Bull. Acad. Natle Méd., 2013, *197*, n° 7, 1291-1301, séance du 1er octobre 2013

Séance dédiée : « La pensée et la machine »

COMMUNICATION

La cyberchirurgie : l'intégration homme-machine pour la chirurgie du futur

MOTS-CLÉS : CHIRURGIE ASSISTÉE PAR ORDINATEUR. PROCÉDURES DE CHIRURGIE MINIMALEMENT EFFRACTIVES.

Cybersurgery: human-machine integration for surgery of the future

KEY-WORDS (Index medicus): SURGERY, COMPUTER-ASSISTED. SURGICAL PROCEDURES, MINIMALLY INVASIVE.

Jacques MARESCAUX *, Michele DIANA

Jacques Marescaux déclare avoir des partenariats avec les sociétés Karl Storz Endoskope, Sciemens et Covidien.

RÉSUMÉ

Cet éditorial s'attache à analyser le concept coopératif homme-machine appliqué à la chirurgie qui vise à accroître et optimiser les performances du chirurgien. L'implémentation des technologies informatiques et robotiques en salle d'opération permet de renforcer la sécurité, l'efficacité et la précision du geste chirurgical ainsi que de faciliter l'exécution du geste à travers une approche mini-invasive. La révolution « cybernétique » est désormais en marche : le chirurgien sera remplacé par un robot chirurgical assisté par les techniques d'imagerie médicale et doté d'une intelligence artificielle capable de gérer de façon autonome des phases plus complexes de l'acte chirurgical.

SUMMARY

The concept whereby human-machine collaboration can enhance surgical performance is briefly reviewed in this editorial. Implementation of computer and robotic technologies in the operating room may enhance the safety, efficacy and precision of the surgical procedure and facilitate minimally invasive approaches. The coming cybernetic revolution in surgery is no longer science fiction: a surgical robot equipped with image recognition, specific algorithms and artificial intelligence has the potential replace surgeons and to perform complex procedures autonomously.

* Membre de l'Académie nationale de médecine ; e-mail : jacques.marescaux@chru-strasbourg.fr

Tirés-à-part : Professeur Jacques MARESCAUX, même adresse
Articla reçu le 13 septembre 2013, accepté le 30 septembre 2013

INTRODUCTION

L'harmonie, la beauté complexe, les minuteries mécaniques de l'organisme humain, fruit de millénaires d'évolution ont fait l'objet de l'émerveillement continuel des chercheurs dans le milieu biomédical. Force est de constater que les systèmes les plus sophistiqués de caméras à haute définition ne peuvent que pâlir devant le mécanisme complexe et fiable du système de la vision humaine, ceci étant aussi le plus haut degré de notre « compréhension visuelle » au-delà duquel toute amélioration technologique serait à peine perçue. Les développements technologiques et le degré de complexité dans les domaines industriels, informatiques, des télécommunications, pour ne citer que ces derniers, ont rendu notre perception sensorielle de l'univers environnant moins adaptée aux nouveaux besoins vitaux. Bien que les sens humains dans leur globalité et la puissante intelligence les gouvernant soient loin de pouvoir être remplacés par des formes « in silico », il est vrai que chaque habilité humaine prise singulièrement peut être perfectionnée et amplifiée à l'aide des sciences « bioniques », et en particulier l'informatique et la robotique, pour obtenir un « homme augmenté », brisant ainsi les frontières entre le corps et l'environnement. Cette possibilité s'applique bien au domaine chirurgical où les avancées technologiques ont rendu rapidement obsolètes les techniques chirurgicales traditionnelles utilisant des incisions cutanées larges et douloureuses. La chirurgie moderne s'attache à traiter les pathologies chirurgicales par un abord de moins en moins invasif tout en respectant strictement les principes fondamentaux de la chirurgie classique. De surcroît, la chirurgie moderne s'inspire de plus en plus du modèle de prévention de l'erreur et de gestion des risques mis en œuvre dans le monde de l'aéronautique, ayant rendu l'avion le moyen de transport le plus sûr. L'intégration dans une salle d'opération des technologies informatiques et robotiques permet de rehausser la sécurité, l'efficacité et la précision du geste chirurgical, voire même de faciliter l'exécution du geste à travers une approche mini-invasive.

