be involved in future studies, and additional work would be needed to explore the optimal latency training protocol. The elements to be determined include the proper training tasks, the training methods, and the evaluation criterion of telesurgical performance. Moreover, whether latency training on simple tasks could improve the performance in complex procedures and finally introduce benefits to the telesurgical results needs to be investigated in more structured studies. In addition, we are always interested in the possible benefits of latency training on basic surgical skills.

### **Conclusions**

Latency training is effective, and the greater the delay, the more significant the training effect. The effect is durative and lasts at least one week. Latency training on a simple task may improve, or at least will not harm results in more complex procedures. However, attention should be paid to avoid the carelessness due to confidence from training.

## **Acknowledgments**

The authors would like to thank all the participants in this study. The first author is supported by the fellowship provided by the China Scholarship Council for the studies at Lorraine University.

## **Disclosures**

Dr. Xu, Dr. Perez, Dr. Yang, Dr. Perrenot, Dr. Felblinger, and Dr. Hubert have no conflicts of interest or financial ties to disclose.

## **Reference**

1. Haidegger T, Sándor J, Benyó Z. Surgery in space: the future of robotic telesurgery. *Surg Endosc.* 2010 Jul 22;25(3):681-90.
2. Marescaux J, Leroy J, Gagner M, Rubino F, Mutter D, Vix M, Butner SE, Smith MK. Transatlantic robot-assisted telesurgery. *Nature.* 2001 Sept 27;413(6854):379-80.
3. Anvari M, McKinley C, Stein H. Establishment of the World's First Telerobotic Remote Surgical Service. *Ann Surg.* 2005 Mar;241(3):460-4.
4. Rayman R, Croome K, Galbraith N, McClure R, Morady R, Peterson S, Smith S, Subotic V, Van Wynsberghe A, Patel R, Primak S. Robotic telesurgery: a real-world comparison of ground- and satellite-based internet performance. *Int J Med Robot.* 2007;3(2):111-6.
5. Nguan CY, Morady R, Wang C, Harrison D, Browning D, Rayman R, Luke PP. Robotic pyeloplasty using internet protocol and satellite network-based telesurgery. *Int J Med Robot.* 2008;4(1):10-4.
6. Arata J, Takahashi H, Pitakwatchara P, Warisawa S, Tanoue K, Konishi K, et al. A remote surgery experiment between Japan and Thailand over Internet using a low latency CODEC system. 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation; 2007. p. 953 -9.
7. Sterbis JR, Hanly EJ, Herman BC, Marohn MR, Broderick TJ, Shih SP, Harnett B, Doarn C, Schenkman NS. Transcontinental telesurgical nephrectomy using the da Vinci robot in a porcine model. *Urology.* 2008;71(5):971-3.

8. Xu S, Perez M, Yang K, Perrenot C, Felblinger J, Hubert J. Determination of the latency effects on surgical performance and the acceptable latency levels in telesurgery using the dV-Trainer® simulator. *Surg Endosc.*2014;28(9): 2567-2576.
9. Lum MJH, Rosen J, Lendvay TS, Sinanan MN, Hannaford B. Effect of time delay on telesurgical performance. 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation [Internet]. 2009 [cited 16 Jan 2013]. p. 4246-52. Available from: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5152725](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5152725)
10. Rayman R, Croome K, Galbraith N, McClure R, Morady R, Peterson S, Smith S, Subotic V, Van Wynsberghe A, Primak S. Long-distance robotic telesurgery: a feasibility study for care in remote environments. *Int J Med Robot.* 2006;2(3):216-24.
11. Rayman R, Primak S, Eagleson R. Effects of network delay on training for telesurgery. 1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace Electronic Systems Technology; 2009; 2009. p. 63 -7.
12. Perrenot C, Perez M, Tran N, Jehl JP, Felblinger J, Bresler L, Hubert J. The virtual reality simulator dV-Trainer® is a valid assessment tool for robotic surgical skills. *Surg Endosc.* 2012;1-7.
13. Park JW, Lee DH, Kim YW, Lee BH, Jo YH. Lapabot: A compact telesurgical robot system for minimally invasive surgery: Part II. Telesurgery evaluation. *Minim Invasive Ther Allied Technol.* 2012 May;21(3):195-200.
14. T. Haidegger, L. Kovács, R.-E. Precup, B. Benyó, Z. Benyó, S. Preitl, Simulation and control for telerobots in space medicine. *Acta Astronaut.* 2012 Dec;81(1):390-402.

### **I.2.3 - Résultats principaux et conclusions**

Dans le stage d'entraînement, le G400 a obtenu une meilleure performance que le G600 dans l'exercice « Peg Board 1 » concernant les mesures de score global, TRT et EM (ANOVA,  $p < 0.05$ ). Les deux groupes ont déclaré une diminution progressive de la difficulté pour effectuer l'exercice répété. Cependant, le score global, le TRT et l'EM se sont seulement améliorés dans le G600 au fil de la répétition.

Dans le stage de suivi, la rétention de l'effet d'entraînement a été observée dans le G600 : la meilleure performance obtenue à la fin de l'entraînement a été reproduite tant avec les mesures objectives de score global, TRT et EM que avec la mesure subjective de difficulté. Pour le G400, une tendance similaire a été observée avec la mesure de difficulté, mais pas avec les mesures objectives.

Une certaine amélioration de TRT, de l'EM et des erreurs a été démontrée entre pré- et Post- test dans les deux groupes mais sans être statistiquement significative ( $p > 0.05$ ). Les mesures subjectives se sont légèrement améliorées dans le posttest pour le groupe G600 ; l'amélioration était plus évidente dans le groupe G400.

Les résultats ont prouvé l'efficacité de l'entraînement au délai, le bénéfice étant meilleur lorsque le délai est élevé. Cet effet est acquis pendant au moins une semaine. L'entraînement au délai dans une tâche simple peut améliorer, ou au moins ne porte pas préjudice aux procédures plus complexes. Cependant, les opérateurs devront éviter le risque d'inattention dû à la confiance acquise lors de la formation.

## Sujet II - Formation en chirurgie robotique

### II.1 - Curriculum de chirurgie robotique en RV

#### II.1.1 - Organisation de l'étude

L'obstruction de la jonction pyélo-urétérale (OJPU) est l'anomalie congénitale la plus courante de l'uretère. Le traitement de référence traditionnel de l'OJPU est la pyéloplastie par voie ouverte, mais les avantages de la CMI ont conduit au développement de la pyéloplastie laparoscopique dans les premières années de 1990. Bien qu'avantageuse, cette technologie ne s'est pas étendue en raison d'une courbe d'apprentissage longue qui est associée à la procédure laparoscopique. L'introduction du robot da Vinci<sup>®</sup> a renforcé la capacité des chirurgiens en CMI. La première expérience de pyéloplastie laparoscopique robot-assistée (PLRA) a été décrite par Gettman *et al.* en 2002, et suivie par beaucoup d'autres rapports. Cette technique a démontré un taux de succès et de complication similaires à l'approche laparoscopique mais elle est plus facile à apprendre et à effectuer. La PLRA est probablement promise à devenir le nouveau traitement de référence de l'OJPU avec la dissémination importante du robot chirurgical. Il n'existe cependant aucun moyen efficace et pratique pour apprendre cette technique aux chirurgiens novices en robotique.

La maîtrise d'une procédure chirurgicale spécifique peut être obtenue par la pratique progressive pendant plusieurs opérations chirurgicales, mais avec un processus long et parfois non réalisable. L'entraînement sur animaux ou cadavres est une méthode conventionnelle et valable pour l'apprentissage des procédures en dehors du bloc opératoire. Cependant, le coût significatif dû à l'utilisation des robots fonctionnels et de modèles onéreux rend son application très limitée. La simulation en RV est un moyen alternatif pour enseigner les techniques de chirurgie robotique dans les scénarios précliniques. Elle présente les avantages du rapport temps/coût-efficacité et de la facilité d'installation. Pourtant les simulateurs robotiques actuels fournissent peu d'exercices de procédure pour l'entraînement. Ils sont généralement utilisés pour la formation des techniques de base.

L'objectif de cette étude est de développer un curriculum dédié pour PLRA en utilisant des exercices de base disponibles dans un simulateur robotique. L'objectif ultime est d'offrir un exemple par lequel des curriculums similaires pourront être développés pour des autres procédures robotiques tant en urologie que dans d'autres spécialités.

Les techniques et étapes critiques impliquées dans PLRA ont été identifiées sur des vidéos opératoires préenregistrées. Tous les exercices (> 50) disponibles sur dV-Trainer<sup>®</sup> ont été analysés, et les plus représentatifs et similaires ont été choisis pour enseigner les techniques ou reproduire les étapes identifiées.

## II.1.2 - Publication

Article soumis à la revue « *BJU International* »

---

### Development of a virtual reality-based curriculum for robot-assisted laparoscopic dismembered pyeloplasty

---

Song Xu<sup>a,b,c</sup>, Manuela Perez<sup>a,b,d</sup>, Nicolas Hubert<sup>a,b,e</sup>, Jacques Hubert<sup>a,b,e</sup>

- a. Lorraine University, IADI, Nancy, F-54000, France.
- b. Inserm, U947, Nancy, F-54000, France.
- c. Department of Urology, Zhongnan Hospital of Wuhan University, Wuhan, 430071, China.
- d. Department of Emergency and General Surgery, CHU Nancy, Nancy, F-54000, France.
- e. Department of Urology, CHU Nancy, Nancy, F-54000, France.

#### ABSTRACT

**Objectives:** To develop a dedicated curriculum for robot-assisted laparoscopic pyeloplasty (RALPy) using basic virtual reality (VR) exercises available on a commercial robotic simulator.

**Materials and Methods:** The key steps of RALPy and the crucial sets of skills involved in each step were identified in prerecorded operative videos and listed in a table. Based on these data, similar exercises that could reproduce any of the steps were first identified on the simulator. In case of absence or inadequacy, representative exercises were selected to teach the crucial skills instead.

**Results:** The whole procedure of RALPy was divided into five steps, i.e. UPJ exposure, ureteral dismemberment and spatulation, ureteral reanastomosis, stenting, and peritoneal layer closure, and a total of eight crucial skills were identified. Seven VR exercises were finally chosen for the curriculum, with two reproducing the key steps and five teaching the crucial skills.

**Conclusions:** A dedicated VR-based curriculum was developed for RALPy. This curriculum permits novice robotic surgeons to achieve proficiency with the crucial techniques and develop the procedural memory of RALPy. It may also be used for warm-up training before

the operation. Similar curricula could be established for other robotic procedures both in urology and other specialties.

**Keywords:** robotic surgery curriculum, virtual reality simulation, surgical training, robotic-assisted pyeloplasty, robotic simulator, robotics

## **Introduction**

Ureteropelvic junction (UPJ) obstruction (UPJO) is the most common congenital anomaly of ureter. The traditional gold standard for the treatment of UPJO is open dismembered pyeloplasty, while the advantages of minimally invasive surgery led to the pursuit of laparoscopic pyeloplasty in the early 1990s [1]. Although attractive, laparoscopic pyeloplasty did not achieve wide adoption due to the technical demands and the steep learning curve associated with the procedure.

The introduction of da Vinci<sup>®</sup> robot has overcome the shortcomings of laparoscopy and enhanced surgeons' ability in laparoscopic surgery. The first experience of robot-assisted laparoscopic pyeloplasty (RALPy) was described by Gettman *et al* in 2002, followed by many other reports [2]. RALPy has demonstrated similar success and complication rates to laparoscopic approach but it is easier to learn and perform [3,4]. RALPy would hopefully become the new standard of treatment for UPJO with the further dissemination of surgical robots. However, a valid and convenient way is absent to teach this technology.

Novice robotic surgeons need requisite training to achieve proficiency of a specific procedure before they could independently perform it. This could be reached through step-wise practice with mentors during multiple clinical cases, but the process would be long and sometimes is not feasible [5]. In-vivo animate or cadaveric training could provide procedural experience outside of the operating rooms. However, the significant cost due to the use of functional robots and other expensive materials makes their use very limited. Virtual reality (VR) simulation could serve as an alternate for preclinical robotic surgery training with time/cost-effectiveness. However, current VR robotic simulators provide few procedural training modules and are generally used for basic skills training. Methods should be explored on how to use them for procedural training.

The present study aims to develop a dedicated curriculum for RALPy using basic VR exercises available on a commercial robotic simulator. To our knowledge, this represents the

first VR-based curriculum for specific urologic robotic surgery. Our ultimate interest is to provide an example through which similar curricula could be established for other robotic procedures both in urology and other specialties.

## **Materials & Methods**

This is a descriptive study to explain the development of a dedicated VR-based curriculum. The curriculum was established on the platform of the robotic simulator dV-Trainer® (dVT) (Mimic Technologies, Seattle, WA, USA). This simulator offers more than 50 exercises for robotic surgical skills training. The proficiency-based scoring system MScore™ provides comprehensive metrics for objective performance evaluation.

The key steps of the RALPy procedure and the crucial skills involved in each step were identified in prerecorded operative videos and listed in a table. Based on these data, similar exercises that could reproduce any of the steps were first chosen on the dVT simulator. In case of absence or inadequacy, representative exercises were selected to teach the crucial skills instead.

Justification of an exercise to be included into the curriculum depends on its similarity with the corresponding operative scene, its primary skill-focus area (referring to the declaration of Mimic Technologies), and a global consideration of its realism, representativeness, and practicability. The principle was to choose the smallest possible number of exercises to teach the essential skills.

Experts of urologic robotic surgery (with > 800 cases) and of the dVT simulator (with > 400 h experience) have collaborated for the curriculum development, from the skills identification to the VR-exercises selection.

## **Results**

### **Identification of key steps and crucial skills**

The whole procedure of RALPy was divided into five steps, and a total of eight crucial skills were identified:

- a. UPJ exposure.* A bipolar forceps and an electrocautery hook were held in the left and right hands, respectively. The colon was mobilized, followed by the dissection and

mobilization of renal pelvis, and also the identification and skeletonization of possible crossing vessels. The skills of monopolar and bipolar energy control, energy dissection, and camera navigation were crucial in this step.

