

L'avenir de la télémicrochirurgie de la main et du membre supérieur. Replantation de membre avec deux robots : étude expérimentale chez le cochon

Limb replantation with two robots: a feasibility study in a pig model

Philippe Liverneaux^{1, 2}, Chihab Taleb^{1, 2}, Eric Nectoux², S Facca^{1, 2}

¹SOS main Illkirch, Hôpitaux Universitaires de Strasbourg, France

²EITS, Institut Européen de Téléchirurgie, Strasbourg, France

Mots clés

- ◆ Cochon
- ◆ microchirurgie
- ◆ replantation
- ◆ robot
- ◆ téléchirurgie
- ◆ transplantation

Résumé

L'objectif de ce travail était d'étudier la faisabilité des replantations et transplantations de membres par la téléchirurgie. Le matériel a consisté en un cochon de race large white et deux robots chirurgicaux (télémanipulateurs Da Vinci S®). La méthode a consisté à réaliser une amputation trans-humérale du membre thoracique gauche, puis de le replanter. Les résultats ont montré que la perméabilité des axes vasculaires était bonne et que le tremblement physiologique des opérateurs a été supprimé. Nos résultats semblent montrer que la téléchirurgie pourrait améliorer la prise en charge des replantations et des transplantations, notamment en augmentant la précision du geste opératoire.

Keywords

- ◆ Pig
- ◆ microsurgery
- ◆ replantation
- ◆ robot
- ◆ telesurgery
- ◆ transplantation

Abstract

The aim of this study was to assess the feasibility of limb replantations and transplantations by telesurgery. The material consisted in a Large White pig and two surgical robots (Da Vinci S® telemanipulators). The procedure consisted in a trans-humeral cross-section of the left thoracic limb, which was secondarily replanted. Results showed good vascular permeability, while the operator's physiological tremor was suppressed. Our results seem to demonstrate that telesurgery could improve limb replantation and transplantation management, especially regarding operating gesture precision.

Le concept de téléchirurgie, développée dans les années 1990, a été défini comme toute intervention chirurgicale assistée à distance par ordinateur (1). La première intervention de téléchirurgie, une cholécystectomie laparoscopique transatlantique, a été réalisée en 2001 (2). La téléchirurgie, pratiquée par l'intermédiaire d'un robot chirurgical asservi au chirurgien, possède deux avantages théoriques : d'une part le travail à distance et d'autre part l'amélioration de la précision de la gestuelle chirurgicale. Seul le second avantage est utilisé actuellement couramment en chirurgie réglée dans de nombreuses spécialités comme les chirurgies digestive, urologique, gynécologique ou encore cardiaque (3). La faisabilité de la téléchirurgie a été démontrée en microchirurgie expérimentale (4-7).

Dans ce contexte, l'objectif de ce travail était de démontrer la faisabilité des replantations et des transplantations de membres en utilisant la téléchirurgie, non seulement qualitativement en éliminant le tremblement physiologique du chirurgien par la démultiplication du geste, mais aussi quantitativement en utilisant deux robots chirurgicaux, dont l'encom-

brement supposé du champ opératoire plus faible qu'en microchirurgie conventionnelle devrait permettre de faire travailler deux microchirurgiens simultanément.

Matériel et méthodes

L'équipe opératoire était composée de 6 personnes, 3 chirurgiens, un infirmier-anesthésiste, une infirmière de bloc opératoire et un technicien spécialisé en robotique. Parmi les 3 chirurgiens, il y avait 1 senior et 2 résidents, qui se relayaient sur les consoles de deux robots chirurgicaux. L'infirmier-anesthésiste était compétent en anesthésie vétérinaire. L'infirmière de bloc opératoire avait bénéficié d'une courte formation à la télémanipulation. Le technicien spécialisé en robotique avait pour rôle d'installer les 2 robots chirurgicaux. Le matériel comprenait un cochon de race *large white*, un ancillaire de chirurgie osseuse, deux robots chirurgicaux destinés à la chirurgie des parties molles. L'ancillaire de chirurgie osseuse comprenait notamment une scie oscillante, un

Correspondance :

Professeur Philippe Liverneaux. - SOS main, CCOM, Hôpitaux Universitaires de Strasbourg, 10 av Baumann, 67403 Illkirch cedex, France.

Email : philippe.liverneaux@chru-strasbourg.fr

Disponible en ligne sur www.bium.univ-paris5.fr/acad-chirurgie
1634-0647 - © 2010 Académie nationale de chirurgie. Tous droits réservés.