Les chirurgiens aujourd'hui peuvent s'entraîner au simulateur avant toute intervention chirurgicale à l'instar des pilotes d'avion et planifier le geste chirurgical comme un plan de vol. Pendant l'intervention, le chirurgien tout comme le pilote est constamment assisté par l'ordinateur et par des systèmes de navigation sophistiqués. Le chirurgien peut compter sur l'assistance des logiciels de traitement de l'image du patient pouvant ainsi guider la procédure chirurgicale.

Un nouveau concept de « cyber chirurgie » est en train de prendre forme, à travers le développement des sciences informatiques et robotiques dont l'étape courante se construit sur l'intégration « chirurgien-machine ». Cette étape servira à jeter les bases pour une révolution encore plus avancée où le chirurgien sera remplacé par un robot chirurgical doté d'intelligence artificielle capable de gérer de façon autonome les phases plus complexes de l'acte chirurgical. Bien que cela puisse paraître de la « science-fiction », les bases technologiques constitutives de la cyber-chirurgie et de la chirurgie automatique sont déjà présentes ou font l'objet de recherche active.

L'objet de notre éditorial est d'examiner en profondeur le concept de chirurgien « cyborg » et de l'intégration homme-machine en chirurgie, destiné à « augmenter » les sens les plus essentiels lors de l'exécution d'un geste chirurgical : la MAIN et l'ŒIL.

LA MAIN AUGMENTÉE : CHIRURGIE PAR TÉLÉMANIPULATION ROBOTIQUE

L'introduction au bloc opératoire des technologies de télémanipulation robotique remonte aux années 1980, suite aux recherches menées dans le cadre d'un projet militaire de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), financé par la DARPA (*Defense Advanced Research Project Administration*). L'objectif initial du projet était de « remplacer » la présence physique du chirurgien en zone de guerre ou de catastrophe pour soigner à distance les blessés.

Les premières plateformes robotiques utilisées en chirurgie étaient limitées dans leur habilité d'exécution par des interfaces homme-machine à basse performance, limitant ainsi les possibilités de communication et de programmation à des gestes relativement simples telles que les biopsies de cerveau en stéréotaxique [1] par le robot industriel PUMA 200 en 1985 ou le PROBOT introduit en 1988 pour effectuer des résections prostatiques sous guide échographique [2]. L'introduction des télémanipulateurs robotiques représente une avancée technologique majeure : l'interface chirurgien-robot élabore les mouvements exécutés par le chirurgien et le robot les reproduit en temps réel, permettant ainsi une manipulation précise des tissus avec suppression des tremblements physiologiques de la main du chirurgien. Cela permet des dissections délicates dans des espaces étroits (tels que le pelvis), de manière intuitive et minutieuse.

Aujourd'hui, la seule plateforme robotique disponible sur le marché est le robot da Vinci® (Intuitive Surgical, Inc., Sunnyvale, CA) dont la console est équipée avec une vision stéréoscopique 3D et le chirurgien, confortablement assis, manipule des poignées dotées d'un mécanisme qui suit les mouvements du poignet humain avec 7 degrés de liberté (Figure 1).

Toutefois, le robot est plus qu'un outil d'aide à la dissection. Cette technologie a rompu le dogme le plus constant dans les différentes époques de la chirurgie : la présence physique du chirurgien et son contact avec le patient ainsi que l'enseignement de l'art chirurgical. C'est l'avènement de la téléchirurgie et du télémentoring.

Les premières expériences rapportées de téléchirurgie étaient à courte distance, limitées par le « temps de latence » des transmissions. En effet, un retard de transmission du signal, au-delà de 500 msec peut influencer l'exécution du geste chirurgical de façon significative [3], et, pour cette raison, les premières opérations de téléchirurgie étaient limitées à quelque centaine de kilomètres [4].