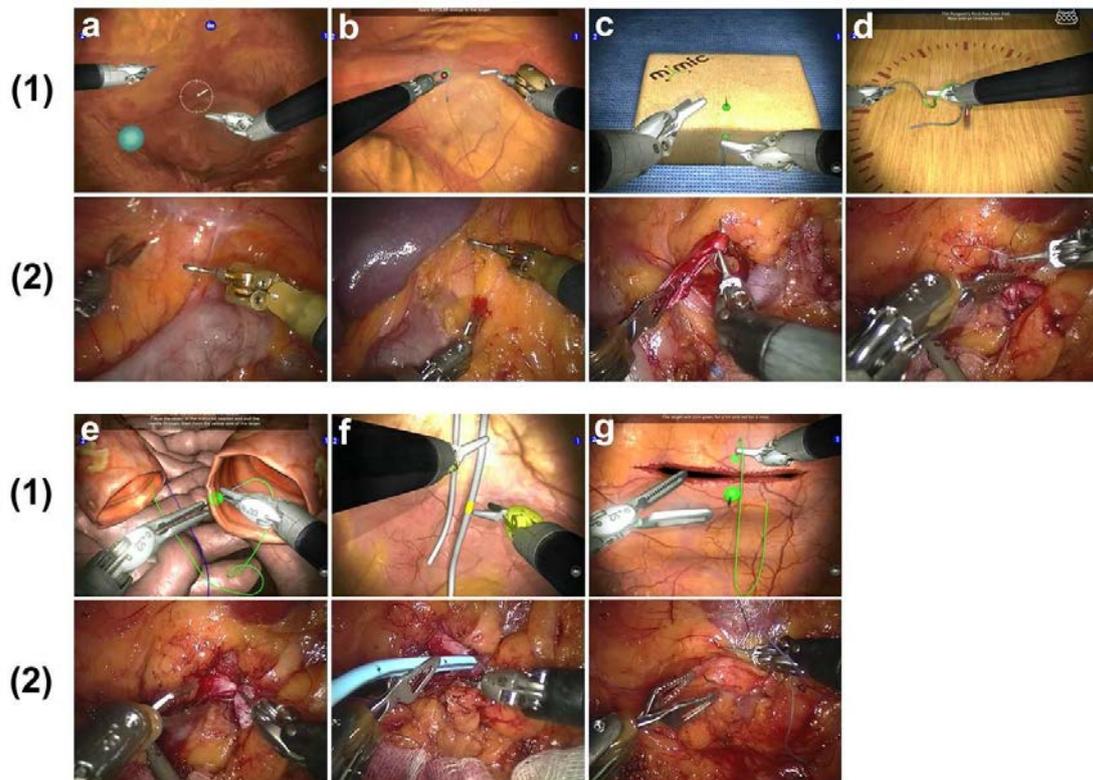
- b. Ureteral dismemberment and spatulation.* The hook in the right hand was exchanged for microscissors. The ureter was dismembered and spatulated, and redundant pelvis was excised. Proficient precision-cutting technique was needed.
- c. Ureteral reanastomosis.* With a bipolar forceps in the left hand and a microforceps in the right hand, the ureteropelvic anastomosis was performed. Mastery of the advanced surgical skills of running suture, needle driving, and knot tying was essential.
- d. Stenting.* The guide wire and the double-J stent were introduced during the ureteral anastomosis. The technique of bimanual instruments driving was required.
- e. Peritoneal layer closure.* The similar set of skills of running suture, needle driving, and knot tying were needed.

### **Selection of VR exercises**

Seven exercises available on dVT were finally chosen for the RALPy curriculum:

- a. UPJ exposure.* “Camera Targeting 1” and “Energy Switching 1” were selected to teach the respective technique of camera navigation and energy control (Fig. 1a, 1b). The exercises of dissection were under development and not released officially yet.
- b. Ureteral dismemberment and spatulation.* Cutting exercises were also under development. Examples of these exercises were demonstrated in Video 1.
- c. Ureteral reanastomosis.* “Suture Sponge 1” and “Knot the Ring 4” were chosen to teach the techniques of needle driving and knot tying, respectively (Fig. 1c, 1d). “Tubes Anastomosis–Horizontal” was selected to reproduce the step (Fig. 1e).
- d. Stenting.* “Rope Walk” was used to teach the bimanual instruments driving.
- e. Peritoneal layer closure.* “Wound Suture–Horizontal” was selected to reproduce the step (Fig. 1g).

The key steps and crucial skills identified, as well as the corresponding VR exercises selected are listed in Table 1. The relevance and similarities between the VR exercises and the corresponding manipulations in RALPy were demonstrated in Video 1.



**Fig. 1** The seven exercises available on dV-Trainer<sup>®</sup> (1) selected to teach the crucial skills involved in robotic pyeloplasty (2): “Camera Targeting 1” for camera navigation (a), “Energy Switching 1” for energy control (b), “Suture Sponge 1” for needle driving (c), “Knot the Ring 4” for knot tying (d), “Tubes Anastomosis–Horizontal” for ureteropelvic anastomosis (e), “Rope Walk” for bimanual instruments driving (f), and “Wound Suture–Horizontal” for peritoneal layer closure (g)

**Table 1** The VR exercises selected to reproduce the key steps of RALPy (procedural exercises) or teach the crucial skills involved in each step (basic exercises)

Key steps	Procedural exercises	Crucial skills	Basic exercises
UPJ exposure	Absent	Dissection Energy control Camera navigation	Under development “Energy Switching 1” “Camera Targeting 1”
Ureteral dismemberment and spatulation	Absent	Precision cutting	Under development
Ureteral reanastomosis	“Tubes Anastomosis-Horizontal”	Running suture Knot tying Needle driving	—* “Knot the Ring 4” “Suture Sponge 1”
Stenting	Absent	Bimanual instruments driving	“Rope Walk”

Peritoneal layer closure	“Wound Suture- Horizontal”	Running suture	–
		Knot tying	–
		Needle driving	–

\* Basic exercises were not needed because of the existence of procedural exercises or the skills had been covered in previous exercises

## Discussion

Current robotic simulators provide few procedural exercises and are generally used for basic skills training. This study aims to provide an example of the first VR-based curriculum for specific urologic robotic surgery.

A dedicated curriculum was developed for RALPy with seven VR exercises on the platform of dVT. Such a curriculum is easy to implement only if the simulator is available. It may reduce the needs or maximize the effects of the costly animate or cadaveric training. The curriculum permits novice robotic surgeons to achieve proficiency with the crucial techniques and develop the procedural memory of RALPy, which would eventually improve their performance and shorten learning time in live cases. Previous studies have demonstrated that training on VR laparoscopic simulators decreases the operating time and improves the performance of novice surgeons during their first clinical procedures [6,7].

Another role of this curriculum is to be used for warm-up practice before the operation. Musicians and athletes routinely warm up before entering the scene, and surgeons can do the same, especially when they have not performed the procedure for a long time, or have not operated on robot for several weeks. This would help them reach an optimized state from the beginning of the procedure.

Significant similarities or relevance exist between the seven VR exercises and the corresponding manipulations in RALPy. “Camera Targeting 1” requires trainees to move camera to search for and focus on spherical targets in a large workspace. The same technique is used in RALPy for operative field exploration and target focalization. This exercise also helps to develop stereo-depth acuity. In “Energy Switching 1”, the operator applies monopolar and bipolar energy alternately with a hook in the right hand and a forceps in the left hand. The exactly same setting is used in RALPy for soft-tissue dissection to expose UPJ. “Suture Sponge 1” permits to improve dexterity and accuracy of needle driving in both forehand and backhand approaches, which is a prerequisite for successful ureteropelvic anastomosis. “Tubes Anastomosis” and “Wound Suture” combined with “Knot the Ring 4”

could, to a great degree, reproduce the respective step of ureteropelvic anastomosis and peritoneal layer closure. In “Rope Walk”, the operator drives two instruments to alternately grasp a string and “walked” step by step to the end. The similar technique is used in the introduction of guide wire and double-J stent. In addition, all exercises except “Camera Targeting 1” permit concurrent training of EndoWrist<sup>®</sup> manipulation and/or clutching.

Current robotic simulators provide few procedural modules. The five VR robotic simulators available on the market include dVT, da Vinci Skills Simulator<sup>®</sup> (dVSS) (Intuitive Surgical Inc., USA), Robotic Surgical Simulator<sup>®</sup> (RoSS) (Simulated Surgical Skills, LLC, USA), SimSurgery Educational Platform<sup>®</sup> (SEP) (SimSurgery, Norway), and RobotiX Mentor<sup>™</sup> (Symbionix, USA). Although some augmented-reality modules are available on dVT (Maestro AR) and RoSS (HoST), only RobotiX Mentor<sup>™</sup> provides a single complete procedure—the hysterectomy—for practice, in which the operator could freely control the instruments [8]. It is hopeful that more procedural exercises would be released in the future, but still they will be limited in some representative surgeries of certain representative specialties. This would not meet the needs of various surgical specialties using robots. In contrast, developing basic skills modules is technically easier, and curricula could be established for almost all robotic surgeries with these basic exercises using the method mentioned in this study. This would maximize the advantages and the use efficiency of VR simulators in robotic surgery training.

In this study, we chose RALPy as the first example partly because it requires specific technical proficiency and is not a frequently performed procedure, and on the other hand, also because of our experience and special interest with it. Even with robotic assistance, pyeloplasty remains a challenging procedure which demands adequate training. Our group is one of the first to adopt the RALPy technology. At almost the same time that Gettman *et al* reported their first human cases, we described our experience of 14 experimental porcine procedures [9,10]. We have also pioneered the use of robotic approach in challenging UPJO cases with anatomic abnormalities (horseshoe kidneys) [11]. In 2014, we presented the results of 131 consecutive RALPy procedures, with 17 of them considered as complex cases [12].

The rapid adoption of robotic technologies in surgery has left education behind. Established robotic surgery curricula are needed for skills development. Several projects are currently underway and are in various stages of validation. The Fundamentals of Robotic Surgery (FRS) program brought together representatives of 14 surgical specialties using

surgical robots and developed a standardized curriculum for basic robotic skills training and assessment. The first validation stage has begun in 2014 [13,14]. Based on focus group interviews at three congresses, the European Association of Urology (EAU) Robotic Urology Section (ERUS) proposed a multi-step robotic surgery curriculum which is in early stages of validation [15]. As a participant of both FRS and ERUS projects, our group has concerned about robotic surgery training for a long time, and much experience has been accumulated.

Although consensus is not reached on specific implementation methods, it has been generally agreed that robotic surgery training should be performed in both preclinical and clinical scenarios. In preclinical training, trainees achieve associated knowledge of robotic surgical technologies, and develop requisite psychomotor and teamwork skills during several training sessions like didactics, dry-lab and tissue-lab exercises, animate or cadaveric procedures, and VR simulation. Within clinical training, trainees gain experience of procedures unique to their specialties through live case observation, bedside assistance, and console operation with mentors [5,15,16].

The preclinical modalities of dry-lab or wet-lab training provide the opportunities to work on real robots. However, in most centers, using functional robots for training is unfeasible or at least limited. It is the advantage of robotic simulators to permit efficient skills training, through a variety of exercises and objective scoring system, without requirement of robots or other materials. Although being cost-effective compared to robots, current robotic simulators are still expensive. All dVT, dVSS and RoSS cost about 100,000 dollars, and dVSS needs an additional console of da Vinci Si<sup>®</sup> as the platform. SEP is relatively less expensive, while it provides only two-dimensional vision and the validity needs to be further determined [17,18]. For wider application, the price of the simulators should be reduced in the future.

For now, little effort has been made to use VR exercises for specific robotic surgery training. Fantola *et al* developed a curriculum for Roux-en-Y gastric bypass using eight exercises available on dVT [19]. Kang *et al* described the “Tubes 3” module of dVT for practicing vesicourethral anastomosis [20]. Other VR-based curricula were developed but mainly for basic robotic skills training. The fundamental skills of robotic surgery (FSRS) curriculum comprises of four modules with a total of 16 tasks available on RoSS<sup>®</sup> [21,22]. Culligan *et al* developed a protocol using 10 exercises of dVSS<sup>®</sup> based on expert opinions

[23]. Connolly *et al* also developed a curriculum using five exercises of dVSS<sup>®</sup> and established its construct validity [24].

The RALPy curriculum presents two major limitations: first, the cutting and dissection exercises are under development and not available yet. Second, the suture direction is contrary when performing the posterior aspect anastomosis in “Tubes Anastomosis–Horizontal” (outside in at left side to inside out at right side) versus the ureteropelvic anastomosis (inside out at right side to outside in at left side). However, these limitations are temporary and would be overcome with the further development of robotic simulators. Validation studies are needed to determine the educational benefits of the curriculum.

## **Conclusions**

A dedicated VR-based curriculum was developed for RALPy. This curriculum permits novice robotic surgeons to achieve proficiency with the critical techniques and develop the procedural memory of RALPy, which would eventually improve their performance and shorten learning time in live cases. It may also be used for warm-up training before the operation. Similar curricula could be established for other robotic procedures both in urology and other specialties. This would hopefully reduce the needs or maximize the effects of the costly animate or cadaveric training, and also maximize the use efficiency of VR simulators in robotic surgery training.

## **Conflicts of Interest**

Dr. Xu, Dr. Perez, Dr. Hubert N, and Dr. Hubert J have no conflicts of interest or financial ties to disclose.

## **Acknowledgments**

S.X. is supported by a fellowship provided by the China Scholarship Council for studies at Lorraine University.

## **References**

[1] Schuessler WW, Grune MT, Tecuanhuey LV, Preminger GM. Laparoscopic dismembered pyeloplasty. *J Urol* 1993;150:1795–9.

- [2] Gettman MT, Neururer R, Bartsch G, Peschel R. Anderson-Hynes dismembered pyeloplasty performed using the da Vinci robotic system. *Urology* 2002;60:509–13.
- [3] Autorino R, Eden C, El-Ghoneimi A, et al. Robot-assisted and laparoscopic repair of ureteropelvic junction obstruction: a systematic review and meta-analysis. *Eur Urol* 2014; 65: 430-52.
- [4] Samarasekera D, Stein RJ. Robotic-assisted laparoscopic approaches to the ureter: Pyeloplasty and ureteral reimplantation. *Indian J Urol* 2014; 30: 293-9.
- [5] Lee JY, Mucksavage P, Sundaram CP, McDougall EM. Best practices for robotic surgery training and credentialing. *J Urol* 2011; 185: 1191-7.
- [6] Våpenstad C, Buzink SN. Procedural virtual reality simulation in minimally invasive surgery. *Surg Endosc* 2013; 27: 364-77.
- [7] Nagendran M, Gurusamy KS, Aggarwal R, Loizidou M, Davidson BR. Virtual reality training for surgical trainees in laparoscopic surgery. *Cochrane Database Syst Rev* 2013; 8: CD006575.
- [8] Symbionix: RobotiX Mentor Library of Modules. <http://symbionix.com/simulators/robotix-mentor/robotix-library-of-modules/...> Accessed February 2015
- [9] Hubert J, Feuillu B, Mangin P, Artis M, Villemot JP. Robot-assisted (Da Vinci) laparoscopic uretero-pelvic junction repair. Results of experimental surgery in a series of 14 pigs. *Prog Urol* 2002; 12: 592-6.
- [10] Hubert J, Feuillu B, Mangin P, Lobontiu A, Artis M, Villemot JP. Laparoscopic computer-assisted pyeloplasty: the results of experimental surgery in pigs. *BJU Int* 2003; 92: 437-40.
- [11] Chammas M, Feuillu B, Coissard A, Hubert J. Laparoscopic robotic-assisted management of pelvi-ureteric junction obstruction in patients with horseshoe kidneys: technique and 1-year follow-up. *BJU Int* 2006; 97: 579-83.
- [12] Chammas Jr MF, Mitre AI, Hubert N, Egrot C, Hubert J. Robotic laparoscopic pyeloplasty. *JLS* 2014; 18: 110-5.
- [13] Smith R, Patel V, Satava R. Fundamentals of robotic surgery: a course of basic robotic surgery skills based upon a 14-society consensus template of outcomes measures and curriculum development. *Int J Med Robot* 2014; 10: 379-84.
- [14] Hubert J, Satava RM. Re: Nicolòmaria Buffi, Henk Van Der Poel, Giorgio Guazzoni, Alexander Mottrie, on behalf of the Junior European Association of Urology (EAU) Robotic Urology Section with the collaboration of the EAU Young Academic Urologists

- Robotic Section. Methods and priorities of robotic surgery training program. *Eur Urol* 2014; 66: e9-10.
- [15] Ahmed K, Khan R, Mottrie A, et al. Development of a standardised training curriculum for robotic surgery: a consensus statement from an international multidisciplinary group of experts. *BJU Int* 2014. doi: 10.1111/bju.12974.
- [16] Schreuder H, Wolswijk R, Zweemer R, Schijven M, Verheijen R. Training and learning robotic surgery, time for a more structured approach: a systematic review. *BJOG Int J Obstet Gynaecol* 2012; 119: 137-49.
- [17] Smith R, Truong M, Perez M. Comparative analysis of the functionality of simulators of the da Vinci surgical robot. *Surg Endosc* 2014.
- [18] Abboudi H, Khan MS, Aboumarzouk O, et al. Current status of validation for robotic surgery simulators—a systematic review. *BJU Int* 2013; 111: 194-205.
- [19] Fantola G, Perrenot C, Frisoni R, et al. Robotic Roux-en-Y gastric bypass surgical simulation curriculum. *Obes Surg* 2014; 24: 1833-4.
- [20] Kang SG, Cho S, Kang SH, et al. The tube 3 module designed for practicing vesicourethral anastomosis in a virtual reality robotic simulator: determination of face, content, and construct validity. *Urology* 2014; 84: 345-50.
- [21] Stegemann AP, Ahmed K, Syed JR, et al. Fundamental skills of robotic surgery: a multi-institutional randomized controlled trial for validation of a simulation-based curriculum. *Urology* 2013; 81: 767-74.
- [22] Raza SJ, Froghi S, Chowriappa A, et al. Construct validation of the key components of Fundamental Skills of Robotic Surgery (FSRS) curriculum—a multi-institution prospective study. *J Surg Educ* 2014; 71: 316-24.
- [23] Culligan P, Gurshumov E, Lewis C, Priestley J, Komar J, Salamon C. Predictive validity of a training protocol using a robotic surgery simulator. *Female Pelvic Med Reconstr Surg* 2014; 20: 48-51.
- [24] Connolly M, Seligman J, Kastenmeier A, Goldblatt M, Gould JC. Validation of a virtual reality-based robotic surgical skills curriculum. *Surg Endosc* 2014; 28: 1691-4.