Remerciements :

Messieurs les professeurs Jacques Marescaux et Didier Mutter, IRCAD, Institut Européen de Téléchirurgie de Strasbourg.

Messieurs David Douglas, Brice Herain et Patrice Villard, de la société Intuitive Surgical, Inc, Sunnyvale, US.

Mesdames Dominique Latzer et Muriel Renard, infirmières de bloc opératoire.

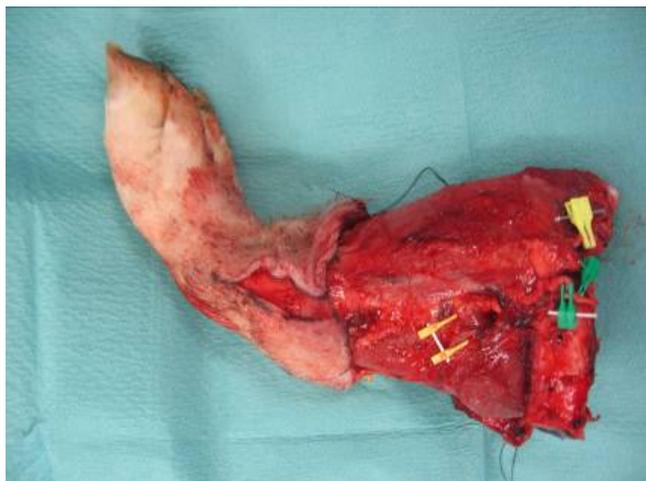


Figure 1. Pièce d'amputation du membre antérieur gauche de cochon à l'étage huméral. Noter la présence de clamps vasculaires repérant les éléments vasculo-nerveux.

moteur chirurgical, une plaque à vis bloquées (Allians®, Newclip™) et un fluoroscope (XiScan4400®, FMCONTROL™).

Les 2 robots chirurgicaux destinés à la chirurgie des parties molles étaient de modèle Da Vinci S® (Intuitive Surgical, Inc.™). Ils comportaient chacun 3 parties : un chariot mobile, un chariot d'imagerie et une console permettant à chaque chirurgien de contrôler les bras articulés de son robot chirurgical. Le chariot mobile comportait 4 bras robotisés articulés, dont 3 portant des instruments chirurgicaux et le quatrième l'optique visualisant le champ opératoire. Chacun de ces bras possédait plusieurs articulations offrant un déplacement tridimensionnel des instruments chirurgicaux et de l'optique. Les instruments consistaient en des pinces à disséquer et des ciseaux droits, dont les mouvements étaient démultipliés dans un rapport de 1/5. Le quatrième bras portait une optique autorisant une vision tridimensionnelle et un grossissement progressif jusqu'à 25 fois.

La méthode chirurgicale comportait deux temps, l'amputation puis la replantation du membre thoracique gauche à l'étage huméral. Elle respectait les règles de bonne pratique en chirurgie expérimentale sur des animaux ainsi que la loi française en vigueur sur la protection animale. L'anesthésie a été réalisée par administration continue de vapeurs halogénées de sévoflurane (Sévorane®) à l'aide d'un masque. L'animal était installé en décubitus dorsal sur table vétérinaire, les 4 membres attachés par des contentions de type velcro® en position d'abduction. L'intervention chirurgicale a été filmée dans son intégralité.

Le temps d'amputation du membre thoracique a été conduit sans robot chirurgical. Il comportait 3 étapes successives : exposition des tissus, préparation de l'ostéosynthèse et totalisation de l'amputation. Une incision cutanée longitudinale a été réalisée sur chacune des faces latérale et médiale de la région humérale pour exposer les éléments vasculonerveux et musculotendineux jusqu'à l'humérus. La préparation de l'ostéosynthèse débutait par la mise en place de la plaque à la face médiale de l'humérus. La bonne position de la plaque et des vis a été contrôlée par le fluoroscope. Une fois la plaque en place puis retirée pour faire apparaître les orifices des vis, une ostéotomie médiodiaphysaire de l'humérus a été réalisée à l'aide d'une scie oscillante. Avant la totalisation de l'amputation (fig. 1), tous les vaisseaux et les nerfs ont été sectionnés et chacune de leurs extrémités repérées par des clamps vasculaires (Biover®, Arex™).