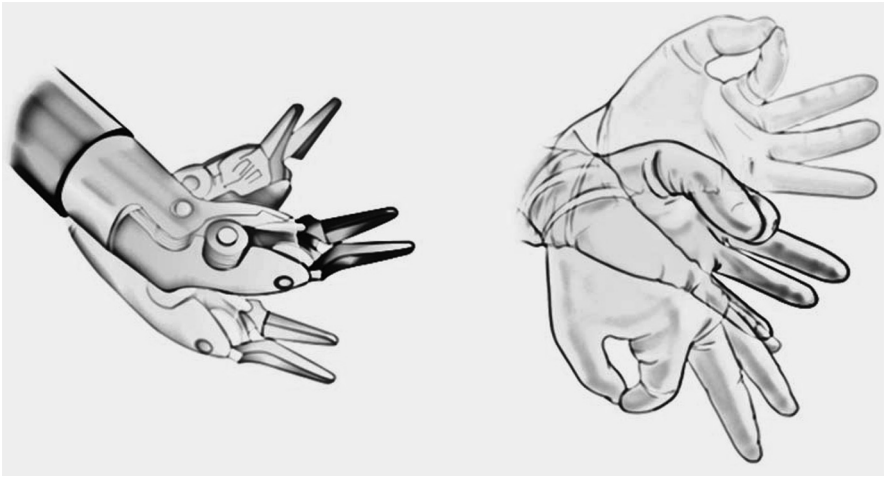

FIG. 1. — Instruments robotiques reproduisant les mouvements de la main du chirurgien

Les effecteurs du robot chirurgical sont manipulés par des poignées dotées d'un mécanisme qui suit les mouvements du poignet humain (Endowrist®) avec 7 degrés de liberté.

Le développement de transmission à haute vitesse par fibres optiques avec un temps de latence inférieur à 500 msec a permis à l'équipe chirurgicale de l'IRCAD de surmonter toutes les limites de la téléchirurgie, avec la réalisation en septembre 2001 de la première intervention mondiale transatlantique qui fut baptisée l'« Opération Lindbergh » [5]. La démonstration de la faisabilité de cette opération est la pierre angulaire de la globalisation du partage du geste chirurgical, rendue possible grâce à la maîtrise des délais de transmission assurée par le savoir-faire de France Télécom, utilisant une modalité avancée de transfert de données.

Le télémentoring est la possibilité pour un chirurgien expert de pouvoir enseigner une intervention chirurgicale « en double commande », grâce à la technologie robotique, avec la possibilité d'intervenir (reprendre les commandes) durant des phases plus complexes d'une opération se déroulant à des milliers de kilomètres de distance [6]. Des programmes de télémentoring sont en plein développement aujourd'hui. La télé-présence d'un expert permet d'augmenter efficacement le niveau de sécurité du geste et peut contribuer à la dissémination du savoir chirurgical dans des zones rurales ou moins urbanisées [7].

Des développements ultérieurs dans le domaine de la manipulation robotique sont à l'étude par l'équipe de Robotique et Automatisation de l'IRCAD et du laboratoire iCube et ils s'orientent vers l'automatisation du geste chirurgical. Le concept de co-manipulation homme-machine est déjà largement une réalité dans des gestes simples tels que l'exécution de biopsies, mais pour la « chirurgie collaborative homme-machine » un certain nombre de problèmes doivent être résolus en vue d'une automatisation totale. Des premier pas dans ce sens sont assez encoura-

geants : il est en réalité actuellement possible de programmer le robot chirurgical da Vinci® pour effectuer de manière semi-autonome des gestes relativement complexes tels que les ligatures intracorporelles par technique mini-invasive [8, 9], geste qui requiert un long entraînement aux chirurgiens avant de pouvoir être parfaitement maitrisé (Figure 2). La même interface de contrôle semi-automatique peut être implémentée théoriquement sur n'importe quel support de manipulation robotique pouvant affranchir le robot de la configuration Maître-Esclave.

L'autre facteur indispensable pour le développement et la diffusion de la chirurgie robotique est la miniaturisation du robot, car le da Vinci®, un concentré impressionnant de technologie, est trop encombrant et onéreux. La réélaboration du robot chirurgical en terme de miniaturisation permettant aussi un abord moins invasif pourrait représenter des bénéfices majeurs pour le patient.