### **II.1.3 - Résultats principaux et conclusions**

Les techniques de base du contrôle de la caméra, contrôle des énergies, réalisation d'un nœud, conduite de l'aiguille et conduite biannuelle des instruments ont été identifiées comme critiques dans la procédure de PLRA. Cinq exercices de RV ont été choisis pour les apprendre. Deux autres exercices ont été sélectionnés pour simuler les étapes clés de l'anastomose pyélo-urétérale et la fermeture du rétropéritoine. Ces sept exercices présentent une bonne pertinence et similitude avec les manipulations correspondantes dans la PLRA. Une vidéo a été fournie pour la démonstration de ce curriculum.

En conclusion, un curriculum dédié de RV a été développé pour la procédure de PLRA. Ce curriculum permet aux chirurgiens novices robotiques d'acquérir la maîtrise des techniques critiques et de développer une mémoire globale de PLRA, ce qui améliorerait leur performance et le temps d'apprentissage en clinique sur des patients. Il peut aussi être utilisé dans un but d'échauffement préopératoire par des chirurgiens qui n'utilisent qu'occasionnellement le robot. Des curriculums similaires peuvent être établis pour d'autres procédures robotiques tant en urologie que d'autres spécialités, ce qui réduira les exigences ou maximisera les effets de la formation coûteuse sur animaux ou cadavres.

Nous avons décrit dans cette étude la méthodologie de développement, et la prochaine étape sera d'effectuer des études de validation pour déterminer l'intérêt éducatif de ce curriculum : si l'entraînement sur ce curriculum permet d'améliorer la performance au bloc opératoire reste à prouver. Après la validation, nous se mettrons à établir des curriculums similaires pour d'autres procédures robotiques.

## II.2 - Validation du simulateur XTT

### II.2.1 - Organisation de l'étude

Contrairement à la chirurgie ouverte ou à la chirurgie laparoscopique traditionnelle, le chirurgien robotique et son assistant sont séparés par une distance et ils ne partagent pas la même vision (3D pour le chirurgien et 2D pour l'assistant). Le chirurgien assis à la console n'a qu'une vision du champ opératoire et perd tout contact visuel avec le reste de l'équipe, alors que celui-ci représente 80% des moyens de communication dans la vie courante. De plus, le chirurgien n'a pas d'accès direct au patient, et l'aide fournie par l'assistant est importante et parfois cruciale dans ces procédures. Tout ceci signifie qu'une nouvelle façon de coopération doit être établie. Non seulement les chirurgiens robotiques, mais aussi les assistants doivent être entraînés afin de parvenir à une maîtrise des procédures. Ni les chirurgiens robotiques ni leurs assistants ne devraient effectuer leur courbe d'apprentissage initiale au bloc opératoire. Ils devraient passer par une formation adéquate et leurs techniques devraient être évaluées et certifiées. Un outil d'évaluation compact et valide est donc nécessaire.

Le simulateur XTT a été développé par *Mimic Technologies* en 2014. En tandem avec dVT, ils permettent aux assistants de s'entraîner avec les chirurgiens pour le travail en équipe. Comme d'autres simulateurs chirurgicaux, le XTT ne fournit qu'une plate-forme pour la formation, et c'est le travail des chercheurs de le valider comme un outil d'évaluation des techniques. Plusieurs paramètres doivent être déterminés afin de valider un simulateur chirurgical.

L'objectif de cette étude est donc de déterminer la validité apparente, de contenu, de construit et concurrente du simulateur XTT comme un outil d'évaluation des techniques d'assistance en chirurgie robotique. Ceci représente, à notre connaissance, la première étude de validation du XTT.

Des volontaires ont été recrutés pour les expérimentations pendant un curriculum de DIU (Diplôme Interuniversitaire) de chirurgie robotique. Ils étaient composés d'étudiants en médecine, d'infirmières du bloc opératoire, de résidents, de chirurgiens laparoscopiques et de chirurgiens robotiques. Il a été demandé à chaque sujet d'effectuer quatre exercices sur le XTT (session XTT) et ensuite d'effectuer les mêmes exercices avec les modèles physiques sur un da Vinci<sup>®</sup> S (session da Vinci). Des questionnaires ont été remplis pour évaluer la validité apparente et de contenu ; les performances dans les exercices du XTT ont été comparées entre

les experts et les novices pour déterminer la validité de construit ; la corrélation des performances dans les deux sessions ont été testée pour déterminer la validité concurrente.

## II.2.2 - Manuscrit

---

### Determination of the face, content, construct, and concurrent validity of the Xperience™ Team Trainer

---

Song Xu, Manuela Perez, Cyril Perrenot, Jacques Hubert

#### Abstract

**Objectives:** To determine the face, content, construct, and concurrent validity of the Xperience™ Team Trainer (XTT) as an assessment tool of robotic surgical bed-assistance skills.

**Methods:** Subjects were recruited during a robotic surgery curriculum. They were divided into three groups: the group RA with robotic bed-assistance experience, the group LS with laparoscopic surgical experience, and the control group without bed-assistance or laparoscopic experience. The subjects first performed two standard FLS exercises on a laparoscopic simulator in order to determine their basic laparoscopic skills. After that, they performed three virtual reality exercises on XTT, and then performed similar exercises on physical models on a da Vinci® box trainer.

**Results:** Thirty persons volunteered for the study, while two of them stopped at the FLS tasks. More than 68 % subjects considered the XTT simulator and the three exercises to be with high or very high realism. More than 78 % subjects agreed on the interest of XTT and the three exercises for the training. The group RA and the group LS demonstrated a similar level of basic laparoscopic skills. Both groups performed better than the control group on XTT exercises ( $p < 0.05$ ). The performance superiority of the group RA over LS was observed but not statistically significant. Correlation of performance was determined between the tests on XTT and on da Vinci® box trainer.

**Conclusions:** XTT is the first model of simulator in the world that emphasizes the teamwork training in surgery. This innovation may change the paradigm of robotic surgery training in the near future. As an assessment tool of bed-assistance skills, XTT proves good face and content validity. However, the training modules remain to be developed, and more complex

and discriminative exercises are needed. Other studies will be needed to further determine construct and concurrent validity in the future.

**Key Words:** Xperience Team Trainer; validity; bedside assistant; robotic surgical training; robotic simulator; virtual reality simulation

## **Introduction**

Robot-assisted laparoscopic surgery has expanded rapidly in the last decade. Approximately 570,000 da Vinci<sup>®</sup> procedures were performed worldwide in 2014 [1]. The advantages of this technology have been widely documented, e.g., ergonomics, EndoWrist<sup>®</sup> instruments, high-resolution 3D vision, tremor filtration, and motion scaling [2]. The latest da Vinci<sup>®</sup> Xi system was launched in 2014. Competitive robotic systems are also under development around the world with the promise of lower cost or some improved techniques [3]. It seems promising that robots will play an increasingly important role in surgery.

Surgeons need adequate training to achieve proficiency of the robotic technology. Standards should be established for the assessment of techniques and the credentialing of robotic surgeons. Currently, robotic surgical training programs exist in many formats in the world, and the process of standardization has begun [4]. With multiple advantages such as the relative cost-effectiveness, ease of setup, and real-time feedback of performance, the role of virtual reality simulators has been emphasized in robotic surgical training. Five virtual reality robotic simulators are currently available on the market, of which the Mimic dV-Trainer<sup>®</sup> (dVT) has benefited from a largest number of validation studies [5,6].

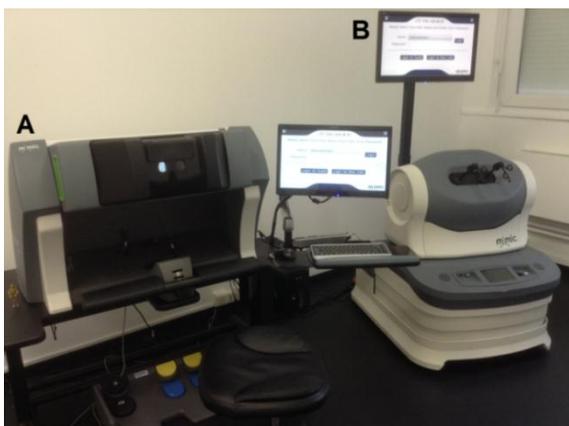
In robotic procedures, the console surgeon is un-scrubbed without direct access to the patient. He could only interact with the group through audio communication, whereas in conventional surgery, more than 80 % of the information exchange is realized via visual contact. The success of robotic surgery thus relies on high-quality teamwork, wherein the bedside assistant plays an important role. He takes responsibility for the patient safety and the smooth proceeding of the operation. Moreover, it is believed that experienced bed-assistants could help decrease the operative time, reduce blood loss, and may also reduce complications [7]. Currently, sufficient attention is not given to the training and credentialing of bedside assistants [8]. A convenient and valid tool is needed for the training and assessment of robotic bed-assistance skills.

In 2014, the Mimic Technologies launched the Xperience<sup>®</sup> Team Trainer (XTT) to be used in tandem with dVT for the bed assistants to train together with the console surgeons. This innovation emphasizes the importance of teamwork, which may change the paradigm of robotic surgery training in the near future. This study represents the first effort to determine the face, content, construct, and concurrent validity of XTT as an evaluation tool of robotic surgical bed-assistance skills. The values of XTT as a teamwork training tool are also investigated.

## Materials & Methods

### Equipment

The experiments were performed during the curriculum of DIU (inter-university degree) in robotic surgery in Nancy. An XTT simulator connected with a dVT simulator (Figure 1), as well as a da Vinci<sup>®</sup> S robot was used for the study.

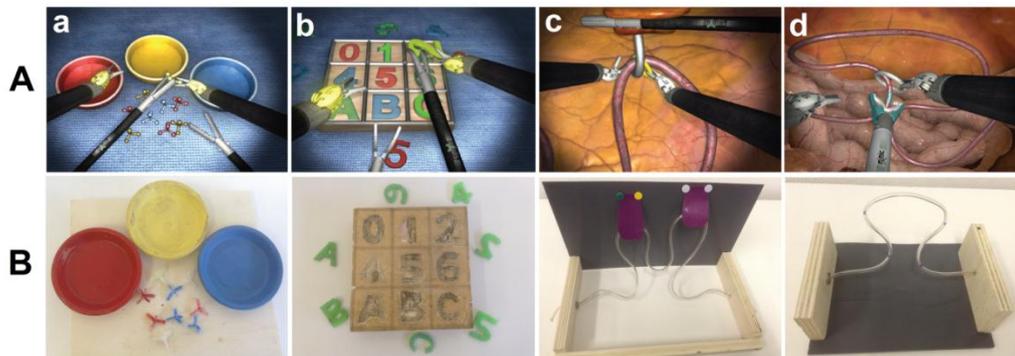


**Fig. 1** The dV-Trainer (A) and the Xperience Team Trainer (B)

The dVT-XTT platform provided 13 team exercises for the training of three bed-assistance skills. Based on expert opinions, four exercises were chosen for the experiments, that were “Team Pick & Place 2” (PP2), “Team Match Board 1” (MB1), “Team Ring Walk Retraction” (RWR), and “Team Clipping Ring Walk 1” (CRW) (Figure 2A). PP2 was used for the instruction, and the rest three exercises were used for the test. Each test exercise teaches one of the three bed-assistance skills: MB1 for transfers & handoffs, RWR for retraction, and CRW for clip application. Physical models were made to reproduce the four virtual reality exercises for the use on da Vinci<sup>®</sup> box trainer (Figure 2B).

The dVT-XTT platform automatically recorded the performance of assistants using a built-in scoring system. Multiple metrics were provided and have been previously described,

such as the task completion time, the instrument motion, and several error metrics [9]. Two new metrics were added in CRW: the “clipping distance” refers to the total distance of applied clips to their corresponding marked application regions; the “incorrect clips” indicates the number of incorrectly applied clips. An overall score was generated by synthesizing the results of all metrics.



**Fig. 2** The four exercises available on Xperience Team Trainer (**A**) and the corresponding physical models (**B**): Team Pick & Place (**a**), Team Match Board 1 (**b**), Team Ring Walk Retraction (**c**), and Team Clipping Ring Walk (**d**)

## Subjects

The DIU trainees, robotic surgeons, residents, and medical students without previous XTT experience were recruited for the study. Informed consents were obtained from all participants. Each subject was assigned a unique identity number under which all his/her data would be accumulated.

## Experimental procedures

### *Collection of demographic data*

Each subject fulfilled a questionnaire concerning the civil and professional information. The numbers of robotic (as bed-assistant or console surgeon) and laparoscopic cases were asked.

### *Evaluation of basic laparoscopic skills*

Each subject performed sequentially two standard FLS exercises—“Peg Transfer” and “Precision Cutting”—on a laparoscopic box trainer. Both exercises were filmed and the performances were scored using standard FLS metrics [10]. The two scores were averaged as the basic laparoscopic skills of the subjects.

### *XTT session*

Subjects performed the exercises on XTT with a same expert console operator. After three attempts of PP2 within a XTT-familiarization period, the subjects performed sequentially the test exercises of MB1, RWR, and CRW. Each exercise was repeated thrice, with the first attempt for familiarization and the last two attempts averaged as the performance. Immediately after the third attempt of an exercise, the subjects evaluated its realism and interest of training on a five point Likert scale. When all the exercises were finished, they evaluated the realism and interest of the global system, and fulfilled a questionnaire of NASA Task Load Index (NASA-TLX).

The NASA-TLX is a multi-dimensional rating procedure that provides an overall workload score based on a weighted average of ratings on six subscales: mental demands, physical demands, temporal demands, own performance, effort, and frustration.