Le temps de replantation comportait trois étapes successives : ostéosynthèse de l'humérus, réparation des parties molles et évaluation du résultat. L'étape d'ostéosynthèse a été conduite sans robot chirurgical. La plaque a été mise en place à la face médiale de l'humérus et fixée à l'aide de six vis de 3,5



Figure 2. Poste de travail de téléchirurgie. A la droite de la figure ; se trouvent les deux consoles permettant à chacun des deux opérateurs de contrôler les bras articulés de son chariot mobile qui se trouvent au centre de la figure. Le cochon est installé sur une table d'opération entre les deux chariots mobiles. Les opérateurs sont assis chacun à leur console, la tête reposant entre deux capteurs infrarouges sur un support lui permettant de regarder dans une optique binoculaire qui donne une vision tridimensionnelle du champ opératoire. Les mains de chaque opérateur contrôlent les mouvements des bras de son chariot mobile par le biais des manettes reliées aux instruments chirurgicaux par des circuits électroniques transmis par des servo-moteurs. Des écrans de contrôle montrant le champ opératoire permettent au personnel de bloc opératoire de suivre l'intervention chirurgicale.

mm de diamètre, à travers les orifices préparés lors du temps d'amputation. L'étape de réparation des parties molles a été conduite avec les deux robots chirurgicaux (fig. 2) qui se faisaient face pour contrôler l'encombrement stérique du champ opératoire dans lequel évoluaient de part et d'autre du membre à replanter huit bras articulés, dont deux optiques et six instruments chirurgicaux (fig. 3). Les deux consoles étaient placées côte à côte à une distance de trois mètres du champ opératoire. Chaque opérateur commandait son robot chirurgical et procédait à la réparation téléchirurgicale des parties molles d'une des deux faces de la région humérale, latérale pour l'un et médiale pour l'autre. Toutefois, ce partage du champ opératoire n'avait rien de rigide, puisqu'il arrivait fréquemment que les deux opérateurs coordonnent leurs gestes sur une seule action, notamment la coupe des points de suture des anastomoses (micro)chirurgicales. Les opérateurs se relayaient régulièrement, permettant à l'un des trois chirurgiens de prendre du repos. Deux nerfs, deux artères et deux veines ont été anastomosés par des points séparés de nylon 10/0. Les muscles et tendons d'une part et la peau d'autre part ont été réparés respectivement par des points de Kessler de nylon de 3/0 et des points séparés de nylon 4/0. L'évaluation du résultat a consisté à vérifier quantitativement la durée des différents temps opératoires à partir de l'enregistrement vidéo et qualitativement la bonne position de la plaque et des vis par le fluoroscope, la perméabilité de chacune des réparations vasculaires avant la fermeture cutanée et enfin la réussite vasculaire de la replantation par une saignée du segment distal du membre thoracique replanté à 10, 30 puis 60 minutes. L'animal a été sacrifié à la fin de la procédure par injection létale de chlorure de potassium.

Résultats

Les résultats avaient pour but non seulement de vérifier le succès vasculaire de la replantation, mais encore d'étudier les adaptations gestuelles et ergonomiques que les opérateurs ont dû maîtriser pour s'approprier la téléchirurgie.



Figure 3. Champ opératoire de téléchirurgie. Après ostéosynthèse de l'humérus, le temps téléchirurgical est réalisé au moyen de deux robots chirurgicaux. On aperçoit au centre de la figure 6 bras télémanipulés, dont deux portant chacun une optique et quatre portant chacun un instrument de téléchirurgie.



Figure 4. Vue opératoire à la fin de la replantation. On aperçoit le saignement du fragment distal replanté à travers une saignée qui témoigne de la réussite vasculaire de l'intervention.

Sur le plan quantitatif, la durée totale de la procédure était de sept heures, dont une heure pour l'installation et l'anesthésie, une heure pour l'amputation, quatre heures pour la replantation, et une heure depuis la fin de la fermeture cutanée jusqu'au sacrifice de l'animal. A noter que l'installation des deux robots a duré vingt-cinq minutes et la durée d'ischémie une heure et quarante minutes, depuis la section de la dernière artère jusqu'au test de perméabilité de la première artère réparée.

Sur le plan qualitatif, les tests de perméabilité vasculaire — réalisés avec des pinces de téléchirurgie — étaient tous positifs immédiatement après l'anastomose vasculaire et secondairement avant la fermeture cutanée. Bien que le robot chirurgical ne permettait pas de rétrocontrôle tactile proprioceptif, aucune lésion vasculaire n'a été déplorée non seulement pendant le serrage des nœuds, mais aussi pendant la réalisation des tests de perméabilité. C'est le rétrocontrôle visuel qui a compensé le rétrocontrôle tactile proprioceptif. La réussite vasculaire de la replantation a été constatée par le saignement veineux issu de la saignée cutanée à 10, 30 et 60 minutes (fig. 4). À noter que le membre replanté présentait un discret engorgement veineux.

