

Planification 3D, instrumentation spécifique au patient et navigation peropératoire en arthroplastie d'épaule

Drs PATRICK GOETTI^a, FABIO BECCE^b, ALEXANDRE TERRIER^c et Pr ALAIN FARRON^a

Rev Med Suisse 2019; 15: 2299-302

La prothèse totale d'épaule permet de nos jours d'obtenir des résultats fiables tant sur le plan de l'antalgie que de la récupération des amplitudes articulaires. Le facteur clé limitant la survie de la prothèse reste le descellement de l'implant glénoïdien. Une orientation correcte de celui-ci permet une diminution du risque de complications. L'essor des nouvelles technologies permet la planification en trois dimensions (3D), la création d'instrumentation spécifique au patient ou encore la navigation peropératoire à l'aide de la réalité augmentée. Ces nouveaux outils ont été développés dans le but d'aider et d'améliorer la performance des chirurgiens. L'avenir devra déterminer si le gain en termes de précision chirurgicale pourra également se traduire par un bénéfice fonctionnel pour le patient et une survie augmentée des implants, notamment glénoïdiens.

Three-dimensional surgical planning, patient-specific instrumentation and intraoperative navigation in shoulder arthroplasty

Total shoulder arthroplasty has become an effective treatment option, for both pain relief and restoration of shoulder range of motion. The key factor limiting long-term prosthetic survival remains glenoid implant loosening. Proper glenoid implant positioning and orientation during surgery was shown to significantly reduce complication rates. The emergence of new technologies now allows for three-dimensional (3D) surgical planning, patient-specific instrumentation and augmented-reality-based intraoperative navigation. Such novel tools have been developed to aid and improve the surgeon's performance. The future will tell whether the gains in term of surgical precision will also translate into better functional outcomes for patients and prolonged survival of glenoid implants.

INTRODUCTION

La prothèse totale d'épaule est considérée comme une solution fiable dans la prise en charge des patients souffrant d'omarthrose (arthrose gléno-humérale).¹ Elle permet une diminution des douleurs mais également une amélioration significative de la mobilité de l'épaule.² Qu'il s'agisse de

prothèses avec un dessin anatomique ou inversé, les résultats à long terme sont liés au bon positionnement de l'implant glénoïdien.³ Le descellement de l'implant glénoïdien étant le facteur critique, son incidence rapportée avec un recul de 15 ans peut atteindre 66% à l'analyse radiologique, avec une chirurgie de révision nécessaire chez 20,6% des patients.⁴

Plusieurs facteurs associés au descellement précoce ont pu être identifiés. Il y a, d'une part, le fraisage excessif engendrant une perte du stock osseux sous-chondral, diminuant la stabilité initiale de l'implant et, d'autre part, l'insuffisance de correction des déformations préopératoires avec un positionnement de l'implant en rétroversion ou inclinaison excessive.⁵ Finalement, en cas d'usure marquée ou de rétroversion supérieure à 20°, la perforation de la corticale par le plot central de l'implant glénoïdien ne peut être garantie en utilisant une technique d'implantation standard.^{6,7}

Classiquement, la planification préopératoire des prothèses d'épaule se fait à l'aide de radiographies mesurées et des coupes en deux dimensions (2D) de la tomodensitométrie (CT) préopératoire. Bien que l'utilisation du CT ait permis une amélioration de la compréhension de l'anatomie de la glène, la fiabilité des mesures en 2D de la rétroversion ainsi que de l'inclinaison de la glène reste limitée.⁸

L'élaboration de logiciels permettant des mesures et une planification en 3D s'est développée et commercialisée ces dernières années. L'utilisation d'un guide de visée spécifique au patient (*patient-specific instrumentation*, PSI) ou de la navigation peropératoire sont les dernières innovations techniques en date pour améliorer la reproductibilité de la planification lors de la chirurgie.

PLANIFICATION EN TROIS DIMENSIONS

Plusieurs logiciels permettent actuellement une segmentation automatisée de l'omoplate et de l'humérus proximal sur la base des données natives du CT d'épaule (**figure 1**). Ceux-ci permettent des mesures automatisées et reproductibles des caractéristiques anatomiques de la glène (la rétroversion, l'inclinaison ou encore la subluxation postérieure de la tête humérale), et génèrent un gain de temps considérable par rapport à des mesures manuelles.⁹ Ces données sont très utiles afin de planifier le type et la taille optimale de l'implant. Le logiciel permet également de simuler les corrections obtenues, consécutives au positionnement de l'implant.