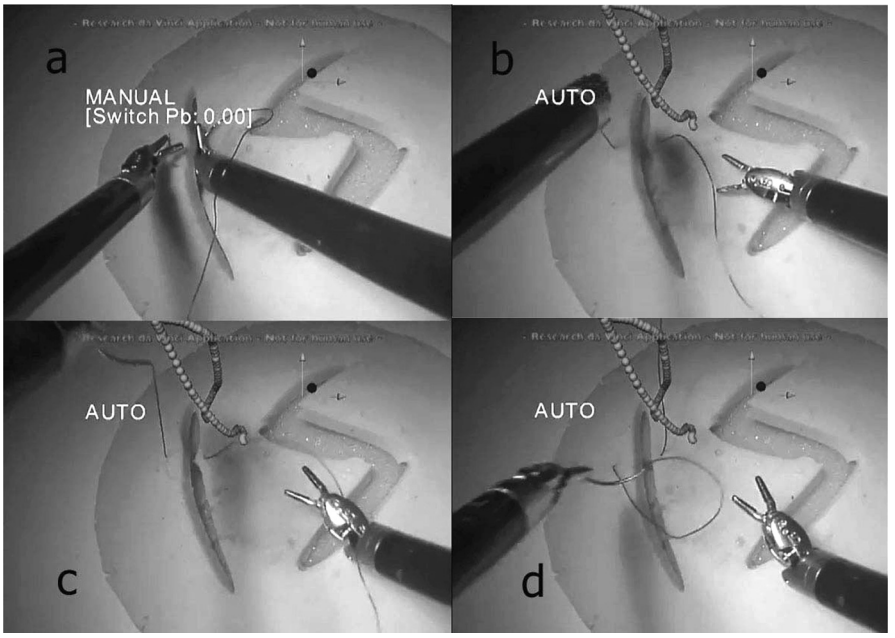

FIG. 2. — Suture semi-automatique effectuée en modalité collaborative « homme-machine »

Suture semi-automatique effectuée en modalité collaborative « homme-machine ». L'opérateur démarre la suture (a) en mode manuel par télémanipulation et ensuite (b) il laisse « la main » à la machine qui va continuer le geste en suivant une trajectoire prédéfinie (c et d). En orange : visualisation de la trajectoire programmée (par concession de Nicolas Padoy, IRCAD-IHU ; travail effectué à la John Hopkins University, Baltimore, États-Unis).

Un nouveau prototype de robot chirurgical (Robotic ISISCOPE®) est actuellement en développement à l'IRCAD de Strasbourg, en partenariat avec la société Karl Storz® (Tuttlingen, Allemagne) et avec la coopération du Professeur Michel de

Mathelin et son équipe (iCube). L'ISISSCOPE® robotique est un concept totalement révolutionnaire car il s'agit d'une plateforme chirurgicale endoscopique souple, de petite dimension (1,8 cm de diamètre) et par conséquent encore moins invasive permettant d'effectuer des gestes opératoire complexes par une seule incision, voire sans cicatrices (utilisant les voies naturelles). Le robot ISISSCOPE® est un endoscope flexible avec 1) une unité effectrice à l'extrémité distale, composée de micro-instruments chirurgicaux (2 de 4,3 mm doté de 6 degrés de liberté et 1 de 3,2 mm avec 3 degrés de liberté) et 2) une interface de commande homme-machine, pour manipuler les instruments de façon précise et totalement intuitive (Figure 3).

Fig. 3. — Robot ISISSCOPE®

Le robot ISISSCOPE® est un endoscope flexible avec : a) une unité effectrice à l'extrémité distale, composée de micro-instruments chirurgicaux dotés de 6 degrés de liberté, et b) 2 moteurs ; c et d) une interface de commande homme-machine pour manipuler les instruments de façon précise et totalement intuitive.

L'ŒIL AUGMENTÉ 1 (VOIR EN TRANSPARENCE) : CHIRURGIE ASSISTÉE PAR L'IMAGERIE MÉDICALE À TRAVERS LA RÉALITÉ VIRTUELLE ET LA RÉALITÉ AUGMENTÉE

Une autre technologie dérivée des sciences informatiques pouvant offrir une augmentation significative des habilités opératoires est la Réalité Virtuelle (RV). La RV est l'ensemble de technologies permettant une simulation en temps réel de la réalité à travers la synthèse d'informations sensorielles reproduisant un environnement en

3D dans lequel le sujet peut être totalement immergé. Une application de la RV en chirurgie consiste à modéliser le clone d'un patient en un modèle 3D « virtuel », à partir d'une imagerie médicale (Scanner ou Résonance Magnétique). Ce modèle est la copie conforme du patient, permettant une navigation à l'intérieur du corps, l'identification des structures anatomiques et pathologiques [10]. Sur ce modèle, le chirurgien peut « planifier l'intervention », repérer les plans de dissection, estimer le meilleur abord et même évaluer les effets de sa stratégie chirurgicale.