Concernant la gestuelle, le tremblement physiologique des opérateurs a été totalement supprimé pendant les étapes utilisant les robots chirurgicaux. Concernant l'ergonomie, aucun conflit spatial n'a été constaté entre les deux robots chirurgicaux. Les deux opérateurs, confortablement installés, ont non seulement coordonné leurs actions sur un même geste, mais ont également pu se relayer régulièrement.

Discussion

Le tremblement physiologique est un phénomène bien connu en microchirurgie conventionnelle. La téléchirurgie possède la propriété de supprimer ce tremblement par la démultiplication du geste opératoire (3). Plus le geste est précis et plus la démultiplication est importante. Certains auteurs ont même montré que la téléchirurgie diminuait ainsi nettement la courbe d'apprentissage de la microchirurgie (8, 9).

Le travail simultané de deux robots chirurgicaux est à notre connaissance une première au cours d'une même intervention chirurgicale. Dans notre étude, la configuration de deux opérateurs pour le même temps opératoire a réduit significativement le temps d'ischémie. En effet, le seul moment où deux opérateurs peuvent travailler en parallèle lors d'une replantation ou d'une transplantation de membre conventionnelles est

le débridement des deux extrémités amputées. La réparation microchirurgicale conventionnelle des parties molles requiert un champ opératoire large compte tenu de l'encombrement stérique des mains de l'opérateur et du microscope opératoire. À l'inverse, l'encombrement stérique des huit bras articulés des deux robots chirurgicaux dans un même champ opératoire était réduit du fait de leur longueur et de leur mobilité. Notre étude comporte quelques limites. La première est que pour des raisons pratiques et éthiques, l'animal a dû être sacrifié une heure après l'intervention, ce qui n'a pas permis de vérifier la perméabilité vasculaire au-delà de cette durée. Toutefois, cette limite ne remet pas en cause la qualité des anastomoses vasculaires, d'autant plus que le discret engorgement veineux post-opératoire témoignait d'une bonne perméabilité artérielle.

La deuxième limite est l'important investissement économique que nécessitent l'acquisition et l'entretien d'un robot chirurgical, et a fortiori de deux. Pourtant de nombreuses équipes n'ont pas hésité à investir dans cette technologie pour diverses disciplines chirurgicales (10, 11). Les arguments avancés par ces équipes sont la diminution du saignement per-opératoire, l'amélioration de la précision du geste opératoire, la réduction de la taille de la voie d'abord cutanée et enfin la diminution de la durée d'hospitalisation (12, 13). En matière de microchirurgie, les arguments que l'on peut avancer en faveur de la téléchirurgie sont différents. La microchirurgie nécessite une voie d'abord étendue pour exposer correctement l'ensemble des tissus à réparer. Selon nous, l'avantage principal de la téléchirurgie est le gain de temps opératoire.

La troisième limite est l'absence d'ancillaire d'ostéosynthèse adapté aux bras articulés du robot chirurgical. La raison en est que le télémanipulateur Da Vinci S® n'a pas été conçu pour la chirurgie orthopédique. Il faut convaincre les industriels d'investir dans la recherche et le développement de cette discipline chirurgicale (14).

Enfin, notre expérience n'a été réalisée que sur un cas, ce qui ne permet pas de conclure à la reproductibilité des résultats.

Conclusion

À la lumière de ce cas unique de replantation expérimentale de membre de cochon avec deux robots chirurgicaux, des perspectives d'applications multiples apparaissent possibles en téléchirurgie.

Questions

F Richard : Compte tenu de l'évolution rapide de la chirurgie-robot assistée, faite dans le service d'urologie de la Pitié Salpêtrière, outre la prostatectomie totale, la plupart des autres techniques telles les néphrectomies totales ou partielles, les cystectomies, la chirurgie de l'incontinence et du prolapsus génital sont également réalisées au robot. Il devient nécessaire d'évaluer les résultats à partir de l'étude de bases de données systématiquement mises en place. D'autre part, la multiplication des robots ne sera pas indéfinie et aura obligatoirement un retentissement sur l'organisation de la chirurgie et des centres formateurs.

Réponse : Je ne peux qu'abonder dans ce sens. Le développement attendu de la chirurgie robotique nécessite une évaluation. Toutefois, en microchirurgie, où les premiers commentent à être publiés, il est encore trop tôt pour avoir une idée des indications futures.

