

Chirurgie robotique: l'avenir de la chirurgie prothétique?

Dr^s ÉRIC DROMZEE^{a,*}, HADRIEN STOLZ^{a,*}, HERMES MIOZZARI^a et Pr DIDIER HANNOUCHE^a

Rev Med Suisse 2018; 14: 2238-42

Les indications de mise en place des prothèses de hanche et de genou ne cesseront de croître au cours des prochaines années. Afin de parfaire la technique d'implantation, d'améliorer les résultats cliniques et de réduire la morbidité périopératoire, l'emploi de systèmes robotiques fait l'objet d'un intérêt grandissant depuis le début des années 90. Actuellement, les différents systèmes disponibles permettent assurément d'améliorer la reproductibilité et la précision de l'implantation des prothèses aux dépens de coûts encore élevés. Les résultats précoces en termes de survie des implants, de douleur et de mobilité post-opératoires sont encourageants. Des études au long terme seront nécessaires afin de confirmer ces derniers et valider l'efficacité clinique ainsi que l'intérêt médico-économique des robots en chirurgie orthopédique.

Robotic surgery: the future of prosthetic surgery?

Indications for hip and knee replacement will continue to grow over the next few years. Robotic systems have been developed since the early 1990s in order to optimize implant positioning, to potentially improve clinical results, and to reduce perioperative morbidity. Currently, the different available systems certainly improve the accuracy and reproducibility of prosthetic components placement. However, the cost of robotic surgery remains very high. Early results in terms of implant survival, postoperative pain, mobility, and length of stay are encouraging. Long-term studies are needed to validate the clinical efficacy and to perform a medico-economic evaluation of robots in orthopedic surgery.

INTRODUCTION

Les indications de mise en place de prothèses de hanche et de genou ne cessent de croître et des études récentes prévoient une augmentation de 142% du nombre de prothèses totales du genou (PTG) et de 219% de prothèses totales de la hanche (PTH) d'ici 2050 en Australie.¹ Aux Etats-Unis, cette augmentation sera de 143% pour les PTG aux mêmes dates.² Pour la Suisse, l'augmentation attendue est de 40% pour les PTH et de 100% pour les PTG au cours des dix prochaines années.³ Plusieurs facteurs expliquent cette croissance: le vieillissement de la population, l'augmentation de la prévalence de l'arthrose ainsi que celle de l'obésité et l'augmentation de l'offre de soins. Les bons résultats enregistrés à 10 ans, l'amé-

lioration des matériaux, les progrès réalisés sur le plan technique incitent aussi davantage les chirurgiens à proposer l'opération à des patients jeunes, désireux de maintenir un niveau élevé d'activités. La tendance actuelle est à la réalisation d'interventions moins invasives, moins traumatisantes, épargnant la musculature périarticulaire, permettant ainsi de raccourcir les durées d'hospitalisation, voire de réaliser ces procédures en ambulatoire. Cependant, malgré l'évolution des implants et l'amélioration des techniques, le taux d'insatisfaction des patients reste élevé, avec près de 20% de patients se disant mécontents après la mise en place d'une prothèse totale du genou,⁴ soit en raison de la persistance de douleurs, soit en raison d'une fonction qui ne correspond pas à leurs attentes.

La chirurgie robotisée s'inscrit dans une démarche globale de standardisation et d'amélioration de la qualité de prise en charge des patients. L'objectif escompté est de parfaire la technique d'implantation des prothèses, d'améliorer potentiellement les résultats cliniques, et de réduire la morbidité périopératoire. Le but de cet article est de présenter les principaux systèmes robotiques développés et de discuter les résultats cliniques publiés.