Le concept dérivé de la RV permettant une navigation durant l'opération chirurgicale est défini comme Réalité Augmentée (RA). La RA (ou réalité mixte) est la synthèse en temps réel d'images issues directement du patient, capturées par la caméra lors d'une intervention mini-invasive et d'images virtuelles du même patient, reconstruites à partir de l'imagerie médicale [11]. Cela permet de voir des structures cachées (vaisseaux, ganglions, etc.) en « transparence virtuelle » durant l'opération (Figure 4). L'application clinique de cet artifice est très prometteuse [12]. Le concept avait été validé avec une première mondiale à l'IRCAD déjà en 2004 (nous avons effectué une surrénalectomie laparoscopique guidée par la RA nous permettant une identification des structures nobles de manière tout à fait efficace) [13]. L'utilisation de la RA a été élargie à multiples indications tant en chirurgie laparoscopique que dans des techniques de radiologie interventionnelle grâce à l'habilité de la RA de « voir » à travers la peau la position des organes cibles. Les limitations de la RA avec la technologie actuelle sont encore multiples et notamment en termes de précision, rapidité de création du modèle virtuel et capacité du modèle virtuel de « rester en phase » avec les organes réels durant les mouvements physiologiques (respiration) et durant la manipulation chirurgicale. Mais, au vu des efforts des chercheurs mis en œuvre dans plusieurs instituts pour améliorer les prestations de la RA, nous pouvons prédire des innovations majeures dans un futur très proche.

L'ŒIL AUGMENTÉ 2 (VOIR L'INVISIBLE) : CHIRURGIE ASSISTÉE PAR LA VISION AUX LASERS INFRAROUGES

Un artifice supplémentaire pour améliorer les performances et la sécurité du geste opératoire est le concept de chirurgie guidée par la fluorescence, déjà bien connu en chirurgie ouverte et qui a récemment été appliqué à la chirurgie laparoscopique et robotique. Grâce au développement de laparoscopes avec des sources de lumière émettant des fréquences infrarouges, il est possible de visualiser des structures nobles (vaisseaux, uretères) par le biais de l'intensité lumineuse de substances (fluorescéine, bleu de méthylène, vert d'indocyanine) qui sont injectées au patient. Ce concept se marie bien avec la RA, du moment que les images laparoscopiques avant et après injection peuvent être intégrées pour donner une image 2D + l'évolution dans le temps (3D virtuel) grâce à un logiciel développé à l'IRCAD [14 ; 15]. Les applications possibles faisant l'objet d'études à l'IRCAD sont multiples :

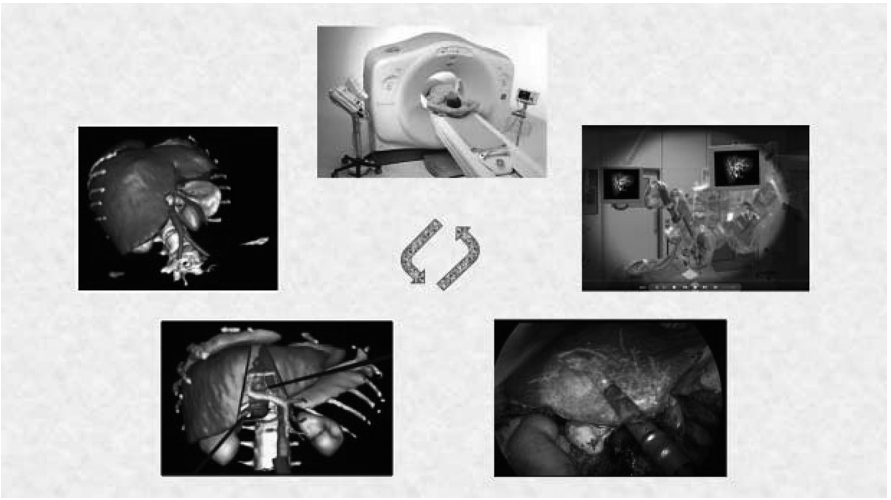

FIG. 4. — Processus de l'utilisation de la Réalité Augmentée (RA) en chirurgie.