#### *da Vinci session*

The subjects performed the four exercises in the same order with an expert da Vinci console operator. Each exercise was repeated twice due to the limited access to the robot. The first attempt allowed for familiarization, and the second attempt was filmed for the subsequent performance evaluation. After all the exercises, subjects described the advantages and drawbacks of XTT compared to the da Vinci box trainer. They fulfilled also a NASA-TLX questionnaire.

### **Validation strategies**

#### *Face and content validity*

Face validity refers to the realism of the simulator. Content validity examines the appropriateness of the system as a training tool. The opinions (collected in XTT session) of the subjects with robotic bed-assistance or laparoscopic experience were used to determine face validity. The opinions of the subjects with robotic bed-assistance or robotic surgical experience were used to determine content validity.

#### *Construct validity*

Construct validity assesses the simulator's ability to differentiate subjects possessing different levels of skills. The subjects were divided into three groups: (a) group RA—subjects with robotic bed-assistance experience; (b) group LS—subjects with laparoscopic surgical

experience; (c) control group—subjects without robotic or laparoscopic experience. Performances on the XTT exercises were compared between the three groups.

#### *Concurrent validity*

Concurrent validity indicates the extent to which performance on a new test corresponds to performance on an established test of the same construct. Correlation of performances on the XTT and the da Vinci exercises was tested. The de-identified videos of da Vinci exercises were transferred to two evaluators. They assessed the subjects' performances independently using a modified version of the "Global Operative Assessment of Laparoscopic Skills" (GOALS) (Table 1).

#### *Test-retest Reliability*

Test-retest reliability examines the correlation of performances on the exercises that are performed more than once. Correlation of the performances in the second and third attempts of each XTT exercise was tested.

#### *Inter-rater reliability*

This modality determines the degree of agreement among raters. Correlation of the two set of GOALS scores of the two evaluators was tested.

### **Statistical analysis**

Data were analyzed using the software R. Performances of the three groups on XTT exercises were compared using a Kruskal-Wallis rank sum test followed by a post-hoc Wilcoxon rank sum test. The  $p$  value was adjusted using Holm method. Correlation of performances was tested using the Spearman's correlation. Statistical significance was determined at  $p < 0.05$ .

## **Results**

### **Demographics**

Thirty persons volunteered for the experiments, whereas two persons stopped at the FLS tasks. The rest 28 subjects completed the XTT session, and 19 of them completed the da Vinci session. One subject performed the XTT exercises with a different console operator. His data were only used to examine face and content validity. Demographic data are presented in Table 2.

**Table 2** Demographic data

	RA	LS	Control
<i>n</i>	11	7	9
Age (years)	30.7 ± 5.2	41.9 ± 14.7	38.3 ± 10.2
Position ( <i>n</i> )	Surgeon (10) Nurse (1)	Surgeon (7)	Nurse (6) Student (3)
Median robotic bed-assistance cases (range), <i>n</i>	25 (3-100), <i>n</i> = 11	<i>n</i> = 0	<i>n</i> = 0
Median laparoscopic surgical cases (range), <i>n</i>	30 (5-300), <i>n</i> = 10	100 (6-1,000), <i>n</i> = 7	<i>n</i> = 0

### Face validity

Data derived from 19 subjects. 68.4 % persons considered MB1 and CRW to be with a high or very high realism. The ratio was 89.5 % for RWR. More than 73.7 % subjects voted a high or very high realism for the global system as well as its hardware, visual display, virtual working space, and virtual instruments. Especially the ratio was 94.7 % for the visual display. Only 8 (42.1 %) persons thought the interaction between instruments and objects were of high or very high realism. Nine others thought it to be moderately realistic (Table 3).

### Content validity

Data derived from 14 subjects. More than 78.6 % persons considered the three virtual reality exercises were of high or very high interest to teach the skills that they aimed at. Most subjects thought that XTT was interesting for bed-assistant (85.7 %) and robotic surgical teamwork (100 %) training. Similarly, a large majority of subjects agreed that XTT should be implemented into the training programs of residents, operating room nurses, and novice robotic surgeons (Table 3).

**Table 3** Face (realism) and content (interest) validity

Face validity ( <i>n</i> =19)	Very high	High	Average	Low	Very low	≥ High (%)
MB1	2	11	6	0	0	68.4
RWR	5	12	2	0	0	89.5
CRW	7	6	5	1	0	68.4
Global system	4	11	3	1	0	79.0
Hardware	8	6	4	1	0	73.7
Visual display	6	12	1	0	0	94.7
Virtual working space	5	11	2	1	0	84.2
Virtual instruments and objects	4	10	3	2	0	73.7
Interaction of instruments with objects	2	6	9	2	0	42.1
Content validity ( <i>n</i> =14)	Very high	High	Average	Low	Very low	≥ High (%)

MB1	5	6	3	0	0	78.6
RWR	4	9	1	0	0	92.9
CRW	6	6	2	0	0	85.7
Interest of XTT for bedside assistant training	7	5	2	0	0	85.7
Interest of XTT for teamwork training	7	7	0	0	0	100.0
				Yes (%)	No	No opinion
XTT should be implemented into the training programs of:	residents			13 (92.9)	1	0
	operating room nurses			11 (78.6)	1	2
	novice robotic surgeons			13 (92.9)	0	1

### Construct validity

The group RA and the group LS achieved similar scores on the FLS tasks ( $112.6 \pm 55.2$  vs.  $100.9 \pm 36.0$ ), and both groups performed better than the control group ( $39.9 \pm 31.0$ ) ( $p < 0.05$ ).

Both the groups RA and LS performed better than the control group in nearly all metrics in each of three XTT exercises, although statistical significance was not achieved in all comparisons (Table 4). The group RA performed better than the group LS in MB1 in all metrics but the instrument collisions, whereas statistical significance was not achieved (Table 4). Similar performance superiority of RA over LS was not clearly observed in RWR and CRW (Figure 3).

Data were averaged cross the three XTT exercises. The combined data demonstrated the similar tendency that both the groups RA and LS performed better than the control group; a slightly better performance of the group RA over LS was observed in nearly all metrics, but statistical significance was only achieved in the excessive instrument force ( $p < 0.05$ ) (Table 4, Figure 4).

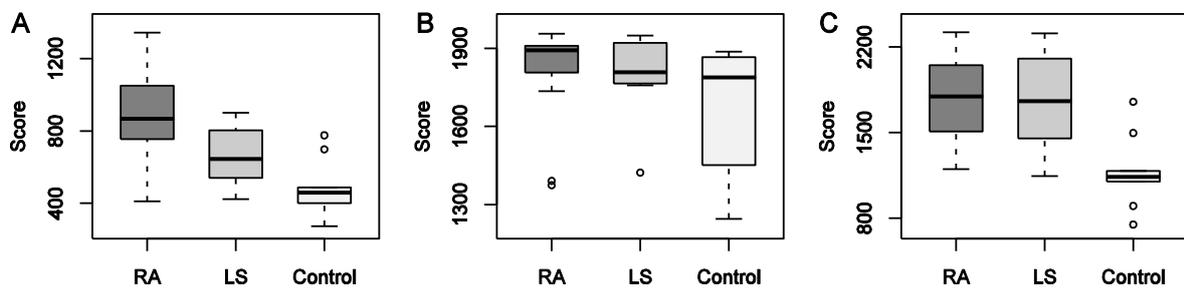
The control group declared a heavier workload (with a weighted rating of  $74.3 \pm 13.3$ ) versus the group RA ( $53.3 \pm 22.5$ ) and LS ( $57.1 \pm 16.7$ ), but statistical significance was not achieved (Figure 5).

**Table 4** Construct validity

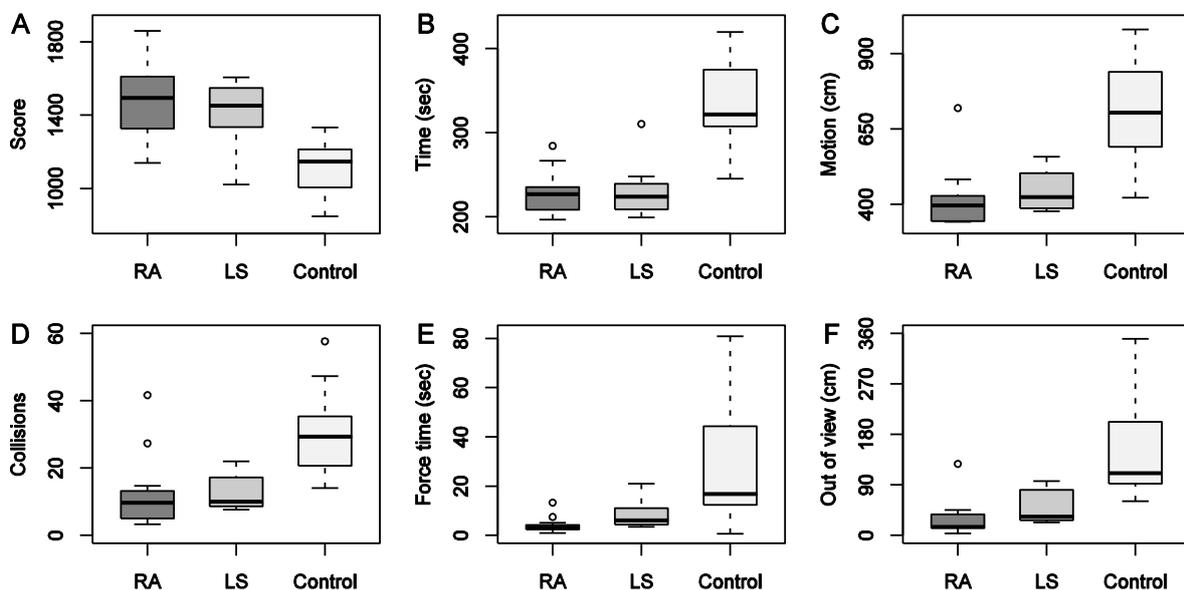
<b>MB1</b>	Overall score	Task duration	Instrument motion	Instrument collisions	Excessive force	Out of view	Clipping distance	Incorrect clips
RA vs. LS	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	–	–
LS vs. Control	<i>N</i>	0.010	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	–	–
RA vs. Control	0.004	0.0004	0.009	<i>N</i>	0.013	0.006	–	–

<b>RWR</b>								
RA vs. LS	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	–	–
LS vs. Control	<i>N</i>	<i>N</i>	0.046	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	–	–
RA vs. Control	<i>N</i>	0.0069	0.029	0.022	0.036	<i>N</i>	–	–
<b>CRW</b>								
RA vs. LS	<i>N</i>							
LS vs. Control	0.033	0.035	0.004	<i>N</i>	<i>N</i>	0.046	<i>N</i>	<i>N</i>
RA vs. Control	0.002	0.035	0.0007	0.025	<i>N</i>	0.002	<i>N</i>	0.009
<b>Combined data</b>								
RA vs. LS	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	0.031	<i>N</i>	–	–
LS vs. Control	0.023	0.004	0.011	0.015	<i>N</i>	0.016	–	–
RA vs. Control	0.002	0.0004	0.002	0.015	0.013	0.0007	–	–

*N* non-significant



**Fig. 3** The overall score of the three groups in the virtual reality exercises of MB1 (A), RWR (B), and CRW (C)



**Fig. 4** Combined data cross the three virtual reality exercises: overall score (A), task completion time (B), instrument motion (C), instrument collisions (D), excessive instrument force (E), and instruments out of view (F)

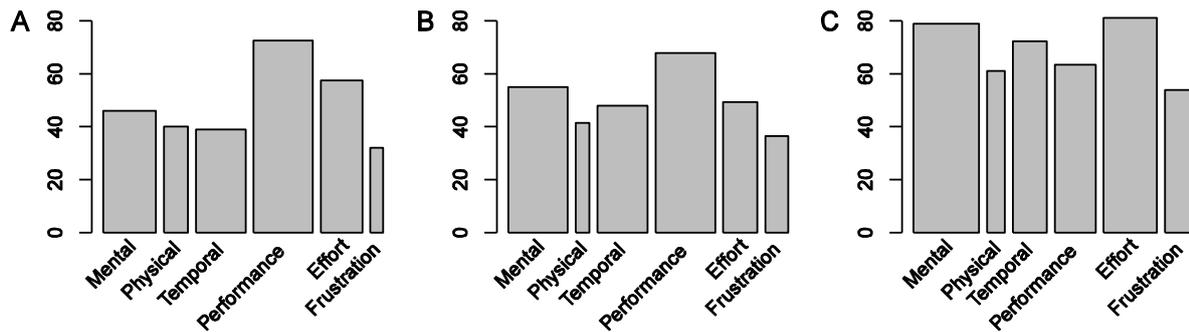


Fig. 5 Results of NASA-TLX in XTT session of the group RA (A), LS (B), and control (C)

### Concurrent validity

With the combined data cross exercises, each XTT measure demonstrated correlation with at least one GOALS item ( $p < 0.05$ ) (Table 5). For the separate exercises, a strongest correlation of performances in the XTT and da Vinci tests was determined in MB1, followed by CRW. The correlation was poor in RWR. The weighted ratings of NASA-TLX in the two tests were significantly correlated ( $r = 0.835, p = 5.83e-05$ ).

The advantages and drawbacks of XTT compared to the da Vinci box trainer described by the subjects are summarized in Table 6.

**Table 5** Concurrent validity (combined data cross exercises)

XTT measures	<i>r</i>	<i>p</i>	Items of GOALS
Overall score	0.476	0.054	Average performance
	0.496	0.043	Depth perception
	0.514	0.035	Tissue handling
Task completion time	-0.661	0.004	Average performance
	-0.733	0.001	Depth perception
	-0.586	0.013	Efficiency
	-0.691	0.002	Tissue handling
	-0.487	0.047	Effectiveness
Instrument motion	-0.700	0.002	Average performance
	-0.718	0.001	Depth perception
	-0.529	0.029	Efficiency
	-0.699	0.002	Tissue handling
	-0.604	0.010	Effectiveness
Instrument collisions	-0.577	0.015	Average performance
	-0.608	0.010	Depth perception
	-0.628	0.007	Tissue handling
	-0.492	0.045	Effectiveness
Excessive instrument force	-0.574	0.016	Average performance
	-0.631	0.007	Depth perception
	-0.566	0.018	Tissue handling
	-0.543	0.024	Effectiveness
Instruments out of view	-0.504	0.039	Tissue handling

**Table 6** The advantages and drawbacks of XTT compared to the da Vinci® box trainer

ADVANTAGES	DRAWBACKS
Easily assessable, without requirement of robot; easier and less time to implement; needs less space	Lack of force feedback; difficult to discover instrument collisions
Real-time and graphic feedback of performance with multiple measures; comprehends better the temporal and mental demands	Less realistic: does not reproduce easily the real condition; difference of manipulation with actual experience; amplified instrument motion in MB1; the instrument tips feel too soft in MB1;
Reproducibility of the exercises	some anomalies in the behaviors of instruments or objects in CRW;
More intuitive with visual effects	Some errors in visual representation in CRW
Comfort of installation and manipulation; less tiring	Some resistance during the movement of grips
High resolution and beautiful images	Instruments already in place, without the step of introduction
Less physical constraints (due to robotic arms)	
Easier to communicate with the console operator	
More exercises and the capacity of further development	

### Test-retest reliability

The correlation of performances in the second and third attempts was determined in all metrics of MB1, and in the metrics of task completion time and instrument collisions of all the three exercises ( $p < 0.05$ ) (Table 7).