LES PRINCIPAUX ROBOTS UTILISÉS EN ORTHOPÉDIE

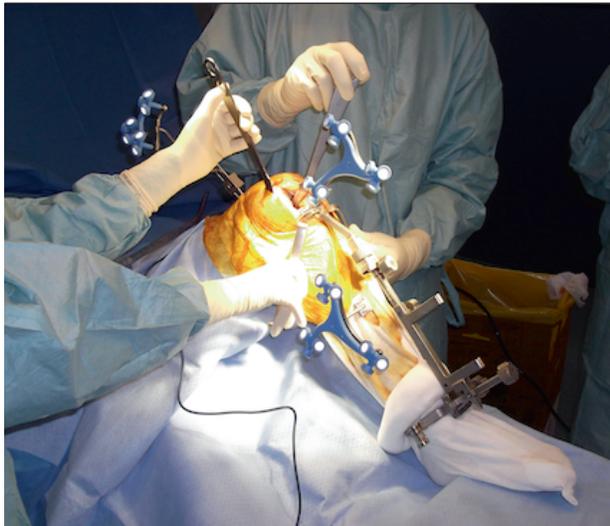
La chirurgie assistée par ordinateur a été l'une des évolutions marquantes apportées à la chirurgie orthopédique depuis la fin des années 1990.⁵ Elle permet de prédire et d'optimiser le geste chirurgical, de prévenir un certain nombre de complications peropératoires, et de s'assurer en continu pendant l'intervention que l'acte réalisé correspond à la planification préopératoire (**figure 1**). Brièvement, des capteurs sont fixés sur les segments osseux adjacents à l'articulation (fémur et tibia pour le genou; crête iliaque et fémur pour la hanche), et sont reconnus par une caméra infrarouge couplée à un ordinateur. Des repères anatomiques sont ensuite pointés par un instrument, lui-même reconnu par la caméra, de façon à permettre à l'ordinateur de reconstruire les segments osseux et l'articulation en 3 dimensions dans l'espace. L'intervention est ensuite menée en visualisant à l'écran l'articulation ainsi reconstruite, à l'aide d'instruments qui permettent de s'assurer en permanence du bon déroulement de l'opération. La chirurgie robotisée correspond à la forme la plus élaborée de la chirurgie assistée par ordinateur. A l'heure actuelle, les arthroplasties totales de hanche et de genou, et les arthroplasties unicompartimentaires du genou (PUC) sont les interventions pour lesquelles les robots sont les plus utilisés, suivies de la chirurgie du rachis.

^a Service d'orthopédie et traumatologie de l'appareil moteur, HUG, 1211 Genève 14 eric.dromzee@hcuge.ch | hadrien.stolz@hcuge.ch | hermes.miozzari@hcuge.ch didier.hannouche@hcuge.ch

* Ces deux auteurs ont contribué de manière équivalente à la rédaction de cet article.

FIG 1 Système de navigation conventionnel

Des capteurs sont fixés sur le fémur et sur le tibia, et sont reconnus par une caméra infrarouge permettant de réaliser les coupes osseuses, et de les vérifier en continu pendant l'intervention.

**FIG 2** Bras robotisé pour le fraisage et l'implantation d'une cupule de prothèse de hanche

Il existe 3 systèmes de chirurgie assistée par ordinateur:⁶

- les systèmes actifs: ces systèmes effectuent un travail autonome. Il s'agit de robots qui opèrent seuls sous le contrôle visuel du chirurgien et d'après une programmation préopératoire adaptée (*Robodoc*, Curexo Technology, Fremont, California, Etats-Unis; *CASPAR*, URS Ortho, Rastatt, Germany).
- Les systèmes semi-actifs ou comanipulés: le chirurgien est guidé mécaniquement dans certaines tâches qu'il réalise lui-même manuellement. Les outils de ces systèmes servent au positionnement d'instruments, de guides ou de gabarits (*MAKO*, Mako Surgical Corp. Stryker, Fort Lauderdale, Florida, Etats-Unis; *NAVIO PFS*, Blue Belt Technologies, Plymouth, Minnesota, Etats-Unis; *OMNIBotic*, OMNIlife Science, East Taunton, Massachusetts, Etats-Unis) (**figure 2**).
- Les systèmes passifs: ce sont les systèmes de navigation traditionnels; le chirurgien opère en s'aidant d'informations (visuelles ou sonores) apportées par l'ordinateur, mais il intervient seul pour réaliser le geste opératoire qu'il peut modifier ou interrompre à tout moment.

La liste des robots cités dans le présent article n'est pas exhaustive; elle reflète l'évolution historique des robots utilisés en chirurgie prothétique.

Utilisant la technologie *Robodoc*, Taylor et Burgar sont les premiers en 1992 à utiliser un système actif sur l'homme pour la mise en place d'une PTH.⁷ Ce système comprend deux composants: *Orthodoc*, un poste de travail informatisé équipé d'un logiciel de planification 3D préopératoire utilisant des images issues d'un scanner, et *Robodoc*, un robot chirurgical contrôlé par ordinateur. En peropératoire, des repères sont placés sur le champ opératoire et sont utilisés pour guider le fraisage du fût fémoral par le bras articulé. Par la suite, ce dernier a vu son champ d'utilisation s'agrandir à la PTG et à la PUC. Depuis 2014, la technologie *Robodoc* a été rebaptisée *TSolution-One*, et est commercialisée par la compagnie THINK Surgical Inc.