^aService d'orthopédie et de traumatologie, Département de l'appareil locomoteur, CHUV et Université de Lausanne, 1011 Lausanne, ^bService de radiodiagnostic et radiologie interventionnelle, Département de radiologie médicale, CHUV et Université de Lausanne, 1011 Lausanne, ^cLaboratoire de biomécanique en orthopédie, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Station 19, 1015 Lausanne

patrick.goetti@chuv.ch | fabio.becce@chuv.ch | alexandre.terrier@epfl.ch
alain.farron@chuv.ch

FIG 1 Segmentation et mesures automatisées à l'aide du logiciel de planification

Exemple de segmentation automatisée de l'anatomie osseuse de l'épaule gauche d'un patient souffrant d'omarthrose primaire à partir des données du CT préopératoire à l'aide du logiciel Blueprint (Wright-Tornier, Wright Medical Group, Memphis, TN, Etats-Unis). a) Image de la segmentation 3D, b) vue centrée sur la glène avec soustraction de l'humérus proximal, c) mesure automatisée en 2D de la version glénoïdienne, d) résumé des mesures des valeurs clés nécessaires à la planification de la prothèse.

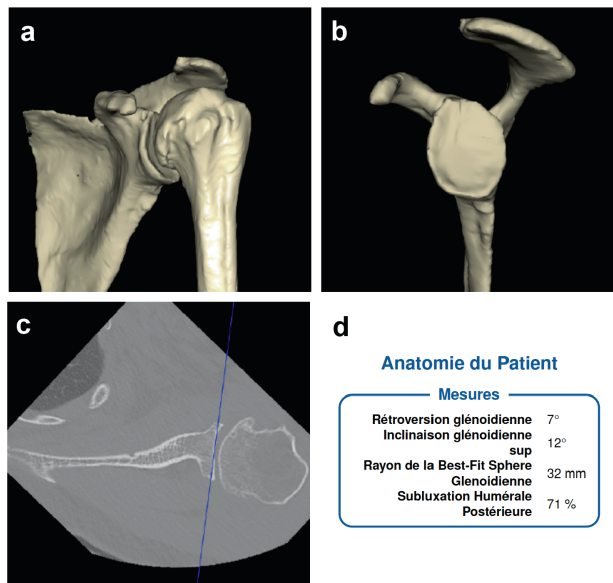
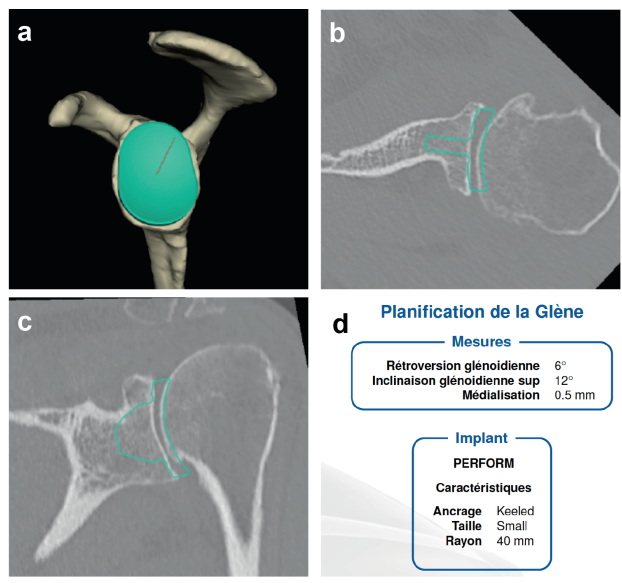


FIG 2 Planification 3D de la taille et du positionnement de l'implant glénoïdien

Exemple de planification de l'implant glénoïdien à l'aide du logiciel Blueprint (Wright-Tornier, Wright Medical Group, Memphis, TN, Etats-Unis). a) Simulation en 3D du positionnement de l'implant glénoïdien, b) vue axiale en 2D de la position de l'implant permettant d'évaluer la conformité avec l'os sous-jacent et le positionnement de la quille centrale, c) vue coronale en 2D du même implant, d) résumé du type d'implant planifié et des modifications de la version et de l'inclinaison glénoïdienne qui en découle.



Le chirurgien peut ainsi simuler l'intervention chirurgicale à sa guise en implantant de façon virtuelle la prothèse (figure 2). Cette étape aide l'opérateur à anticiper d'éventuelles difficultés techniques peropératoires. Cela permet notamment d'objectiver la survenue de conflits entre la prothèse et les structures osseuses avoisinantes lors de la mobilisation du bras.