**Table 7** Test-retest reliability between the second and third attempts

	Overall score	Task duration	Instrument motion	Instrument collisions	Excessive force	Out of view	Clipping distance	Incorrect clips
MB1	2.25e-07* (0.864)	0.0003* (0.713)	3.83e-06* (0.910)	1.29e-08* (0.899)	0.010* (0.538)	4.16e-08* (0.886)	–	–
RWR	0.189 (0.284)	0.004* (0.586)	0.080 (0.374)	0.042* (0.427)	0.238 (0.256)	0.155 (0.307)	–	–
CRW	0.073 (0.400)	0.002* (0.645)	0.184 (0.301)	0.005* (0.590)	0.066 (0.409)	0.157 (0.320)	0.080 (0.392)	0.497 (0.157)

Results presented in forms of  $p$  value ( $r$ )

### Inter-rater reliability

Correlation of the average GOALS scores evaluated by the two independent evaluators was determined ( $r = 0.661$ ,  $p = 7.249\text{e-}08$ ).

### Discussion

This study represents the first effort to determine the face, content, construct, and concurrent validity of the XTT simulator as an assessment tool of robotic surgical bed-assistance skills.

The XTT simulator demonstrates face validity, but the training modules remain to be improved. Except the interaction between instruments and objects, the realism of the global system and most of its functions was approved. Of the three exercises, RWR was thought to be the most realistic. In MB1, the motion of instruments was sensitive or somewhat amplified. The instrument tips also felt too soft. In CRW, bugs were occasionally encountered during the charge and the deployment of clips. That is why half of the subjects voted an average realism for the instrument-object interaction.

Most subjects agreed on the interest of XTT for bed-assistant training, and especially all the subjects appreciated its interest for teamwork training, thus proved content validity. Unlike in open or laparoscopic surgery, robotic surgeons are un-scrubbed and physically separated to the patient. This setting has increased the importance and responsibility of bed-assistants, and an effective teamwork between surgeons and assistants becomes crucial. Experienced robotic surgeons make full use of their advantages of the 3D vision and the EndoWrist® instruments, and give appropriate commands to their assistants. Experienced bed-assistants keep fine balance between over and under-activity and provide suggestions at the right moment. The success of robotic procedures relies on the expertise of both surgeons and assistants, and this would be unrealizable without adequate training. Current robotic curricula usually provide independent training for surgeons and bed-assistants. The wet-lab (animal) procedures permit cooperation of the two roles, but the access is limited with considerable costs. The connection of XTT with dVT provides a valuable platform for the robotic surgeons and their assistants to train together. This is an innovation that indicates a new paradigm of robotic surgery training. In order to meet the needs of practical applications, the training modules of XTT need to be further developed. Some basic techniques should be included (e.g., introduction of instruments, suction and irrigation, needle control), and more complex exercises will be needed.

Other studies will be needed to determine the construct validity. In this study, the group RA and the group LS demonstrated a similar level of basic laparoscopic skills. The group RA then had additional robotic bed-assistance experience (with a median of 25 cases). There is no consensus about how many cases a bedside assistant would need to achieve proficiency, but a minimum of 10-20 cases was suggested [7,11]. Both the groups RA and LS performed better than the control group on the XTT exercises, but significant difference was not determined between themselves. Laparoscopic but not robotic bed-assistance experience seemed to be more important as a determinant of performance. In separate exercises, differences between

the groups RA and LS were actually observed in MB1. The statistical non-significance could be results of the small sample size. Similar differences were less clear in RWR and CRW. These two exercises demand little cooperation and may be too simple for surgeons with laparoscopic experience. More complex and discriminative exercises should be developed and further validated in the future.

Concerning the NASA-TLX results, the groups LS and especially RA tended to pursue better performance and suffered less stress. The control group had no much spare to care about the performance. They suffered significant mental pressure and made more efforts to complete the tasks (Figure 5).

Correlation of performance was determined between the tests on XTT and da Vinci box trainer. It is the task completion time and the instrument motion but not the overall score that proved a better correlation with the GOALS items. This is not surprising since, according to our experience, the former two measures are more sensitive and precise in the assessment of performance. For the separate exercises, the correlation was strongest in MB1 and poor in RWR. Still, RWR is too simple to correctly reveal skills or tell differences.

Strictly speaking, we may not declare that the concurrent validity was determined because the test on da Vinci<sup>®</sup> box trainer is not actually the “gold standard” to assess robotic bed-assistance skills. Both modalities (XTT and da Vinci box trainer) potentially could become the standard, but XTT would be a preferable choice since performance was correlated between the two tests. As described by the subjects, the XTT platform presents specific advantages: better access, real-time feedback of performance, reproducibility of exercises, etc. These advantages have been widely documented in previous studies regarding laparoscopic and robotic virtual reality simulators [12,13]. The most mentioned disadvantage was the absence of force feedback, which is currently under development.

The exercise MB1 demonstrates good test-retest reliability. Performance was less stable in RWR and CRW – the two relatively simple exercises in which occasional errors may cause significant differences. Of course, the performance did not reach plateau within three attempts. Results could be better after the achievement of proficiency. The task completion time and the instrument collisions proved to be the most reliable metrics in these exercises. The overall score may not be quite stable since it is calculated in two different ways depending on the existence or not of critical errors.

During robotic surgery, the bedside assistant is directly responsible for the security of patients, especially in case of accidents. Moreover, an experienced assistant could help to optimize workflow, reduce operative time, and improve surgical outcomes. Currently, few institutes possess specialized or permanent bedside assistants. In many cases, it is the residents or fellows who fill the vacancy. The time as bed-assistant is believed to be an essential period during the training of robotic surgeons [14,15]. The training of bed-assistants is often informal and inadequate, and the standards of credentialing are absent. Some robotic surgery curricula also take responsibility to train assistants, from docking to practice in animal procedures. However, as mentioned above, the access to wet-lab training is limited with considerable costs. The introduction of XTT provides a relatively compact and accessible platform that would facilitate the training and assessment of robotic surgical bed-assistance skills.

We did not investigate the opinions of console surgeons in this study since a same operator should be on dVT. This may be a limitation of the study. Only three XTT exercises were tested due to the workload. Other studies covering more exercises are expected. The relatively small sample size with limited statistical power is another shortcoming. In addition, predictive validity should be determined to prove the translation of virtual reality experience into clinical benefits.

## **Conclusions**

XTT is the first model of simulator in the world that emphasizes the teamwork training in surgery. This innovation may change the paradigm of robotic surgery training in the near future. As an assessment tool of bed-assistance skills, XTT proves good face and content validity. However, the training modules remain to be developed, and more complex and discriminative exercises are needed. Other studies will be needed to further determine construct and concurrent validity in the future. For the three team exercises, RWR demonstrates a best face and content validity, but it is too simple with relatively poor construct validity. MB1 proves to be more discriminative and reliable. The task completion time is a reliable measure that could correctly reflect the performance.

## References

- [1] Intuitive Surgical - Investors - Investor Relations Home n.d. <http://investor.intuitivesurgical.com/phoenix.zhtml?c=122359&p=irol-irhome> (accessed May 13, 2015).
- [2] Autorino R, Zargar H, Kaouk JH. Robotic-assisted laparoscopic surgery: recent advances in urology. *Fertil Steril* 2014;102:939–49. doi:10.1016/j.fertnstert.2014.05.033.
- [3] Diana M, Marescaux J. Robotic surgery. *Br J Surg* 2015;102:e15–28. doi:10.1002/bjs.9711.
- [4] Fisher RA, Dasgupta P, Mottrie A, et al. An over-view of robot assisted surgery curricula and the status of their validation. *Int J Surg* 2015;13:115–23. doi:10.1016/j.ijssu.2014.11.033.
- [5] Buchs NC, Pugin F, Volonté F, Morel P. Learning Tools and Simulation in Robotic Surgery: State of the Art. *World J Surg* 2013;37:2812–9. doi:10.1007/s00268-013-2065-y.
- [6] Smith R, Truong M, Perez M. Comparative analysis of the functionality of simulators of the da Vinci surgical robot. *Surg Endosc* 2014:1–12. doi:10.1007/s00464-014-3748-7.
- [7] Sheridan C, Bach C, Koupparis A. How to train your surgeon! Experience of a patient side assistant. *Arab J Urol* 2014;12:62–3. doi:10.1016/j.aju.2013.08.015.
- [8] Sgarbura O, Vasilescu C. The decisive role of the patient-side surgeon in robotic surgery. *Surg Endosc* 2010;24:3149–55. doi:10.1007/s00464-010-1108-9.
- [9] Xu S, Perez M, Yang K, Perrenot C, Felblinger J, Hubert J. Determination of the latency effects on surgical performance and the acceptable latency levels in telesurgery using the dV-Trainer® simulator. *Surg Endosc* 2014; 28(9): 2569–76.
- [10] Fraser SA, Klassen DR, Feldman LS, Ghitulescu GA, Stanbridge D, Fried GM. Evaluating laparoscopic skills. *Surg Endosc Interv Tech* 2003;17:964–7. doi:10.1007/s00464-002-8828-4.
- [11] Guzzo TJ, Gonzalvo ML. Robotic surgical training of the urologic oncologist. *Urol Oncol Semin Orig Investig* 2009;27:214–7. doi:10.1016/j.urolonc.2008.09.019.
- [12] Nagendran M, Gurusamy KS, Aggarwal R, Loizidou M, Davidson BR. Virtual reality training for surgical trainees in laparoscopic surgery. *Cochrane Database Syst Rev* 2013;8:CD006575. doi:10.1002/14651858.CD006575.pub3.

- [13] Abboudi H, Khan MS, Aboumarzouk O, et al. Current status of validation for robotic surgery simulators—a systematic review. *BJU Int* 2012.
- [14] Lee JY, Mucksavage P, Sundaram CP, McDougall EM. Best Practices for Robotic Surgery Training and Credentialing. *J Urol* 2011;185:1191–7. doi:10.1016/j.juro.2010.11.067.
- [15] Ahmed K, Khan R, Mottrie A, et al. Development Of A Standardised Training Curriculum For Robotic Surgery: A Consensus Statement From An International Multidisciplinary Group Of Experts. *BJU Int* 2014:n/a – n/a. doi:10.1111/bju.12974.

**Table 1** Modified GOALS

	1	2	3	4	5
<b>Depth perception</b>	Constantly overshooting target, hits backstop, wide swings, slow to correct		Some overshooting or missing plane but corrects quickly		Accurately directs instruments in correct plane to target
<b>Bimanual dexterity (in MB1)</b>	Always trying to use one hand, ignoring the other hand		Use of both hands but giving priority to one hand		Expertly utilizes both hands
<b>Efficiency</b>	Much wasted effort, many tentative motions, persisting at a task without progress		Slow, but able to complete the tasks with reasonable efforts		Confident, efficient and safe conduct of the tasks
<b>Tissue handling</b>	Rough, tears tissue by excessive traction, injures adjacent structures, grasper frequently slip off		Handles tissues reasonably well, with some minor trauma to adjacent tissues, occasional slipping of grasper		Handles tissues very well with appropriate traction on tissues and negligible injury of adjacent structures.
<b>Assistance effects</b>	Unable to assist effectively, frequently makes troubles. The operator has to make additional efforts to cooperate with him/her		Able to provide effective assistance, does not make troubles to the console operator		Intelligently and appropriately provides assistance, facilitating the manipulation of the console operator

### **II.2.3 - Résultats principaux et conclusions**

Trente sujets ont été recrutés pour les expérimentations. Vingt-huit personnes ont réalisé la session XTT et 19 d'entre eux ont réalisé la session da Vinci. Plus de 68 % des sujets ont considéré que les exercices et la majorité des fonctions du XTT étaient réalistes. Plus de 78 % des sujets ont considéré que le XTT est intéressant pour la formation des assistants en chirurgie robotique. La performance des assistants robotiques et des chirurgiens laparoscopiques étaient meilleures que celle des novices dans tous les exercices. Cependant, les assistants ont mieux joué que les chirurgiens laparoscopiques dans un seul exercice. La corrélation de la performance entre les deux tests (sur XTT et sur da Vinci) a été déterminée.

Le XTT a démontré une bonne validité apparente et de contenu. En tandem avec le dVT, il fournit une plateforme valable pour la formation en équipe et pour l'entraînement des assistants en chirurgie robotique. Cependant, le système doit être amélioré, et des exercices plus complexes et discriminants sont nécessaires. D'autres études seront nécessaires pour déterminer la validité de construit et concurrente à l'avenir. Pour les trois exercices de test, le RWR démontre une meilleure validité apparente et de contenu, mais il est trop simple avec une validité de construit relativement faible. Le MB1 est plus discriminant et fiable. Le TRT est une bonne mesure pour correctement refléter la performance.

## III - Etudes comme coauteur

### III.1 - Etude comme deuxième auteur

Article soumis à la revue « *IJCARS* »

---

#### **Impact of delay on telesurgical performance: Study on the dV-Trainer robotic simulator**

---

Manuela Perez, Song Xu, Sanket Chauhan, Alyssa Tanaka, Khara Simpson, Haidar Abdul-Muhsin, Roger Smith

#### **Abstract**

**Objectives:** The study evaluates the impact of different latency levels on robotic surgical performances.

**Methods:** Thirty-seven surgeons were enrolled to perform four exercises on a robotic simulator first without delay (Base) and then with a randomly assigned delay ranging from 100 to 1,000 ms (Warm-up - Test).

**Results:** In latency stages, task completion time increased gradually as latency increased. Performances improved from the warm-up to the test period. The task completion time deteriorated from Base to latency stages at delays  $\geq 300$  ms, and the error rate started to increase at 500 ms ( $p < 0.05$ ). Few tasks were completed with a delay higher than 700 ms.

**Conclusions:** The gradually increasing latency has a growing impact on performances. The deterioration of performance starts at 300ms. Delays higher than 700 ms are difficult to manage especially in complex tasks. Surgeons had the potentials to adapt to delay and may be trained to improve telesurgical performance.

## III.2 - Etude comme troisième auteur

Article soumis à la revue « *Journal of the Society for Simulation in Healthcare* »

---

### Face and content validity of Xperience™ Team Trainer: bed-side assistant training simulator for robotic surgery

---

Lucas Sessa, Cyril Perrenot, Song Xu, Jacques Hubert, Laurent Bresler, Laurent Brunaud, Manuela Perez

#### Abstract

**Purpose:** In robotic surgery the cohesion between console-side surgeon and bed-side assistant is crucial. Xperience™ Team Trainer (XTT) is a new optional component for the dv-Trainer® platform and simulates the patient-side working environment. We present preliminary results for face, content, and workload imposed regarding the use of the XTT virtual reality platform for the psychomotor and communication skills training of the bed-side assistant in robot-assisted surgery.

**Methods:** Participants were categorized into “Beginners” and “Experts”. They tested a series of exercises (Pick & Place Laparoscopic Demo, Pick & Place 2 and Team Match Board 1) and completed face validity questionnaires. “Experts” assessed content validity on another questionnaire. All participants completed a NASA Task Load Index questionnaire to assess work-load imposed by XTT.

**Results:** Twenty-one consenting participants were included (12 “Beginners” and 9 “Experts”). XTT was shown to possess face and content validity as evidenced by the rankings given on the simulator’s ease of use and realism parameters and on the simulator’s usefulness for training. Eight out of nine “Experts” judged useful the visualization of metrics after the exercises. However, face validity has shown some weaknesses regarding interactions and instruments. Reasonable work-load parameters were registered.