CASPAR (Computer Assisted Surgical Planning And Robotics) est le premier robot européen utilisé pour l'implantation de PTH et de PTG. Il se compose d'une console de planification préopératoire et d'un bras articulé réalisant les résections osseuses par fraisage de manière autonome. Cependant, à la différence du *Robodoc*, la planification préopératoire nécessitait la réalisation d'un CT-scan après la mise en place de 2 vis spécifiques fémorales et/ou tibiales lors d'une intervention chirurgicale préalable. Ce système a connu un échec commercial et a été abandonné.

Le système *MAKO* est un robot semi-actif, initialement développé pour l'implantation des PUC.⁸ Il est aujourd'hui aussi utilisé pour les PTH et PTG. La réalisation d'un CT-scan préopératoire est nécessaire à la planification de l'intervention. L'opération est effectuée sous contrôle d'un système de navigation et à l'aide d'un bras articulé limitant l'action du chirurgien. Si ce dernier sort de la zone de coupe planifiée, le robot s'arrête. La taille des implants et les résections osseuses peuvent être adaptées durant l'intervention grâce au système de navigation adjoint. Ce dernier permet également d'évaluer la cinématique de l'articulation et l'équilibrage ligamentaire pendant le geste.

La plateforme *NAVIO PFS* n'est actuellement proposée que pour les PUC.⁹ Elle ne nécessite aucune imagerie spécifique préopératoire, et n'est pas spécifique d'un implant en particulier. Elle se compose de 3 éléments, une caméra infrarouge, un écran tactile et une console pilotant une fraise robotisée. Lors du fraisage, le chirurgien a toute liberté de mouvement, mais le système robotique rétracte simplement la fraise lorsque l'on se situe hors de la zone planifiée.

Le système semi-actif *OMNIBotics* est un robot miniaturisé fixé dans l'épiphyse fémorale à l'aide de deux vis (*iBlock*). L'architecture du robot comprend deux degrés de liberté grâce à deux axes de rotation permettant un alignement pré-

cis des plans de coupes par ajustement manuel, sous contrôle du système de navigation. Tous les autres degrés de liberté sont automatiquement pris en charge par le système. Couplé à la station informatique OmniBotics, qui utilise la technologie du morphing osseux pour générer un modèle numérique 3D, le système permet de planifier la position et la taille des implants ainsi que la visualisation des coupes fémorales avant leur réalisation. La coupe tibiale est effectuée à l'aide du Nano-Block, qui est un bloc de résection réglable permettant également de visualiser la coupe osseuse et la taille de l'implant.

RÉSULTATS SELON L'INDICATION

Arthroplastie totale de hanche

La chirurgie assistée de robots améliore significativement la précision de l'acte opératoire tant dans le dimensionnement des implants que dans l'orientation des pièces prothétiques en comparaison aux chirurgies conventionnelles.^{7,10-12} Lim et coll.¹² ont constaté un meilleur alignement antéropostérieur du composant fémoral avec le groupe Robodoc par rapport aux témoins ($p=0,046$), à l'instar de Nishihara et coll.¹³ qui ont rapporté des résultats similaires pour ce même critère ($p=0,0001$). Ces derniers ont également comparé les images tomodensitométriques de la planification préopératoire aux images postopératoires et ont trouvé une différence moyenne inférieure à 1° dans les alignements antéropostérieur et médio-latéral. Domb et coll.¹⁰ ont démontré que l'utilisation du MAKO permettait un alignement ($p=0,001$), une inclinaison ($p=0,004$) et une antéversion ($p=0,002$) plus satisfaisants de la cupule acétabulaire. Les variations de longueur des membres inférieurs étaient également significativement moindres dans les groupes robotiques en comparaison aux groupes contrôles.^{14,15}