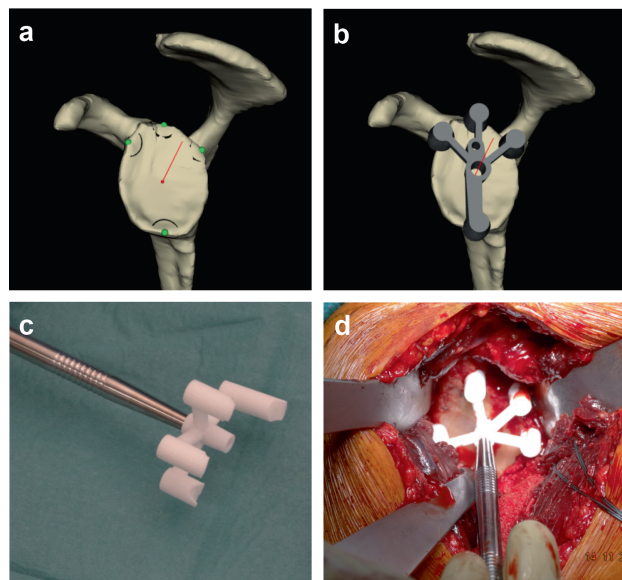
GUIDE DE VISÉE SPÉCIFIQUE AU PATIENT (PSI)

L'essor de la planification 3D est intimement lié à la création du guide de visée spécifique au patient. Lors de l'implantation d'une prothèse avec une instrumentation classique, le bon positionnement de l'implant repose entièrement sur une bonne interprétation par le chirurgien des repères anatomiques. Ce guide de visée spécifique au patient (PSI) est synthétisé à l'aide d'une imprimante 3D en se basant sur les données de la planification 3D préopératoire. C'est un moule qui épouse les rebords de la glène du patient et aide à reproduire l'orientation planifiée. En l'absence de repères fiables qui sont la conséquence d'une anatomie modifiée par l'arthrose, l'orientation et le positionnement adéquat de l'implant peuvent en effet s'avérer être une tâche ardue. Durant la chirurgie, le guide est ainsi appliqué directement sur les contours de la glène après résection minutieuse du cartilage, du labrum ainsi que des ligaments gléno-huméraux. Il permet ainsi une introduction contrôlée de la broche guide, étape clé pour le fraisage et le positionnement de l'implant glénoïdien (figure 3).

Le bénéfice en termes de précision chirurgicale de la combinaison d'une planification 3D et d'un guide PSI a pu être démontré

FIG 3 Planification, impression 3D et utilisation d'un guide spécifique au patient

Planification du guide de visée spécifique au patient (PSI) à l'aide du logiciel Blueprint (Wright-Tornier, Wright Medical Group, Memphis, TN, Etats-Unis). a) Sélection des repères osseux du rebord glénoïdien, b) simulation en 3D de la position du guide PSI une fois appliqué sur la glène, c) impression 3D du guide PSI qui permet l'utilisation de l'instrumentation standard pour la mise en place de la prothèse d'épaule, d) vue peropératoire avec le guide PSI en place permettant de poursuivre avec une instrumentation standard.



dans plusieurs études in vitro.¹⁰⁻¹² En comparaison à une planification et une instrumentation standard, la planification 3D couplée à un guide PSI améliorent la précision de la visée de 10° pour la version et l'inclinaison sur modèle d'os synthétique.¹¹ Une étude sur des cadavres a montré que la reproductibilité de la planification 3D à l'aide du guide PSI était excellente, avec une erreur moyenne de l'ordre de 1 à 2° à la fois pour la version et l'inclinaison.¹² La première étude randomisée in vivo a confirmé un gain de précision significatif ($p < 0,05$) par rapport à une planification et une instrumentation standard, avec un gain particulièrement significatif ($p < 0,001$) en cas de version glénoïdienne préopératoire marquée ($> 16^\circ$).¹³ Les études qui ont suivies et qui se sont intéressées à la reproductibilité de la planification préopératoire 3D rapportent des résultats plus contrastés.¹⁴⁻¹⁷ Une méta-analyse récente a cependant confirmé un bénéfice significatif de la navigation et des guides PSI dans le positionnement de l'implant glénoïdien.¹⁸

Les hypothèses soulevées par les auteurs quant au manque de précision sont multiples. Elles sont d'une part, propres à la technique chirurgicale qui nécessite une préparation minutieuse de la glène. Il faut d'autre part, préserver les ostéophytes (s'ils ont été choisis comme repère pour le guide), sans laisser de tissus mous (labrum, capsule/ligaments), au risque d'engendrer un positionnement aléatoire du guide PSI. L'exposition chirurgicale avec un bon relâchement du deltoïde permettant une rétraction postéro-inférieure de l'humérus représente également une étape critique lors de la préparation.¹³ Le guide PSI positionnant uniquement la broche guide, les étapes ultérieures de fraisage et d'impaction sont également sujettes à des imprécisions. Finalement, le positionnement du guide ne permettait pas initialement de contrôler la rotation de l'implant.¹⁴