détection de la perfusion capillaire au site de résection digestive (Figure 5), détection du ganglion sentinelle, détection peropératoire de fuites biliaires en cours d'hépatectomie laparoscopique, et bien d'autres applications encore.

L'ŒIL AUGMENTÉ 3 (VOIR L'INFINIMENT PETIT) : CHIRURGIE ASSISTÉE PAR LA VISION MICROSCOPIQUE EN TEMPS RÉEL

La possibilité d'effectuer un examen microscopique en peropératoire en temps réel représente une avancée majeure, surtout dans la chirurgie oncologique, pour pouvoir déterminer avec rapidité la précision des marges de résection. La société française Mauna Kea Technologies a développé un système de microscopie optique permettant de faire des « biopsies » virtuelles en temps réel. Le Cellvizio®, (Mauna Kea Technologies) est une modalité d'imagerie microscopique laser à haute résolution « confocale », à savoir dotée d'une capacité à sélectionner la profondeur du point focal. Ceci permet une meilleure visualisation comparée à la microscopie standard, du moment que les images sont reconstruites en 3D à travers un algorithme *ad hoc* permettant l'évaluation de surfaces irrégulières avec des points focaux différents. De surcroît, il permet une évaluation en temps réel et une cinématographie de l'analyse par balayages successifs. La sonde laser du Cellvizio® est conçue pour être introduite dans les endoscopes classiques et prochainement aussi dans les laparoscopes rigides. Nous avons utilisé le Cellvizio® pour déterminer le niveau de perfusion intestinale sur la base des modifications précoces de la muqueuse intestinale induites par l'ischémie [16] (Figure 6). Cette technologie

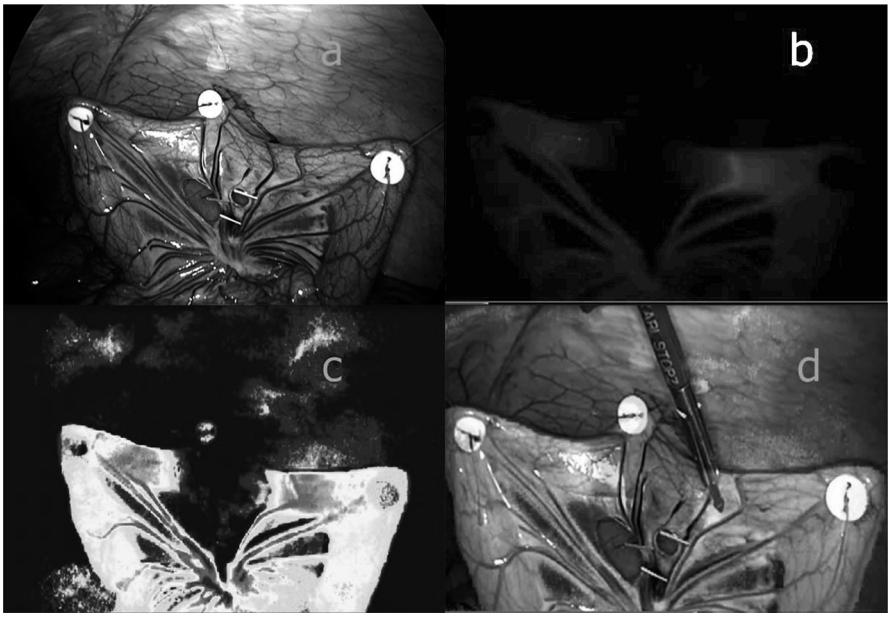

Fig. 5. — Vidéographie par fluorescence avec Réalité Augmentée pour déterminer la perfusion intestinale