Bien que les études actuelles confirment des résultats radiologiques supérieurs, la controverse existe sur l'utilité de ces systèmes en termes cliniques. Honl et coll.¹⁴ ont rapporté des scores de Harris meilleurs à 1 an comparativement aux témoins. Cependant, Bargar et coll.⁷ ainsi que Bach et coll.¹⁶ n'ont trouvé aucune différence significative pour les scores de Harris modifiés et le score de qualité de vie SF-36 (36-Item Short Form Survey) entre les deux groupes, de même que pour les mobilités articulaires et l'analyse de la marche. Une méta-analyse récente de Chen et coll.¹⁷ incluant 7 études et impliquant 1516 patients ayant eu 522 PTH assistées par robot (Robodoc, CASPAR et MAKO) et 944 PTH conventionnelles ne rapporte pas non plus de différence significative entre les deux techniques, quel que soit le score utilisé (Harris, Merle d'Aubigné, WOMAC). Les premières publications en la matière ont montré un allongement du temps opératoire et une augmentation des pertes sanguines lors des premières utilisations du Robodoc et de CASPAR.^{6,7} Cependant, les plus récentes d'entre elles ne trouvent pas de différence significative entre ces deux paramètres.^{12,18} Nishihara et coll.¹⁹ ont quant à eux constaté des pertes sanguines inférieures avec le robot dans leur série. Le taux de révision semble similaire lors du suivi à court terme^{10,15,18,19} bien que Siebel et coll.²⁰ en rapportent 6% après chirurgie assistée, contre 3% après chirurgie conventionnelle sur une série de 71 PTH. Bargar et coll.²¹ ont publié l'étude ayant le plus long recul (14 ans) et n'ont noté aucune différence en termes de survie des implants. Le taux de frac-

tures et fissures peropératoires semblait inférieur dans le groupe robot^{15,18} (avec cependant un nombre d'événements faible dans chaque étude, rendant toute interprétation difficile), et le risque d'infections, de thromboses veineuses profondes, de lésions neurologiques ou de luxations était équivalent en comparaison avec la technique conventionnelle.²⁰

Arthroplastie totale de genou

Comme pour l'arthroplastie de hanche, la littérature actuelle démontre la supériorité des résultats radiologiques chez les patients ayant eu une intervention assistée par robot, y compris pour les déformations sévères (varus ou valgus > 7 degrés). Marchand et coll.²² ont réalisé une série de 330 PTG assistées par le MAKO, 261 étaient en varus dont 129 sévères et 46 en valgus dont 7 sévères. 64% des varus sévères ont été corrigés en position neutre (moyenne de 2 degrés, extrêmes 0-3 degrés) ainsi que la totalité des varus non sévères (moyenne 1 degré, extrêmes 1-3 degrés). Enfin, la totalité des valgus ont également retrouvé une position neutre (moyenne 2 degrés, extrêmes 0-3 degrés). Aucune hypercorrection n'a été constatée. Cette étude confirme les résultats des premières publications en la matière,^{23,24} qui montraient une supériorité en termes d'alignement mécanique des arthroplasties totales de genou réalisées à l'aide de CASPAR et Robodoc. Dans la série de Suero et coll.,²⁴ comparant 30 PTG robotiquement assistées à 64 PTG conventionnelles, l'utilisation du robot permettait de réduire significativement la variabilité de l'axe mécanique postopératoire ($p=0,0091$). Les résultats de ces travaux reflètent ceux de la majorité des séries actuelles dans ce domaine.²⁵⁻²⁸

Plusieurs études comparant les taux de complications et de reprise des PTG assistées par robot aux PTG conventionnelles n'ont trouvé aucune différence entre ces procédures.^{29,30} Song et coll.²⁷ n'ont pu observer d'accroissement des amplitudes articulaires ni des scores WOMAC (Western Ontario McMaster, index de qualité de vie des patients souffrant de douleurs du genou ou de la hanche) ou HSS (Hospital of Special Surgery score) grâce au robot, mais ils ont vu une amélioration de l'équilibrage ligamentaire au cours des cycles de flexion/extension. De même, dans une série comparative rétrospective de 113 opérations des genoux, Yang et coll.³¹ n'ont rapporté aucune différence dans les résultats fonctionnels, des scores WOMAC, HSS ou d'échelle visuelle analogique. Dans un essai clinique randomisé portant sur 60 genoux, Liow et coll.³⁰ rapportaient des résultats fonctionnels équivalents à six mois et à deux ans entre les 2 groupes, mais les scores de qualité de vie étaient en faveur de la chirurgie robotisée au recul de 2 ans. La série récente de Kayani et coll.³² a comparé les résultats de 2 séries consécutives de 40 patients opérés de façon conventionnelle ou avec un bras robotisé. L'utilisation du robot était associée à une réduction significative de la douleur postopératoire, de la consommation antalgique, des pertes sanguines, du délai du réveil du quadriceps, du nombre de séances de physiothérapie, et à une augmentation des mobilités articulaires en flexion à la sortie. La durée moyenne de séjour diminuait aussi de manière significative passant de 105 à 77 heures ($p < 0,001$). En ce qui concerne la durée opératoire et la perte de sang, la courbe d'apprentissage rapide liée à l'utilisation des robots permet d'espérer des résultats similaires aux techniques conventionnelles en 15 à 20 interventions^{26,33} et en 7 interventions selon Kayani et

coll.³⁴ En termes de survie des implants, une seule série avec un suivi à long terme est publiée (10 ans de recul moyen) et aucune différence n'a été notée,³¹ comme cela avait déjà été démontré pour les séries avec un recul plus court.^{24,27}