F Dubois : Où en est le problème du « retour de force » promis par DA VINCI depuis l'origine ?

Réponse : Le retour de force n'est toujours pas disponible à ce jour, mais ça ne devrait pas tarder.

M Germain : Des compliments. Philippe Liverneaux est le pionnier de la microchirurgie avec le robot DA VINCI en France. Il organise des cours de télémicrochirurgie à Strasbourg régulièrement. Il doit amener ses malades et son équipe dans le service de J Marescaux pour opérer. Question : serait-il possible de réaliser dans l'avenir, une microchirurgie nerveuse plus précise et plus fine grâce au robot DA VINCI —appelée par les japonais ultra-microchirurgie ?

Réponse : Sans aucun doute, la télémicrochirurgie trouvera probablement ses meilleures applications dans la chirurgie des nerfs périphériques, permettant des sutures de précision meilleure que celles actuellement effectuées.

JM Dubernard : Nécessité d'une véritable évaluation scientifique de l'intérêt du robot, indication par indication. C'est sur cette base que la commission d'évaluation des actes professionnels de la HAS donne des avis en vue du remboursement (loi d'août 2004).

Réponse : Bien sûr. Mais attention de ne pas paralyser la recherche par des contraintes réglementaires trop rigides.

D. Loisan : Évaluer l'apport des techniques de microchirurgie assistée par robot est indispensable. Cette évaluation doit être conduite de façon indépendante vis-à-vis des industriels. Quelle est votre position vis-à-vis de cette évaluation et de ses modalités.

Réponse : Même réponse qu'à la question précédente. Les modalités de l'évaluation des nouvelles technologies doivent suivre celles des autres disciplines.

L Sedel : Il existe à Paris plusieurs robots DA VINCI depuis déjà plusieurs années. Le CEDIT, Centre d'Évaluation des Innovations Technologiques de Paris, n'a toujours aucune évaluation sérieuse de ce robot en chirurgie cardiaque. Ce problème de l'évaluation est essentiel si l'on veut être crédible pour développer ce genre de technique innovante.

Réponse : Même réponse.

Références

1. Pande R, Patle Y. The telecommunication revolution in the medical field: present applications and future perspective. *Curr Surg* 2003;6:636-40.
2. Marescaux J, Leroy J, Gagner M, Rubino F, Mutter D, Vix M. Transatlantic robot-assisted telesurgery. *Nature* 2001;413:379-80.
3. Cohn LH. Futures directions in cardiac surgery. *Am Heart Hosp J* 2006;4:174-8.
4. Katz R, Rosson G, Taylor J, Singh N. Robotics in microsurgery: use of a surgical robot to perform a free flap in a pig. *Microsurg* 2005;25: 566-9.
5. Nectoux E, Taleb C, Liverneaux. Nerve repair in telemicrosurgery: an experimental study. *J Reconstr Microsurg* 2009;4:261-5.
6. Taleb C, Nectoux E, Liverneaux P. Telemicrosurgery: a feasibility study in a rat model. *Chir Main* 2008;28:104-8.
7. Van der Hulst R. Microvascular anastomosis: is there a role for robotic surgery? *J Plast Reconstr Aesthet Surg* 2007;60:101-2.
8. Blavier A, Gaudissart Q, Cadière GB, Nyssen AS. Perceptual and instrumental impacts of robotic laparoscopy on surgical performance. *Surg Endosc* 2007;65:80-91.
9. Zorn KC. Robotic radical prostatectomy learning curve of a fellowship-trained laparoscopic surgeon. *J Endourol* 2007;21:441-7.
10. Peplinski R, Rhodes R. Economic aspects of starting a Da Vinci robotic surgery program. In: *Robotic Urology*, H John & P Wiklund (Eds.). Springer Berlin Heidelberg 2008: 253-261 pp.
11. Stephenson E, Sankholkar S, Ducko C, Damiano R. Robotically assisted microsurgery for endoscopic coronary artery bypass grafting. *Ann Thoracic Surg* 1998;66:1064-7.
12. Nelson B. Comparison of length of hospital stay between radical retropubic prostatectomy and robotic assisted laparoscopic prostatectomy. *J Urol* 2007;177:929-31.
13. Smith A, Smith J, Jayne DG. Telerobotics: surgery for the 21st century. *Surgery* 2006;24:74-8.
14. Liverneaux P, Nectoux E, Taleb C. The future of robotics in hand surgery. *Chir Main* 2009;28:278-85.