Évaluation de la perfusion intestinale par vidéographie par fluorescence et Réalité Augmentée utilisant la caméra à infrarouge D-Light P développée par la société Karl Storz® (Tuttlingen, Allemagne) et un logiciel (VR Perfusion) développé à l'IRCAD. La figure montre la validation de la technique sur un modèle d'ischémie intestinale : a) une zone ischémique était créée sur une anse intestinale à l'aide de clips métalliques ; b) après injection de vert d'indocyanine, la caméra D-Light P est positionnée sur modalité infrarouge pour détecter la fluorescence émise par le vert d'indocyanine ; c) le logiciel reconstruit l'image sur la base du temps requis pour atteindre le pic d'intensité que représente la perfusion du tissu ; d) le modèle virtuel est superposé à l'image réelle pour obtenir la réalité augmentée et tracer avec précision la région ischémique.

d'augmentation de la vision du chirurgien, bien qu'encore en phase d'étude, exprime un potentiel énorme et sera très probablement un outil indispensable d'aide à la décision peropératoire, avec des logiciels permettant un « diagnostic pathologique automatisé ».

Pour conclure ce bref aperçu, nous soutenons que la trajectoire vertigineuse des avancées technologiques pouvant améliorer la stratégie et la technique chirurgicale passera par les développements et les innovations issus de la robotique et de l'informatique. En outre, l'application de ces technologies sera de plus en plus répandue afin d'institutionnaliser la chirurgie assistée par ordinateur, pratiquée par des cyber chirurgiens, ainsi que la chirurgie automatisée.

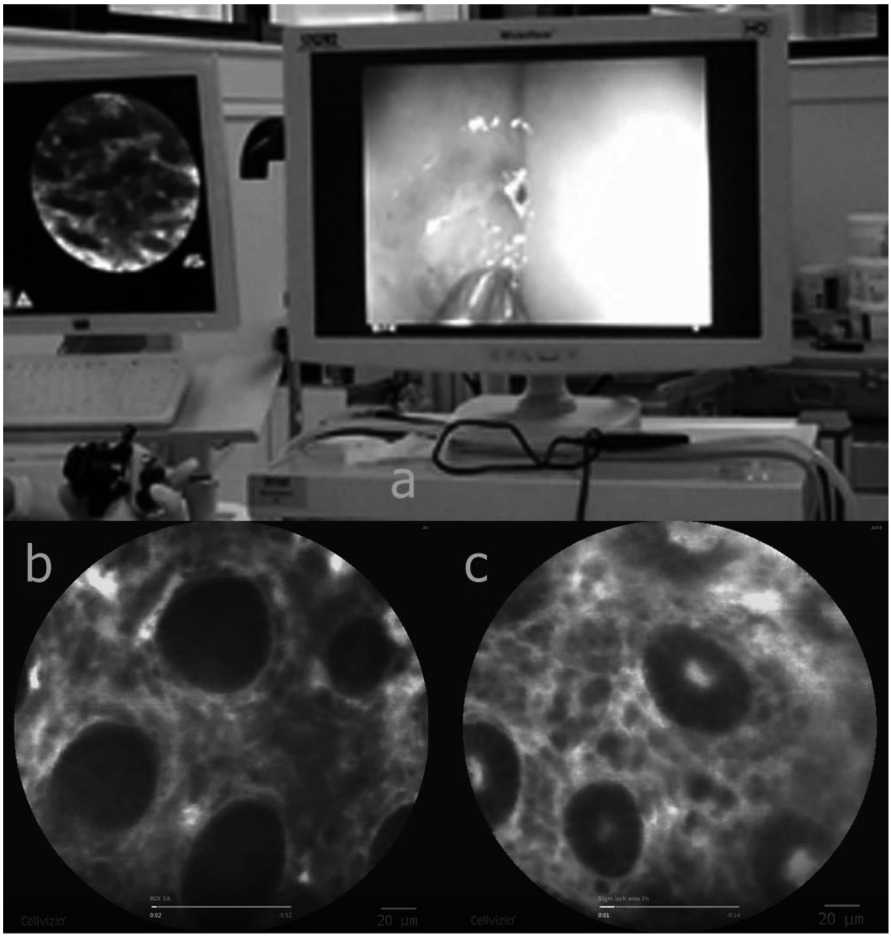

Fig. 6. — Évaluation de la perfusion intestinale en temps réel par microscopie confocale

a) La sonde laser Cellvizio® est conçue pour être introduite dans les endoscopes classiques et permet d'obtenir en temps réel des images microscopiques de la muqueuse intestinale. Nous avons utilisé le Cellvizio® pour déterminer le niveau de perfusion intestinale sur la base des modifications précoces de la muqueuse intestinale induites par l'ischémie : en b) visualisation des glandes dans un segment bien perfusé, en c) aspect « en cible » des glandes due à l'accumulation de dépôts de fibrine suite à l'ischémie (M Diana, données en cours de publication).