Arthroplastie unicompartmentaire de genou

Dans un essai clinique randomisé portant sur les PUC, Cobb et coll.³⁵ ont démontré que le rétablissement d'un axe mécanique dans le plan coronal avec une précision de 2 degrés était obtenu dans 100% des cas avec le robot tandis que les techniques conventionnelles n'y parvenaient que dans 40% des cas. Bell et coll.³⁶ ont également rapporté une plus grande reproductibilité, une précision accrue du positionnement, de l'alignement des implants tibiaux et fémoraux dans les 3 plans de l'espace ainsi qu'un meilleur équilibre ligamentaire avec le robot. Ceci a également été confirmé par de nombreux auteurs.³⁷⁻⁴⁰ Ponzio et coll.⁴¹ ont comparé l'épaisseur du polyéthylène de 8421 PUC assistées par robot et 27989 PUC conventionnelles. 93,6% des premières ont bénéficié d'inserts de 8 ou 9 mm versus 84,5% des secondes ($p < 0,0001$). Cela suggère que des coupes tibiales proximales plus fines ont été réalisées au cours des PUC robotiques, respectant ainsi les contraintes biomécaniques appliquées au tibia proximal et préservant le maximum de stock osseux.

La chirurgie robotisée dans la PUC n'augmente pas le taux de complications opératoires.^{40,42} Blyth et coll.⁴³ ont réalisé un essai clinique randomisé chez 139 patients entre PUC conventionnelle et assistée par robot. Les patients ayant eu une technique assistée par robot ont présenté une diminution de 55% des scores de la douleur à 8 semaines comparativement au groupe chirurgie conventionnelle, et des scores fonctionnels meilleurs à 3 mois. Cependant à un an de recul, il n'y avait plus de différence significative entre les 2 groupes. 92% des patients de la série de Kleeblad et coll.⁴⁴ se sont dits satisfaits ou très satisfaits de leur intervention assistée par robot. La grande majorité des publications actuelles rapportent des résultats similaires, cependant, aucune d'entre elles n'a rapporté d'impact de ces derniers sur la durée d'hospitalisation.^{44,45} De même que pour la PTG, la courbe d'apprentissage est courte (5 à 10 cas selon les séries), sans augmentation notable de la durée opératoire.⁴⁶⁻⁴⁸ Pearle et coll.⁴⁹ ont publié les résultats de leur étude prospective multicentrique incluant 797 patients (909 genoux) à un suivi moyen de 29,6 mois (extrêmes 22-52). Le taux de survie des implants était de 98,8%. Gilmour et coll.⁵⁰ ont retrouvé un taux de survie de 100% à 2 ans pour les PUC assistées par robot comparé à 97% pour les conventionnelles. Ces taux s'avèrent supérieurs à ceux des PUC conventionnelles retrouvés dans la plupart des registres nationaux sur une même période d'observation.⁵¹

LIMITES DE LA CHIRURGIE ROBOTISÉE

Les résultats des séries publiées sur la chirurgie robotisée doivent être interprétés avec prudence, la plupart ayant porté sur de faibles échantillons, et sur des patients probablement hautement sélectionnés.

Les coûts liés à ces technologies représentent le principal frein à leur diffusion. Il faut en moyenne déboursier plus d'1 million

de CHF pour l'achat d'un robot moderne et prévoir environ 100000 CHF de frais d'entretien annuels, incluant la formation du personnel médical et paramédical. Ce dernier aspect constitue également un frein à l'emploi de la chirurgie robotisée en raison de la nécessité de la présence d'une équipe formée et habituée au maniement de ces technologies pour le bon déroulement de l'intervention.

Actuellement, il existe peu de publications quant à la rentabilité des robots. Moschetti et coll.⁵² ont conclu que la PUC robotique était rentable par rapport à la traditionnelle si le volume annuel dépasse 94 cas par an, et si le taux de révision à 2 ans est inférieur à 1,2%. Swank et coll.⁵³ ont vu une rentabilité lorsque le nombre de cas atteint respectivement 50, 70 et 90 les 3 premières années. Seuls les centres ayant un grand volume de patients semblent donc en mesure d'espérer un retour sur investissement.