**Conclusions:** XTT demonstrated excellent face and content validity with acceptable workload parameters. XTT could become a useful tool for robotic-surgery team training.

## **PARTIE 3 : CONCLUSIONS**

---

*Dans cette partie, nous tiendrons des conclusions pour toutes les études et développerons des perspectives*

## Conclusions

Concernant le sujet se rapportant à la téléchirurgie, nous pouvons tirer plusieurs conclusions :

Le délai de transmission des informations entre le mouvement de la main du chirurgien et le retour des images peut altérer les performances chirurgicales. L'efficacité et la sécurité de la performance se détériorent progressivement lorsque le délai augmente. Un délai de moins de 200 ms a un impact mineur sur la manipulation des instruments. Cet impact augmente progressivement (de moyen à important) de 300 à 700 ms, et finalement devient très important pour un délai plus de 800 ms. Cependant, cet impact sur la manipulation ne se transforme pas automatiquement en une dégradation des performances, ce dernier dépend aussi de la complexité des procédures et des capacités innées des chirurgiens. Plus une procédure sera complexe, plus l'impact du délai sur la performance sera important ; un chirurgien patient et attentif présente un meilleur potentiel pour s'adapter au délai. En gros, le TRT et le mouvement des instruments augmentent inévitablement avec un délai croissant, mais les erreurs peuvent rester stables dans une certaine mesure. Le ralentissement du mouvement et la stratégie déplacement-et-attente sont utiles pour surmonter le délai dans un environnement expérimental, mais la réactivité souvent nécessaire en chirurgie rendrait ces stratégies moins valables et parfois irréalisables surtout en cas d'accident inattendu (problème hémorragie par exemple). Ainsi donc il semble préférable d'envisager un geste de téléchirurgie associé à un délai inférieur à 200 ms. Un délai de 300 ms reste adapté ; 400 à 500 ms peuvent être acceptables mais génèrent déjà une certaine fatigue ; 600 à 700 ms doivent se limiter, aux cas obligatoires, pour des procédures simples et de risque faible ; des délais plus de 800 ms ne sont pas adaptés à la téléchirurgie; le télémentoring peut être une option dans ce cas.

Les chirurgiens ont la capacité de s'adapter au délai et la formation au délai est efficace pour améliorer les performances téléchirurgicales. Cet effet dure dans le temps et plus le délai est élevé (dont l'impact plus important) plus significatif sera l'effet de la formation. La formation au délai pour une tâche simple pourrait améliorer les résultats pour les procédures plus complexes, ce qui signifie que l'entraînement dans un environnement hors bloc opératoire pourrait améliorer les performances des chirurgiens pendant la procédure téléchirurgicale. Cependant, les opérateurs doivent éviter l'inattention due à un excès de

confiance provenant de la formation. Une attention et une concentration sont indispensables pendant une tâche sous délai.

Pour le sujet concernant la formation en chirurgie robotique, notre but était de trouver un moyen pratique et efficace avec un bon rapport temps/coût-efficacité pour enseigner les techniques de chirurgie robotique. La simulation en RV s'approche au mieux de ce but.

Par le développement d'un curriculum dédié pour la procédure de PLRA, nous avons proposé une méthode en utilisant les exercices de base de RV pour apprendre les techniques de la procédure robotique. Des curriculums similaires peuvent être établis pour d'autres procédures de spécialités variables, et ceci devrait réduire l'exigence de la formation sur animaux ou cadavres plus coûteuse, et aussi maximiser l'effet l'utilisation des simulateurs robotiques.

Le XTT en tandem avec le dVT est valable pour la formation du travail en équipe entre les chirurgiens robotiques et leurs assistants. Il est aussi intéressant pour la formation des techniques d'assistance en chirurgie robotique. Nous avons déterminé la validité apparente et de contenu de ce système, mais d'autres études seront nécessaires pour prouver la validité de construit et concurrente.

## Perspectives

La téléchirurgie en est encore à ses débuts avec un potentiel de développement imprévisible, et beaucoup de questions, surtout techniques mais également non-techniques, restent à résoudre avant sa mise en œuvre sur une plus grande échelle.

Nous avons déterminé l'impact du délai dans un contexte de simulation en RV et obtenu des résultats fiables, pourtant des études sur la plate-forme du vrai robot et idéalement sur le modèle vivant seraient nécessaires pour mieux clarifier cette question. En effet, en dépit de la similitude, la simulation en RV ne reproduit pas parfaitement la réalité en ce qui concerne la limite de l'espace de travail, le comportement des instruments et des tissus, et également la complexité de l'environnement. Les chirurgiens subissent plus de stress en réalité en considérant l'impératif de qualité des résultats et le risque d'échec ou d'accident, et dans certains cas le rythme de chirurgie qui ne permet pas un ralentissement excessif du mouvement. En plus, les chirurgiens doivent coopérer et communiquer avec les assistants au lieu de travailler seuls. Tout cela pourrait avoir une influence sur l'impact du délai et devrait être évalué dans un scénario clinique simulé. En outre, contrairement à notre étude où le délai était fixé à certains niveaux, les téléchirurgiens sont confrontés au délai fluctuant avec la gigue qui peut être plus difficile à maîtriser. L'effet de la gigue devrait aussi être évalué lors d'études futures.

La formation au délai peut être une méthode efficace pour aider les chirurgiens à s'adapter au retard. Des résultats initiaux ont été obtenus dans notre étude qui montrent l'efficacité de la formation. Cependant, ce n'est qu'une étude préliminaire avec un nombre limité de sujets et une formation courte. Des études plus structurées sont nécessaires pour déterminer la courbe d'apprentissage pour des exercices plus complexes, et évaluer si la formation au délai améliorerait la performance téléchirurgicale et finalement les résultats de la chirurgie. Aussi la méthode de formation, comme le niveau de délai, la façon de s'organiser, les exercices, la durée ainsi que l'évaluation de performance, restent à explorer. À l'exception de la formation au délai, des efforts devraient aussi être consacrés à la recherche des supports techniques afin de renforcer la capacité des chirurgiens lors de la téléchirurgie. La prévision du résultat d'un mouvement est un bon exemple dans ce domaine.

Le standard de la formation et de l'évaluation des techniques de chirurgie robotique est encore dans le processus de développement et pourrait ne pas être disponible avant plusieurs

années. La simulation en RV est un moyen pratique et efficace de formation dehors du bloc opératoire, mais son utilisation est limitée à des grands centres et aussi à la formation aux techniques de base. D'une part, les simulateurs commerciaux sont coûteux, et d'autre part, ils fournissent peu d'exercices de procédure pour s'entraîner. Pour l'instant, la chirurgie robotique et même sa formation sont plutôt un luxe qui se limite aux pays développés. Le prix de 2, 000,000 \$ pour le robot da Vinci® et de 100,000 \$ pour un simulateur les rendent trop coûteux pour beaucoup d'établissements. Cependant, la situation va changer avec la probable apparition des nouveaux systèmes de robot économiques dans le marché.

En tant qu'outil de formation préclinique, le simulateur devrait également voir son prix réduit pour permettre une application plus étendue. Les systèmes actuels de simulateur robotique sont déjà capables de simuler une variété d'exercices avec un grand degré de réalisme, mais ces exercices sont souvent relativement simples. Plus d'exercices complexes ou de procédure sont nécessaires pour répondre à l'exigence de la clinique. Techniquement, ça ne sera pas facile à développer, et surtout la simulation parfaite de l'environnement du champ opératoire ne sera pas réalisable à court-terme, mais les progrès de la technologie sont effectivement rapides et impressionnants dans le domaine des jeux vidéo et laissent augurer de ce qui sera possible en simulation chirurgicale.

Comment mieux utiliser les simulateurs robotiques et comment les intégrer dans un curriculum de chirurgie robotique est une question à laquelle les chercheurs et les éducateurs devront réfléchir. Nous avons proposé un curriculum de RV dédié pour une procédure robotique, des curriculums similaires peuvent être établis pour d'autres procédures ; mais des études de validation seront nécessaires pour déterminer les avantages éducatifs de ce genre de curriculum et leur validité prédictive.

La chirurgie robotique, la téléchirurgie et la simulation en RV présentent toutes un potentiel de développement excitant, et elles vont sûrement changer l'environnement médical du futur. Corrélativement, beaucoup de problèmes restent à résoudre et beaucoup de questions restent à étudier par des chercheurs, des ingénieurs, des éducateurs et des organisateurs. Les perspectives de développement sont à l'infinies, ainsi que les thèmes de recherche.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Popescu M-COS, Mastorakis NE. Simulation of da Vinci Surgical Robot Using Mobotsim Program. *Int J Biol Biomed Eng* 2008;137–46.
- [2] Yates DR, Vaessen C, Roupret M. From Leonardo to da Vinci: the history of robot-assisted surgery in urology. *BJU Int* 2011;108:1708–13. doi:10.1111/j.1464-410X.2011.10576.x.
- [3] Anderson SL. Asimov's "three laws of robotics" and machine metaethics. *AI Soc* 2007;22:477–93. doi:10.1007/s00146-007-0094-5.
- [4] Gibilisco S, Gonilisco S. McGraw-Hill Illustrated Encyclopedia of Robotics and Artificial Intelligence. New York, NY, USA: McGraw-Hill, Inc.; 1994.
- [5] Vertut J, Coiffet P. Teleoperation and Robotics: Evolution and Development. Lond Hermes Publ 1985.
- [6] Garcia E, Jimenez MA, De Santos PG, Armada M. The evolution of robotics research. *IEEE Robot Autom Mag* 2007;14:90–103. doi:10.1109/MRA.2007.339608.
- [7] Day B, McEwen J, Auchinlek G, McGraw RW. Arthrobot—the world's first surgical robot. *Int Arthrosc Assoc* 1987.
- [8] Rizun PR, McBeth PB, Louw DF, Sutherland GR. Robot-Assisted Neurosurgery. *Surg Innov* 2004;11:99–106. doi:10.1177/107155170401100206.
- [9] Davies B. A review of robotics in surgery. *Proc Inst Mech Eng [H]* 2000;214:129–40.
- [10] Harris SJ, Arambula-Cosio F, Mei Q, Hibberd RD, Davies BL, Wickham JEA, et al. The Probot—an active robot for prostate resection. *Proc Inst Mech Eng [H]* 1997;211:317–25. doi:10.1243/0954411971534449.
- [11] Cowley G. Introducing "Robodoc". A robot finds his calling--in the operating room. *Newsweek* 1992;120:86.
- [12] Honl M, Dierk O, Gauck C, Carrero V, Lampe F, Dries S, et al. Comparison of robotic-assisted and manual implantation of a primary total hip replacement. A prospective study. *J Bone Joint Surg Am* 2003;85-A:1470–8.
- [13] Nishihara S, Sugano N, Nishii T, Tanaka H, Nakamura N, Yoshikawa H, et al. Clinical accuracy evaluation of femoral canal preparation using the ROBODOC system. *J Orthop Sci Off J Jpn Orthop Assoc* 2004;9:452–61. doi:10.1007/s00776-004-0804-5.
- [14] Zipper SG, Püschmann H. [Nerve injuries after computer-assisted hip replacement: case series with 29 patients]. *Z Für Orthop Ihre Grenzgeb* 2005;143:399–402. doi:10.1055/s-2005-836749.
- [15] Swanstrom LL, Soper NJ. *Mastery Endosc. Laparosc. Surg.*, 2013.
- [16] Litynski GS. Endoscopic Surgery: The History, the Pioneers. *World J Surg* 2014;23:745–53. doi:10.1007/s002689900576.
- [17] Gagner M, Rogula T, Selzer D. Laparoscopic liver resection: benefits and controversies. *Surg Clin North Am* 2004;84:451–62. doi:10.1016/j.suc.2003.11.002.
- [18] Fuchs KH. Minimally invasive surgery. *Endoscopy* 2002;34:154–9. doi:10.1055/s-2002-19857.
- [19] Lanfranco AR, Castellanos AE, Desai JP, Meyers WC. Robotic Surgery: A Current Perspective. *Ann Surg* 2004;239:14–21. doi:10.1097/01.sla.0000103020.19595.7d.
- [20] Abboudi H, Khan MS, Guru KA, Froghi S, de Win G, Van Poppel H, et al. Learning curves for urological procedures: a systematic review. *BJU Int* 2014;114:617–29. doi:10.1111/bju.12315.
- [21] Sterbis JR, Hanly EJ, Herman BC, Marohn MR, Broderick TJ, Shih SP, et al. Transcontinental telesurgical nephrectomy using the da Vinci robot in a porcine model. *Urology* 2008;71:971–3.

- [22] Satava RM. Robotic surgery: from past to future—a personal journey. *Robot Surg* 2003;83:1491–500. doi:10.1016/S0039-6109(03)00168-3.
- [23] Satava RM. Surgical robotics: the early chronicles: a personal historical perspective. *Surg Laparosc Endosc Percutan Tech* 2002;12:6–16.
- [24] Pugin F, Bucher P, Morel P. History of robotic surgery : From AESOP® and ZEUS® to da Vinci®. *J Visc Surg* 2011;148:e3–8. doi:10.1016/j.jviscsurg.2011.04.007.
- [25] Gourin CG, Terris DJ. Surgical robotics in otolaryngology: expanding the technology envelope. *Curr Opin Otolaryngol Head Neck Surg* 2004;12:204–8.
- [26] Sackier JM, Wooters C, Jacobs L, Halverson A, Uecker D, Wang Y. Voice activation of a surgical robotic assistant. *Am J Surg* 1997;174:406–9. doi:10.1016/S0002-9610(97)00128-1.
- [27] Allaf ME, Jackman SV, Schulam PG, Cadeddu JA, Lee BR, Moore RG, et al. Laparoscopic visual field. Voice vs foot pedal interfaces for control of the AESOP robot. *Surg Endosc* 1998;12:1415–8.
- [28] Kalan S, Chauhan S, Coelho RF, Orvieto MA, Camacho IR, Palmer KJ, et al. History of robotic surgery. *J Robot Surg* 2010;4:141–7. doi:10.1007/s11701-010-0202-2.
- [29] Haidegger T, Sándor J, Benyó Z. Surgery in space: the future of robotic telesurgery. *Surg Endosc* 2010;25:681–90. doi:10.1007/s00464-010-1243-3.
- [30] Oleynikov D. Robotic surgery. *Surg Clin North Am* 2008;88:1121–30, viii. doi:10.1016/j.suc.2008.05.012.
- [31] Hockstein NG, Gourin CG, Faust RA, Terris DJ. A history of robots: from science fiction to surgical robotics. *J Robot Surg* 2007;1:113–8. doi:10.1007/s11701-007-0021-2.
- [32] Intuitive Surgical - Investors - Investor Relations Home n.d. <http://investor.intuitivesurgical.com/phoenix.zhtml?c=122359&p=irol-irhome> (accessed April 30, 2015).
- [33] Marescaux J. State of the art of surgery: robotic surgery and telesurgery. *Cir Cir* 2013;81:247–50.
- [34] Beasley RA. Medical Robots: Current Systems and Research Directions. *J Robot* 2012;2012:e401613. doi:10.1155/2012/401613.
- [35] Stark M, Benhidjeb T, Gidaro S, Morales E. The future of telesurgery: a universal system with haptic sensation. *J Turk-Ger Gynecol Assoc* 2012;13:74–6.
- [36] Intuitive Surgical - da Vinci Surgical System Xi n.d. <http://intuitivesurgical.com/products/da-vinci-xi/> (accessed April 30, 2015).
- [37] Palep JH. Robotic assisted minimally invasive surgery. *J Minimal Access Surg* 2009;5:1–7. doi:10.4103/0972-9941.51313.
- [38] Reynolds RK, Burke WM, Advincula AP. Preliminary Experience With Robot-Assisted Laparoscopic Staging of Gynecologic Malignancies. *JSL* 2005;9:149–58.
- [39] Camarillo DB, Krummel TM, Salisbury Jr. JK. Robotic technology in surgery: Past, present, and future. *Am J Surg* 2004;188:2–15. doi:10.1016/j.amjsurg.2004.08.025.
- [40] Schneeberger EW, Michler RE. An Overview of the Intuitive System: The Surgeon's Perspective. *Oper Tech Thorac Cardiovasc Surg* 2001;6:170–6. doi:10.1053/otct.2001.26962.
- [41] Okamura AM. Methods for haptic feedback in teleoperated robot-assisted surgery. *Ind Robot* 2004;31:499–508. doi:10.1108/01439910410566362.
- [42] Intuitive Surgical - da Vinci Surgical System Si n.d. [http://www.intuitivesurgical.com/products/davinci\\_surgical\\_system/davinci\\_surgical\\_system\\_si/dualconsole.html](http://www.intuitivesurgical.com/products/davinci_surgical_system/davinci_surgical_system_si/dualconsole.html) (accessed April 30, 2015).
- [43] A A, A LQ, Jv J, E B, Hr P. Robotic laparoscopic surgery: cost and training. *Minerva Urol E Nefrol Ital J Urol Nephrol* 2009;61:121–8.