RÉFÉRENCES

[1] Kwoh Y.S., Hou J., Jonckheere E.A., Hayati S. — A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery. *IEEE transactions on bio-medical engineering*, 1988, *35*, 153-160.

[2] Harris S.J., Arambula-Cosio F., Mei Q., Hibberd R.D., Davies B.L., Wickham J.E., *et al.* — The Probot-an active robot for prostate resection. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part H. *Journal of engineering in medicine*, 1997, *211*, 317-325.

[3] Lum M.J., Rosen J., King H., Friedman D.C., Lendvay T.S., Wright A.S., *et al.* — Teleoperation in surgical robotics-network latency effects on surgical performance. *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, 2009, 6860-6863.

[4] Satava R.M. — Emerging technologies for surgery in the 21st century. *Arch. Surg.*, 1999, *134*, 1197-1202.

[5] Marescaux J., Leroy J., Gagner M., Rubino F., Mutter D., Vix M., *et al.* — Transatlantic robot-assisted telesurgery. *Nature*, 2001, *413*, 379-380.

[6] Ballantyne G. H. — Robotic surgery, telerobotic surgery, telepresence, and telementoring. Review of early clinical results. *Surg. Endosc.*, 2002, *16*, 1389-1402.

[7] Schlachta C. M., Lefebvre K. L., Sorsdahl A. K., Jayaraman S. — Mentoring and telementoring leads to effective incorporation of laparoscopic colon surgery. *Surgical endoscopy*, 2010, *24*, 841-844.

[8] Padoy N., Hager G. D. — Spatio-temporal registration of multiple trajectories. *Med. Image. Comput. Assist. Interv.*, 2011, *14*, 145-152.

[9] Padoy N., Hager G. D. — Human-Machine Collaborative Surgery Using Learned Models. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA*, 2011, 5285-5292.

[10] Nicolau S., Soler L., Mutter D., Marescaux J. — Augmented reality in laparoscopic surgical oncology. *Surg. Oncol.*, 2011, *20*, 189-201.

[11] Marescaux J., Diana M., Soler L. — Augmented Reality and Minimally Invasive Surgery. *Journal of Gastroenterology and Hepatology Research,* 2013, *2(5)*.

[12] D'Agostino J., Diana M., Vix M., Soler L., Marescaux J. — Three-dimensional virtual neck exploration before parathyroidectomy. *N. Engl. J. Med.,* 367, 1072-1073.

[13] Marescaux J., Rubino F., Arenas M., Mutter D., Soler L. — Augmented-reality-assisted laparoscopic adrenalectomy. *JAMA*, 2004, *292*, 2214-2215.

[14] Diana M., Noll E., Diemunsch P., Dallemagne B., Benahmed M.A., Agnus V., *et al.* — Enhanced-Reality Video Fluorescence: A Real-Time Assessment of Intestinal Viability. *Ann. Surg.*, 2014, *259*, 700-7.

[15] Diana M., Halvax P., Dallemagne B., Nagayo Y., Diemunsch P., Charles A.L., *et al* — Real time navigation by fluorescence-based enhanced reality for precise estimation of future anastomic site in digestive surgery. *Surg. Endosc.*, 2014, *28(11)*, 3108-3118.

[16] Diana M., Dallemagne B., Chung H., Nagao Y., Halvax P., Agnus V., *et al.* — Probe-based confocal laser endomicroscopy and fluorescence-based enhanced reality for real-time assessment of intestinal microcirculation in a porcine model of sigmoid ischemia. *Surg. Endosc.*, 2014, *28(11)*, 3224-3233.