La réalisation d'un scanner préopératoire représente également une source d'augmentation des coûts. De plus, l'irradiation engendrée par cet examen ne doit pas être négligée. Ponzio et coll.⁴¹ ont constaté que la dose moyenne de rayonnement des scanners préopératoires requis pour la PUC assistée par un robot était de $4,8 \pm 3,0$ mSv, soit approximativement l'équivalent de 48 radiographies du thorax. Certains robots comme le NAVIO PFS ne nécessitent cependant pas ce type d'imagerie.

Les inconvénients inhérents à l'emploi de systèmes informatisés (mises à jour, pannes...) sont aussi, dans une moindre mesure, des freins à l'achat.⁵⁴ Enfin, certains systèmes robotiques sont «fermés», c'est à dire couplés à une seule prothèse, commercialisée par le même industriel. L'acquisition du robot impose alors l'utilisation d'une prothèse, qui dans certains cas doit encore faire la preuve de son efficacité sur le long terme.

CONCLUSION

L'utilisation des robots en chirurgie prothétique en orthopédie permet assurément d'améliorer la reproductibilité et la précision lors de l'implantation des prothèses. Le coût lié à l'emploi de cette technologie reste le principal facteur limitant sa démocratisation. Les résultats précoces en termes de survie des implants, de douleurs et de mobilité postopératoires sont encourageants, en particulier pour la prothèse totale et unicompartmentaire du genou. A l'heure de la diffusion et de la démocratisation des robots dans de nombreux domaines, la chirurgie assistée par robot est vouée à un bel avenir, surtout si elle devient moins chère, plus rapide, et plus efficiente. Des études au long terme seront certainement nécessaires pour évaluer leur efficacité clinique, et valider leur intérêt médico-économique en chirurgie orthopédique.

Conflit d'intérêts: Les auteurs n'ont déclaré aucun conflit d'intérêts en relation avec cet article.

IMPLICATIONS PRATIQUES

■ **Points forts:** La chirurgie robotisée améliore la reproductibilité et la précision dans le positionnement des implants lors des arthroplasties de hanche et de genou; les résultats précoces sont encourageants

■ **Points faibles:** Le coût financier des robots est un frein; ils doivent encore être évalués sur le plan médico-économique par des études à long terme