- [44] Santoro E, Pansadoro V. Robotic surgery in Italy national survey (2011). *Updat Surg* 2013;65:1–9. doi:10.1007/s13304-012-0190-z.
- [45] Ballantyne GH. Robotic surgery, telerobotic surgery, telepresence, and telementoring. *Surg Endosc* 2002;16:1389–402. doi:10.1007/s00464-001-8283-7.
- [46] Mendivil A, Holloway RW, Boggess JF. Emergence of robotic assisted surgery in gynecologic oncology: American perspective. *Gynecol Oncol* 2009;114:S24–31. doi:10.1016/j.ygyno.2009.02.002.
- [47] Loulmet D, Carpentier A, d' Attellis N, Berrebi A, Cardon C, Ponzio O, et al. Endoscopic coronary artery bypass grafting with the aid of robotic assisted instruments. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1999;118:4–10.
- [48] Department of Surgery, The University of Hong Kong, Queen Mary Hospital, Pokfulam, Hong Kong, Ng AT, Tam P. Current status of robot-assisted surgery. *Hong Kong Med J* 2014. doi:10.12809/hkmj134167.
- [49] Cerfolio RJ, Bryant AS, Skylizard L, Minnich DJ. Initial consecutive experience of completely portal robotic pulmonary resection with 4 arms. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2011;142:740–6. doi:10.1016/j.jtcvs.2011.07.022.
- [50] Skarecky DW. Robotic-Assisted Radical Prostatectomy after the First Decade: Surgical Evolution or New Paradigm. *Int Sch Res Not* 2013;2013:e157379. doi:10.1155/2013/157379.
- [51] Benway BM, Bhayani SB, Rogers CG, Dulabon LM, Patel MN, Lipkin M, et al. Robot assisted partial nephrectomy versus laparoscopic partial nephrectomy for renal tumors: a multi-institutional analysis of perioperative outcomes. *J Urol* 2009;182:866–72. doi:10.1016/j.juro.2009.05.037.
- [52] Dasgupta P, Rimington P, Murphy D, Elhage O, Challacombe B, Khan MS. Robotically assisted radical cystectomy. *BJU Int* 2008;101:1489–90. doi:10.1111/j.1464-410X.2008.07564.x.
- [53] Giri S, Sarkar DK. Current status of robotic surgery. *Indian J Surg* 2012;74:242–7. doi:10.1007/s12262-012-0595-4.
- [54] Liu H, Lu D, Wang L, Shi G, Song H, Clarke J. Robotic surgery for benign gynaecological disease. *Cochrane Database Syst. Rev.*, John Wiley & Sons, Ltd; 2012.
- [55] Delaney CP, Lynch AC, Senagore AJ, Fazio VW. Comparison of robotically performed and traditional laparoscopic colorectal surgery. *Dis Colon Rectum* 2003;46:1633–9. doi:10.1097/01.DCR.0000098941.42470.D9.
- [56] deSouza AL, Prasad LM, Park JJ, Marecik SJ, Blumetti J, Abcarian H. Robotic assistance in right hemicolectomy: is there a role? *Dis Colon Rectum* 2010;53:1000–6. doi:10.1007/DCR.0b013e3181d32096.
- [57] Baik SH, Ko YT, Kang CM, Lee WJ, Kim NK, Sohn SK, et al. Robotic tumor-specific mesorectal excision of rectal cancer: short-term outcome of a pilot randomized trial. *Surg Endosc* 2008;22:1601–8. doi:10.1007/s00464-008-9752-z.
- [58] Kim JY, Kim N-K, Lee KY, Hur H, Min BS, Kim JH. A comparative study of voiding and sexual function after total mesorectal excision with autonomic nerve preservation for rectal cancer: laparoscopic versus robotic surgery. *Ann Surg Oncol* 2012;19:2485–93. doi:10.1245/s10434-012-2262-1.
- [59] Kim WW, Jung JH, Park HY. A single surgeon's experience and surgical outcomes of 300 robotic thyroid surgeries using a bilateral axillo-breast approach. *J Surg Oncol* 2015;111:135–40. doi:10.1002/jso.23793.
- [60] Lee J, Yun JH, Choi UJ, Kang S-W, Jeong JJ, Chung WY. Robotic versus Endoscopic Thyroidectomy for Thyroid Cancers: A Multi-Institutional Analysis of Early Postoperative Outcomes and Surgical Learning Curves. *J Oncol* 2012;2012:734541. doi:10.1155/2012/734541.

- [61] O'Malley BW, Weinstein GS, Snyder W, Hockstein NG. Transoral robotic surgery (TORS) for base of tongue neoplasms. *The Laryngoscope* 2006;116:1465–72. doi:10.1097/01.mlg.0000227184.90514.1a.
- [62] Diana M, Marescaux J. Robotic surgery. *Br J Surg* 2015;102:e15–28. doi:10.1002/bjs.9711.
- [63] Andonian S, Okeke Z, Okeke DA, Rastinehad A, Vanderbrink BA, Richstone L, et al. Device failures associated with patient injuries during robot-assisted laparoscopic surgeries: a comprehensive review of FDA MAUDE database. *Can J Urol* 2008;15:3912–6.
- [64] Lucas SM, Pattison EA, Sundaram CP. Global robotic experience and the type of surgical system impact the types of robotic malfunctions and their clinical consequences: an FDA MAUDE review. *BJU Int* 2012;109:1222–7. doi:10.1111/j.1464-410X.2011.10692.x.
- [65] Friedman DCW, Lendvay TS, Hannaford B. Instrument Failures for the da Vinci Surgical System: a Food and Drug Administration MAUDE Database Study. *Surg Endosc* 2012;27:1503–8. doi:10.1007/s00464-012-2659-8.
- [66] McLean T. The complexity of litigation associated with robotic surgery and cybersurgery. *Int J Med Robot* 2007;3:23–9. doi:10.1002/rcs.121.
- [67] Lee YL, Kilic GS, Phelps JY. Medicolegal review of liability risks for gynecologists stemming from lack of training in robot-assisted surgery. *J Minim Invasive Gynecol* 2011;18:512–5. doi:10.1016/j.jmig.2011.04.002.
- [68] Lee YL, Kilic G, Phelps JY. Liability exposure for surgical robotics instructors. *J Minim Invasive Gynecol* 2012;19:376–9. doi:10.1016/j.jmig.2012.01.019.
- [69] Mavroforou A, Michalodimitrakis E, Hatzitheo-Filou C, Giannoukas A. Legal and ethical issues in robotic surgery. *Int Angiol J Int Union Angiol* 2010;29:75–9.
- [70] Osborne MP. William Stewart Halsted: his life and contributions to surgery. *Lancet Oncol* 2007;8:256–65. doi:10.1016/S1470-2045(07)70076-1.
- [71] Hubert J, Perrenot C, Trand N, Felblingere J, Perez M. Simulation chirurgicale (dv-trainer®) et formation chirurgicale robotique. *E-Mém Académie Natl Chir* 2012;11:080–4.
- [72] Guzzo TJ, Gonzalgo ML. Robotic surgical training of the urologic oncologist. *Urol Oncol Semin Orig Investig* 2009;27:214–7. doi:10.1016/j.urolonc.2008.09.019.
- [73] Bric J, Connolly M, Kastenmeier A, Goldblatt M, Gould JC. Proficiency training on a virtual reality robotic surgical skills curriculum. *Surg Endosc* 2014;1–6. doi:10.1007/s00464-014-3624-5.
- [74] Smith R, Patel V, Satava R. Fundamentals of robotic surgery: a course of basic robotic surgery skills based upon a 14-society consensus template of outcomes measures and curriculum development. *Int J Med Robot* 2014;10:379–84. doi:10.1002/rcs.1559.
- [75] Ahmed K, Khan R, Mottrie A, Lovegrove C, Abaza R, Ahlawat R, et al. Development Of A Standardised Training Curriculum For Robotic Surgery: A Consensus Statement From An International Multidisciplinary Group Of Experts. *BJU Int* 2014:n/a – n/a. doi:10.1111/bju.12974.
- [76] Abboudi H, Khan MS, Aboumarzouk O, Guru KA, Challacombe B, Dasgupta P, et al. Current status of validation for robotic surgery simulators—a systematic review. *BJU Int* 2012.
- [77] Lee JY, Mucksavage P, Sundaram CP, McDougall EM. Best Practices for Robotic Surgery Training and Credentialing. *J Urol* 2011;185:1191–7. doi:10.1016/j.juro.2010.11.067.

- [78] Schreuder H, Wolswijk R, Zweemer R, Schijven M, Verheijen R. Training and learning robotic surgery, time for a more structured approach: a systematic review. *BJOG Int J Obstet Gynaecol* 2012;119:137–49. doi:10.1111/j.1471-0528.2011.03139.x.
- [79] Hung A, Sun A, Aron M. Novel training methods for robotic surgery. *Indian J Urol* 2014;30:333. doi:10.4103/0970-1591.128506.
- [80] Altunrende F, Autorino R, Haber G-P, Laydner H, White MA, Khanna R, et al. Immediate impact of a robotic kidney surgery course on attendees practice patterns. *Int J Med Robot* 2011;7:165–9. doi:10.1002/rcs.384.
- [81] Buchs NC, Pugin F, Volonté F, Hagen ME, Morel P. Impact of robotic general surgery course on participants' surgical practice. *Surg Endosc* 2013;27:1968–72. doi:10.1007/s00464-012-2695-4.
- [82] Badani KK, Hemal AK, Peabody JO, Menon M. Robotic radical prostatectomy: the Vattikuti Urology Institute training experience. *World J Urol* 2006;24:148–51. doi:10.1007/s00345-006-0072-4.
- [83] Rashid HH, Leung Y-YM, Rashid MJ, Oleyourryk G, Valvo JR, Eichel L. Robotic surgical education: A systematic approach to training urology residents to perform robotic-assisted laparoscopic radical prostatectomy. *Urology* 2006;68:75–9. doi:10.1016/j.urology.2006.01.057.
- [84] American Urological Association n.d. <https://www.auanet.org/login/?refer=/university/search.cfm?byYear=undefined&CourseType=6&CourseTrack=&keyword=&language=&intl=> (accessed May 4, 2015).
- [85] Våpenstad C, Buzink SN. Procedural virtual reality simulation in minimally invasive surgery. *Surg Endosc* 2013;27:364–77. doi:10.1007/s00464-012-2503-1.
- [86] Nagendran M, Gurusamy KS, Aggarwal R, Loizidou M, Davidson BR. Virtual reality training for surgical trainees in laparoscopic surgery. *Cochrane Database Syst Rev* 2013;8:CD006575. doi:10.1002/14651858.CD006575.pub3.
- [87] Culligan P, Gurshumov E, Lewis C, Priestley J, Komar J, Salamon C. Predictive validity of a training protocol using a robotic surgery simulator. *Female Pelvic Med Reconstr Surg* 2014;20:48–51.
- [88] Foell K, Finelli A, Yasufuku K, Bernardini MQ, Waddell TK, Pace KT, et al. Robotic surgery basic skills training: Evaluation of a pilot multidisciplinary simulation-based curriculum. *Can Urol Assoc J* 2013;7. doi:10.5489/cuaj.222.
- [89] Raza SJ, Froghi S, Chowriappa A, Ahmed K, Field E, Stegemann AP, et al. Construct Validation of the Key Components of Fundamental Skills of Robotic Surgery (FSRS) Curriculum—A Multi-Institution Prospective Study. *J Surg Educ* 2014;71:316–24. doi:10.1016/j.jsurg.2013.10.006.
- [90] Perez M, Perrenot C, Tran N, Hossu G, Felblinger J, Hubert J. Prior experience in micro-surgery may improve the surgeon's performance in robotic surgical training. *Int J Med Robot Comput Assist Surg MRCAS* 2013;9:351–8. doi:10.1002/rcs.1499.
- [91] Arain NA, Dulan G, Hogg DC, Rege RV, Powers CE, Tesfay ST, et al. Comprehensive proficiency-based inanimate training for robotic surgery: reliability, feasibility, and educational benefit. *Surg Endosc* 2012;26:2740–5. doi:10.1007/s00464-012-2264-x.
- [92] Hung AJ, Ng CK, Patil MB, Zehnder P, Huang E, Aron M, et al. Validation of a novel robotic-assisted partial nephrectomy surgical training model. *BJU Int* 2012;110:870–4. doi:10.1111/j.1464-410X.2012.10953.x.
- [93] Marecik SJ, Prasad LM, Park JJ, Jan A, Chaudhry V. Evaluation of midlevel and upper-level residents performing their first robotic-sutured intestinal anastomosis. *Am J Surg* 2008;195:333–7; discussion 337–8. doi:10.1016/j.amjsurg.2007.12.013.
- [94] Mehrabi A, Yetimoglu CL, Nickkholgh A, Kashfi A, Kienle P, Konstantinides L, et al. Development and evaluation of a training module for the clinical introduction of the da