- 1 Inacio MCS, Graves SE, Pratt NL, Roughead EE, Nemes S. Increase in total joint arthroplasty projected from 2014 to 2046 in Australia: a conservative local model with international implications. *Clin Orthop Relat Res* 2017;475:2130-7.
- 2 Inacio MCS, Paxton EW, Graves SE, Namba RS, Nemes S. Projected increase in total knee arthroplasty in the United States – an alternative projection model. *Osteoarthritis Cartilage* 2017;25:1797-803.
- 3 Health at a glance. OECD Indicators. www.oecd.org/els/health-systems/49105858.pdf
- 4 * Hannouche D, Vieira Cardoso D, Miozzari H, Lubbeke A. La prothèse totale du genou répond-elle aux attentes des patients ? *Rev Med Suisse* 2017;13:2169-72.
- 5 Deep K, Shankar S, Mahendra A. Computer assisted navigation in total knee and hip arthroplasty. *SICOT J* 2017;3:50.
- 6 ** Jacofsky DJ, Allen M. Robotics in arthroplasty : a comprehensive review. *J Arthroplasty* 2016;31:2353-63.
- 7 Bargar WL, Bauer A, Borner M. Primary and revision total hip replacement using the robodoc system. *Clin Orthop Relat Res* 1998;82-91.
- 8 Werner SD, Stonestreet M, Jacofsky DJ. Makoplasty and the accuracy and efficacy of robotic-assisted arthroplasty. *Surg Technol Int* 2014;24:302-6.
- 9 Batailler C, White N, Ranaldi FM, et al. Improved implant position and lower revision rate with robotic-assisted unicompartmental knee arthroplasty. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2018; epub ahead of print.
- 10 Domb BG, El Bitar YF, Sadik AY, Stake CE, Botser IB. Comparison of robotic-assisted and conventional acetabular cup placement in THA: a matched-pair controlled study. *Clin Orthop Relat Res* 2014;472:329-36.
11. Hananouchi T, Sugano N, Nishii T, et al. Effect of robotic milling on periprosthetic bone remodeling. *J Orthop Res* 2007;25:1062-9.
- 12 Lim SJ, Kim SM, Lim BH, Moon YW, Park YS. Comparison of manual rasping and robotic milling for short metaphyseal-fitting stem implantation in total hip arthroplasty: a cadaveric study. *Comput Aided Surg* 2013;18:33-40.
- 13 Nishihara S, Sugano N, Nishii T, et al. Clinical accuracy evaluation of femoral canal preparation using the ROBODOC system. *J Orthop Sci* 2004;9:452-61.
- 14 * Honl M, Dierk O, Gauck C, 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.
- 15 * Nakamura N, Sugano N, Nishii T, Kakimoto A, Miki H. A comparison between robotic-assisted and manual implantation of cementless total hip arthroplasty. *Clin Orthop Relat Res* 2010;468:1072-81.
- 16 Bach CM, Winter P, Nogler M, et al. No functional impairment after Robodoc total hip arthroplasty: gait analysis in 25 patients. *Acta Orthop Scand* 2002;73:386-91.
- 17 ** Chen X, Xiong J, Wang P, et al. Robotic-assisted compared with conventional total hip arthroplasty: systematic review and meta-analysis. *Postgrad Med J* 2018;94:335-41.
- 18 Lim SJ, Ko KR, Park CW, Moon YW, Park YS. Robot-assisted primary cementless total hip arthroplasty with a short femoral stem: a prospective randomized short-term outcome study. *Comput Aided Surg* 2015;20:41-6.
- 19 Nishihara S, Sugano N, Nishii T, et al. Comparison between hand rasping and robotic milling for stem implantation in cementless total hip arthroplasty. *J Arthroplasty* 2006;21:957-66.
- 20 Siebel T, Kafer W. Clinical outcome following robotic assisted versus conventional total hip arthroplasty: a controlled and prospective study of seventy-one patients. *Z Orthop Ihre Grenzgeb* 2005;143:391-8.
- 21 ** Bargar WL, Parise CA, Hankins A, et al. Fourteen year follow-up of randomized clinical trials of active robotic-assisted total hip arthroplasty. *J Arthroplasty* 2018;33:810-4.
- 22 Marchand RC, Sodhi N, Khlopas A, et al. Coronal correction for severe deformity using robotic-assisted total knee arthroplasty. *J Knee Surg* 2018;31:2-5.
- 23 Borner M, Lahmer A, Wiesel U. Computer-assisted surgery for hip endoprosthesis. *Z Arztl Fortbild Qualitatssich* 1999;93:253-8.
- 24 Suero EM, Plaskos C, Dixon PL, Pearle AD. Adjustable cutting blocks improve alignment and surgical time in computer-assisted total knee replacement. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2012;20:1736-41.
- 25 Hampf EL, Chughtai M, Scholl LY, et al. Robotic-arm assisted total knee arthroplasty demonstrated greater accuracy and precision to plan compared with manual techniques. *J Knee Surg* 2018; epub ahead of print.
- 26 * Liow MH, Xia Z, Wong MK, et al. Robot-assisted total knee arthroplasty accurately restores the joint line and mechanical axis. A prospective randomised study. *J Arthroplasty* 2014;29:2373-7.
- 27 Song EK, Seon JK, Park SJ, et al. Simultaneous bilateral total knee arthroplasty with robotic and conventional techniques: a prospective, randomized study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2011;19:1069-76.
- 28 Yim JH, Song EK, Khan MS, Sun ZH, Seon JK. A comparison of classical and anatomical total knee alignment methods in robotic total knee arthroplasty: classical and anatomical knee alignment methods in TKA. *J Arthroplasty* 2013;28:932-7.
- 29 Sultan AA, Piuzei N, Khlopas A, et al. Utilization of robotic-arm assisted total knee arthroplasty for soft tissue protection. *Expert Rev Med Devices* 2017;14:925-7.
- 30 Liow MHL, Goh GS, Wong MK, et al. Robotic-assisted total knee arthroplasty may lead to improvement in quality-of-life measures: a 2-year follow-up of a prospective randomized trial. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2017;25:2942-51.
- 31 Yang HY, Seon JK, Shin YJ, Lim HA, Song EK. Robotic total knee arthroplasty with a cruciate-Retaining implant: a 10-year follow-up study. *Clin Orthop Surg* 2017;9:169-76.
- 32 ** Kayani B, Konan S, Tahmassebi J, Pietrzak JRT, Haddad FS. Robotic-arm assisted total knee arthroplasty is associated with improved early functional recovery and reduced time to hospital discharge compared with conventional jig-based total knee arthroplasty. *Bone Joint J* 2018;100-B:930-7.
- 33 Siebert W, Mai S, Kober R, Heeckt PF. Technique and first clinical results of robot-assisted total knee replacement. *Knee* 2002;9:173-80.
- 34 Kayani B, Konan S, Huq SS, Tahmassebi J, Haddad FS. Robotic-arm assisted total knee arthroplasty has a learning curve of seven cases for integration into the surgical workflow but no learning curve effect for accuracy of implant positioning. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 2018; epub ahead of print.
- 35 Cobb J, Henckel J, Gomes P, et al. Hands-on robotic unicompartmental knee replacement: a prospective, randomised controlled study of the acrobot system. *J Bone Joint Surg Br* 2006;88:188-97.
- 36 * Bell SW, Anthony I, Jones B, et al. Improved accuracy of component positioning with robotic-assisted unicompartmental knee arthroplasty: data from a prospective, randomized controlled study. *J Bone Joint Surg Am* 2016;98:627-35.
- 37 Citak M, Suero EM, Citak M, et al. Unicompartmental knee arthroplasty: is robotic technology more accurate than conventional technique? *Knee* 2013;20:268-71.
- 38 Keene G, Simpson D, Kalairajah Y. Limb alignment in computer-assisted minimally-invasive unicompartmental knee replacement. *J Bone Joint Surg Br* 2006;88:44-8.
- 39 Keeney JA. Innovations in total knee arthroplasty: improved technical precision, but unclear clinical benefits. *Orthopedics* 2016;39:217-20.
- 40 Lonner JH, Smith JR, Picard F, et al. High degree of accuracy of a novel image-free handheld robot for unicompartmental knee arthroplasty in a cadaveric study. *Clin Orthop Relat Res* 2015;473:206-12.
- 41 Ponzio DY, Lonner JH. Robotic technology produces more conservative tibial resection than conventional techniques in UKA. *Am J Orthop (Belle Mead NJ)* 2016;45:E465-E8.
- 42 Lonner JH, Moretti VM. The evolution of image-free robotic assistance in unicompartmental knee arthroplasty. *Am J Orthop (Belle Mead NJ)* 2016;45:249-54.
- 43 Blyth MJG, Anthony I, Rowe P, et al. Robotic arm-assisted versus conventional unicompartmental knee arthroplasty: exploratory secondary analysis of a randomised controlled trial. *Bone Joint Res* 2017;6:631-9.
- 44 Kleeblad LJ, Borus TA, Coon TM, et al. Midterm survivorship and patient satisfaction of robotic-arm-assisted medial unicompartmental knee arthroplasty: a multicenter study. *J Arthroplasty* 2018;33:1719-26.
- 45 Roche M. Robotic-assisted unicompartmental knee arthroplasty : the MAKO experience. *Clin Sports Med* 2014;33:123-32.
- 46 Coon TM. Integrating robotic technology into the operating room. *Am J Orthop (Belle Mead NJ)* 2009;38:7-9.
- 47 Karia M, Masjedi M, Andrews B, Jaffry Z, Cobb J. Robotic assistance enables inexperienced surgeons to perform unicompartmental knee arthroplasties on dry bone models with accuracy superior to conventional methods. *Adv Orthop* 2013;2013:481039.
- 48 Simons M, Riches P. The learning curve of robotically-assisted unicompartmental knee arthroplasty. *Bone Joint J Orthopaedic Proc Suppl* 2014;96:152.
- 49 Pearle AD, van der List JP, Lee L, et al. Survivorship and patient satisfaction of robotic-assisted medial unicompartmental knee arthroplasty at a minimum two-year follow-up. *Knee* 2017;24:419-28.
- 50 * Gilmour A, MacLean AD, Rowe PJ, et al. Robotic-arm-assisted vs conventional unicompartmental knee arthroplasty. The 2-year clinical outcomes of a randomized controlled trial. *J Arthroplasty* 2018;33:S109-15.
- 51 Australian Orthopaedic Association National Joint Replacement Surgery. 2016 Annual report, <https://aoanjrr.sahmri.com/annual-reports-2016>
- 52 Moschetti WE, Konopka JF, Rubash HE, Genuario JW. Can robot-assisted unicompartmental knee arthroplasty be cost-effective? A Markov decision analysis. *J Arthroplasty* 2016;31:759-65.
- 53 Swank ML, Alkire M, Condit M, Lonner JH. Technology and cost-effectiveness in knee arthroplasty: computer navigation and robotics. *Am J Orthop (Belle Mead NJ)* 2009;38:32-6.
- 54 * Chun YS, Kim KI, Cho YJ, et al. Causes and patterns of aborting a robot-assisted arthroplasty. *J Arthroplasty* 2011;26:621-5.

* à lire

** à lire absolument