- Vinci robotic system in visceral and vascular surgery. *Surg Endosc* 2006;20:1376–82. doi:10.1007/s00464-005-0612-9.
- [95] Liss MA, McDougall EM. Robotic Surgical Simulation: *Cancer J* 2013;19:124–9. doi:10.1097/PPO.0b013e3182885d79.
- [96] Samadi D, Levinson A, Hakimi A, Shabsigh R, Benson MC. From proficiency to expert, when does the learning curve for robotic-assisted prostatectomies plateau? The Columbia University experience. *World J Urol* 2007;25:105–10. doi:10.1007/s00345-006-0137-4.
- [97] Schroeck FR, Palha de Sousa CA, Kalman RA, Kalia MS, Pierre SA, Haleblan GE, et al. Trainees Do Not Negatively Impact the Institutional Learning Curve for Robotic Prostatectomy as Characterized by Operative Time, Estimated Blood Loss, and Positive Surgical Margin Rate. *Urology* 2008;71:597–601. doi:10.1016/j.urology.2007.12.023.
- [98] Barrie J, Jayne DG, Wright J, Murray CJC, Collinson FJ, Pavitt SH. 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. *Ann Surg Oncol* 2013;21:829–40. doi:10.1245/s10434-013-3348-0.
- [99] Wolanski P, Chabert C, Jones L, Mullavey T, Walsh S, Gianduzzo T. Preliminary results of robot-assisted laparoscopic radical prostatectomy (RALP) after fellowship training and experience in laparoscopic radical prostatectomy (LRP). *BJU Int* 2012;110:64–70. doi:10.1111/j.1464-410X.2012.11479.x.
- [100] Ahlering TE, Skarecky D, Lee D, Clayman RV. Successful transfer of open surgical skills to a laparoscopic environment using a robotic interface: initial experience with laparoscopic radical prostatectomy. *J Urol* 2003;170:1738–41. doi:10.1097/01.ju.0000092881.24608.5e.
- [101] Ku JY, Ha HK. Learning Curve of Robot-Assisted Laparoscopic Radical Prostatectomy for a Single Experienced Surgeon: Comparison with Simultaneous Laparoscopic Radical Prostatectomy. *World J Mens Health* 2015;33:30–5. doi:10.5534/wjmh.2015.33.1.30.
- [102] Bach C, Miernik A, Schönthaler M. Training in robotics: The learning curve and contemporary concepts in training. *Arab J Urol* 2014;12:58–61. doi:10.1016/j.aju.2013.10.005.
- [103] Van Nortwick SS, Lendvay TS, Jensen AR, Wright AS, Horvath KD, Kim S. Methodologies for establishing validity in surgical simulation studies. *Surgery* 2010;147:622–30. doi:10.1016/j.surg.2009.10.068.
- [104] Mimic Simulation | dV-Trainer n.d. <http://www.mimicsimulation.com/products/dv-trainer/> (accessed May 4, 2015).
- [105] Intuitive Surgical - da Vinci Si Surgical System - Skills Simulator n.d. [http://www.intuitivesurgical.com/products/skills\\_simulator/](http://www.intuitivesurgical.com/products/skills_simulator/) (accessed May 4, 2015).
- [106] Simulated Surgical Systems - Robot-assisted surgical simulators n.d. <http://www.simulatedsurgical.com/> (accessed May 4, 2015).
- [107] SEP Products n.d. <http://www.simsurgery.com/sep-products.html> (accessed May 4, 2015).
- [108] RobotiX Mentor | Simbionix n.d. <http://symbionix.com/simulators/robotix-mentor/> (accessed May 4, 2015).
- [109] Smith R, Truong M, Perez M. Comparative analysis of the functionality of simulators of the da Vinci surgical robot. *Surg Endosc* 2014:1–12. doi:10.1007/s00464-014-3748-7.

- [110] Buchs NC, Pugin F, Volonté F, Morel P. Learning Tools and Simulation in Robotic Surgery: State of the Art. *World J Surg* 2013;37:2812–9. doi:10.1007/s00268-013-2065-y.
- [111] Xron · Surgical Simulator by ALTAIR Lab n.d. <http://metropolis.scienze.univr.it/xron/> (accessed June 30, 2014).
- [112] | University of Nebraska Omaha n.d. <http://www.unomaha.edu/college-of-education/biomechanics-core-facility/facilities/robotics-laboratory.php> (accessed May 4, 2015).
- [113] McDonough PS, Tausch TJ, Peterson AC, Brand TC. Initial validation of the ProMIS surgical simulator as an objective measure of robotic task performance. *J Robot Surg* 2011;5:195–9. doi:10.1007/s11701-011-0256-9.
- [114] Mimic Simulation | Training modules n.d. <http://www.mimicsimulation.com/products/dv-trainer/training-modules/> (accessed May 4, 2015).
- [115] Rosen J, Hannaford B, Satava RM. *Surgical Robotics: Systems Applications and Visions*. Springer; 2011.
- [116] Eadie LH, Seifalian AM, Davidson BR. Telemedicine in surgery. *Br J Surg* 2003;90:647–58. doi:10.1002/bjs.4168.
- [117] Anvari M, McKinley C, Stein H. Establishment of the World's First Telerobotic Remote Surgical Service. *Ann Surg* 2005;241:460–4. doi:10.1097/01.sla.0000154456.69815.ee.
- [118] Garcia P, Rosen J, Kapoor C, Noakes M, Elbert G, Treat M, et al. Trauma Pod: a semi-automated telerobotic surgical system. *Int J Med Robot* 2009;5:136–46. doi:10.1002/rcs.238.
- [119] Butner SE, Ghodoussi M. Transforming a surgical robot for human telesurgery. *Robot Autom IEEE Trans On* 2003;19:818–24.
- [120] Marescaux J, Leroy J, Gagner M, Rubino F, Mutter D, Vix M, et al. Transatlantic robot-assisted telesurgery. *Nature* 2001;413:379–80. doi:10.1038/35096636.
- [121] Anvari M. Remote telepresence surgery: the Canadian experience. *Surg Endosc* 2007;21:537–41. doi:10.1007/s00464-006-9040-8.
- [122] Rayman R, Croome K, Galbraith N, McClure R, Morady R, Peterson S, et al. Robotic telesurgery: a real-world comparison of ground- and satellite-based internet performance. *Int J Med Robot* 2007;3:111–6. doi:10.1002/rcs.133.
- [123] Nguan CY, Morady R, Wang C, Harrison D, Browning D, Rayman R, et al. Robotic pyeloplasty using internet protocol and satellite network-based telesurgery. *Int J Med Robot* 2008;4:10–4. doi:10.1002/rcs.173.
- [124] Nguan C, Miller B, Patel R, Luke PP, Schlachta CM. Pre-clinical remote telesurgery trial of a da Vinci telesurgery prototype. *Int J Med Robot* 2008;4:304–9. doi:10.1002/rcs.210.
- [125] Lum MJH, Friedman DCW, Sankaranarayanan G, King H, Fodero II K, Leuschke R, et al. The RAVEN Design and validation of a telesurgery system.pdf 2009.
- [126] Lum MJH, Rosen J, King H, Friedman DC, Donlin G, Sankaranarayanan G, et al. Telesurgery via unmanned aerial vehicle (UAV) with a field deployable surgical robot. *Stud Health Technol Inform* 2007;125:313–5.
- [127] Hannaford B, Rosen J, Friedman DW, King H, Roan P, Cheng L, et al. Raven-II: an open platform for surgical robotics research. *IEEE Trans Biomed Eng* 2013;60:954–9. doi:10.1109/TBME.2012.2228858.
- [128] Thirsk R, Williams D, Anvari M. NEEMO 7 undersea mission. *Acta Astronaut* 2007;60:512–7. doi:10.1016/j.actaastro.2006.09.015.

- [129] Doarn CR, Anvari M, Low T, Broderick TJ. Evaluation of teleoperated surgical robots in an enclosed undersea environment. *Telemed J E-Health Off J Am Telemed Assoc* 2009;15:325–35. doi:10.1089/tmj.2008.0123.
- [130] Arata J, Tanaka K, Tanaka K, Warisawa S, Hashizume M, Mitsuishi M. Remote Robotic Surgery System for a Laparoscopy. *Proc Jpn-USA Symp Flex Autom JUSFA 2004 JS020* 2004.
- [131] Arata J, Takahashi H, Pitakwatchara P, Warisawa S, Konishi K, Tanoue K, et al. A remote surgery experiment between Japan-Korea using the minimally invasive surgical system. *Proc. 2006 IEEE Int. Conf. Robot. Autom. 2006 ICRA 2006*, 2006, p. 257–62. doi:10.1109/ROBOT.2006.1641193.
- [132] Arata J, Takahashi H, Pitakwatchara P, Warisawa S, Tanoue K, Konishi K, et al. A remote surgery experiment between Japan and Thailand over Internet using a low latency CODEC system. *2007 IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, 2007, p. 953–9. doi:10.1109/ROBOT.2007.363108.
- [133] King HH, Hannaford B, Kwok K-W, Yang G-Z, Griffiths P, Okamura A, et al. Plugfest 2009: Global Interoperability in Telerobotics and Telemedicine. *IEEE Int Conf Robot Autom ICRA Proc IEEE Int Conf Robot Autom 2010*;2010:1733–8.
- [134] Choi J, Park JW, Kim DJ, Shin J, Park CY, Lee JC, et al. Lapabot: A compact telesurgical robot system for minimally invasive surgery: Part I. System description. *Minim Invasive Ther Allied Technol* 2012;21:188–94. doi:10.3109/13645706.2011.579979.
- [135] Park JW, Lee DH, Kim YW, Lee BH, Jo YH. Lapabot: A compact telesurgical robot system for minimally invasive surgery: Part II. Telesurgery evaluation. *Minim Invasive Ther Allied Technol* 2012;21:195–200. doi:10.3109/13645706.2011.579978.
- [136] Haidegger T, Kovács L, Precup R-E, Benyó B, Benyó Z, Preitl S. Simulation and control for telerobots in space medicine. *Acta Astronaut* 2012;81:390–402. doi:10.1016/j.actaastro.2012.06.010.
- [137] Haidegger T, Benyó Z. Extreme telesurgery 2010.
- [138] Saliba V, Legido-Quigley H, Hallik R, Aaviksoo A, Car J, McKee M. Telemedicine across borders: A systematic review of factors that hinder or support implementation. *Int J Med Inf* 2012;81:793–809. doi:10.1016/j.ijmedinf.2012.08.003.
- [139] Wootton R. Telemedicine support for the developing world. *J Telemed Telecare* 2008;14:109–14. doi:10.1258/jtt.2008.003001.
- [140] Thompson JM, Ottensmeyer MP, Sheridan TB. Human factors in telesurgery: effects of time delay and asynchrony in video and control feedback with local manipulative assistance. *Telemed J* 1999;5:129–37.
- [141] Fabrizio MD, Lee BR, Chan DY, Stoianovici D, Jarrett TW, Yang C, et al. Effect of time delay on surgical performance during telesurgical manipulation. *J Endourol Endourol Soc* 2000;14:133–8.
- [142] Kim T, Zimmerman PM, Wade MJ, Weiss CA. The effect of delayed visual feedback on telerobotic surgery. *Surg Endosc* 2005;19:683–6.
- [143] Anvari M, Broderick T, Stein H, Chapman T, Ghodoussi M, Birch DW, et al. The impact of latency on surgical precision and task completion during robotic-assisted remote telepresence surgery. *Comput Aided Surg Off J Int Soc Comput Aided Surg* 2005;10:93–9. doi:10.3109/10929080500228654.
- [144] Rayman R, Croome K, Galbraith N, McClure R, Morady R, Peterson S, et al. Long-distance robotic telesurgery: a feasibility study for care in remote environments. *Int J Med Robot* 2006;2:216–24. doi:10.1002/rcs.99.

- [145] Arata J, Takahashi H, Yasunaka S, Onda K, Tanaka K, Sugita N, et al. Impact of network time-delay and force feedback on tele-surgery. *Int J Comput Assist Radiol Surg* 2008;3:371–8. doi:10.1007/s11548-008-0228-3.
- [146] Lum MJH, Rosen J, Lendvay TS, Sinanan MN, Hannaford B. Effect of time delay on telesurgical performance. *Robot. Autom. 2009 ICRA09 IEEE Int. Conf. On, 2009*, p. 4246–52.
- [147] Kim YS, Ryu JH. Performance analysis of Teleoperation systems with different Haptic and Video time-delay. *ICCAS-SICE 2009, 2009*, p. 3371–5.
- [148] Minimizing Latency in Satellite Networks - Via Satellite n.d. <http://www.satellitetoday.com/telecom/2009/09/01/minimizing-latency-in-satellite-networks/> (accessed May 4, 2015).
- [149] Kadavasal MS, Oliver JH. Sensor Enhanced Virtual Reality Teleoperation in Dynamic Environment. *IEEE Virtual Real. Conf. 2007 VR 07, 2007*, p. 297–8. doi:10.1109/VR.2007.352510.
- [150] Rayman R, Primak S, Eagleson R. Effects of network delay on training for telesurgery. *1st Int. Conf. Wirel. Commun. Veh. Technol. Inf. Theory Aerosp. Electron. Syst. Technol. 2009 Wirel. VITAE 2009, 2009*, p. 63–7. doi:10.1109/WIRELESSVITAE.2009.5172424.

## LISTE DES PUBLICATIONS

**Xu S**, Perez M, Yang K, Perrenot C, Felblinger J, Hubert J. Determination of the latency effects on surgical performance and the acceptable latency levels in telesurgery using the dV-Trainer simulator. *Surg Endosc* 2014; 28(9): 2569-76.

**Xu S**, Perez M, Yang K, Perrenot C, Felblinger J, Hubert J. Effect of latency training on surgical performance in simulated robotic telesurgery procedures. *Int J Med Robot* 2014. doi: 10.1002/rcs.1623.

**Xu S**, Perez M, Hubert N, Hubert J. Development of a virtual reality-based curriculum for robot-assisted laparoscopic dismembered pyeloplasty. *BJU Int*. Soumis.

**Xu S**, Perez M, Perrenot C, Hubert J. Determination of the face, content, construct, and concurrent validity of the Xperience™ Team Trainer. En cours de rédaction.

Perez M, **Xu S**, Chauhan S, Tanaka A, Simpson K, Abdul-Muhsin H, Smith R. Impact of delay on telesurgical performance: Study on the dV-Trainer robotic simulator. *IJCARS*. Soumis.

Sessa L, Perrenot C, **Xu S**, Hubert J, Bresler L, Brunaud L, Perez M. Face and content validity of Xperience™ Team Trainer: bed-side assistant training simulator for robotic surgery. *Journal of the Society for Simulation in Healthcare*. Soumis.



## RESUME

L'objectif de notre travail était, d'une part, de déterminer l'impact du délai de transmission des informations en téléchirurgie robotique, et d'autre part, de valider le rôle du simulateur robotique dans la formation en chirurgie robotique.

Deux études ont été réalisées pour la partie concernant le délai. Il a été prouvé que la performance chirurgicale se détériore exponentiellement lorsque le délai augmente. Il est préférable d'envisager un geste de téléchirurgie associé à un délai inférieur à 200 ms, et des délais plus de 800 ms ne sont pas adaptés à la téléchirurgie. D'autre part, les chirurgiens ont démontré la capacité de s'adapter au délai par l'entraînement.

Dans la deuxième partie, nous avons développé un curriculum sur un simulateur robotique pour une procédure chirurgicale robotique d'urologie. Une autre étude a été réalisée pour déterminer la validité d'un nouveau simulateur robotique (le XTT) comme un outil d'évaluation des techniques d'assistance en chirurgie robotique.

**Mots clés :** chirurgie robotique ; téléchirurgie ; simulation robotique ; délai ; formation chirurgicale ; formation en équipe

## SUMMARY

The objectives of our work were, on the one hand, to determine the impact of data-transmission latency in robotic telesurgery, and on the other hand, to validate the role of robotic simulator in robotic surgery training.

Two studies were realized in the part concerning latency. It was proved that surgical performance deteriorates exponentially as latency increases. It is preferable to perform telesurgery with a delay less than 200 ms. The delay higher than 800 ms is not suitable for telesurgery. On the other hand, surgeons had demonstrated the capacity to adapt to delay through training.

In the second part, we developed a curriculum on a robotic simulator for a urologic surgical procedure. Another study was realized to determine the validity of a new robotic simulator (the XTT) as an evaluation tool of robotic surgical assistance skills.

**Key words:** robotic surgery; telesurgery; robotic simulation; delay; surgical training; team training