NAVIGATION PEROPÉRATOIRE

Une alternative au guide PSI est la navigation peropératoire, dont l'avantage principal réside dans la projection en temps réel de la position des instruments sur le CT du patient, ne nécessitant pas une planification anticipée de plusieurs semaines nécessaire à l'impression 3D des guides PSI. Plusieurs systèmes ont été développés et semblent permettre un gain de précision par rapport à une instrumentation standard.¹⁹

Il existe des systèmes à capteurs optiques installés dans la salle d'opération. Après la validation de points de référence osseuse sur le patient, le logiciel permet une fusion avec le CT du patient. Un écran projette ensuite en direct la position de la broche guide et/ou de l'implant. Bien que ce système soit utilisé en chirurgie prothétique de la hanche et du genou, il n'a pas connu le même succès en arthroplastie de l'épaule. Ceci est dû au coût supplémentaire lié au dispositif, mais également à la durée opératoire allongée et surtout à l'échec du système nécessitant de recourir à une technique classique en peropératoire dans près d'un tiers des cas.^{20,21}

Une alternative est l'utilisation du CT peropératoire. Dans ce cas de figure, une référence est fixée sur l'omoplate en début d'intervention (généralement sur le processus coracoïde) et le patient bénéficie d'un CT en salle d'opération. Cette référence est repérée par des capteurs optiques et permet la navigation

en direct. Elle nécessite actuellement la mobilisation du patient anesthésié, cette étape pourrait cependant disparaître avec l'arrivée sur le marché d'amplificateur de brillance en 3D.²² A ce jour, il n'existe à notre connaissance qu'un seul système de navigation commercialisé pour l'arthroplastie d'épaule.²³

La révolution pourrait finalement venir de la réalité augmentée qui connaît un intérêt important en recherche préclinique.²⁴ Elle permet de surprojeter, à l'aide de lunettes spécifiquement développées, des informations utiles telles que la planification 3D ou les images CT sur le champ visuel du chirurgien. Cette interface offre une fluidité continue entre les gestes effectués par le chirurgien et les projections du CT préopératoire. Elle devrait à terme permettre de reconnaître les structures osseuses visualisées par le chirurgien pour une navigation en continu. Elle éliminerait les temps morts liés à l'acquisition des images ou à la visualisation de la projection sur un écran externe au champ chirurgical et donc permettrait un gain de temps par rapport aux techniques de navigation précitées. Les premiers rapports d'utilisation clinique sont encourageants, mais ont également identifiés des effets secondaires spécifiques chez l'utilisateur tels que des nausées.²⁵

NOTRE EXPÉRIENCE

L'utilisation de la combinaison d'une planification 3D avec des guides PSI dans notre service a débuté en 2014. Notre expérience porte actuellement sur 159 arthroplasties d'épaule, dont 71 prothèses de type anatomique et 88 prothèses de type inversé. Basée sur notre expérience, l'utilisation d'un guide PSI semble particulièrement utile en cas d'usure marquée asymétrique, de dysplasie, ou face aux modifications post-traumatiques de l'anatomie. L'emploi de toute nouvelle technique avec son utilisation nécessite des ajustements de l'exposition chirurgicale, ceux-ci sont cependant limités et ne devraient pas engendrer une courbe d'apprentissage prolongée.

DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Les résultats à court terme de l'utilisation de la planification 3D et des guides PSI sont encourageants. Les bénéfices potentiels liés au choix et au positionnement optimal de la prothèse sont multiples. Ceux-ci pourraient entre autres limiter le risque de luxation et de descellement précoce tout en optimisant la mobilité articulaire. Ils semblent particulièrement indiqués dans les cas complexes, tant dans un rôle didactique pour le jeune spécialiste qu'entre les mains d'experts.

La prudence reste cependant de mise en l'absence de résultats à long terme démontrant une supériorité des résultats fonctionnels et de la survie des implants par rapport à une instrumentation standard. Dans un contexte de croissance des dépenses dans le domaine de la santé, il sera également déterminant de vérifier si les coûts supplémentaires engendrés par l'acquisition d'un logiciel de planification et de la fabrication du guide PSI peuvent être justifiés par une augmentation de la survie des implants.

Finalement, l'essor des lunettes à réalité augmentée au cours des dernières années saura certainement trouver sa place en

chirurgie prothétique. Actuellement limitées à une projection de la planification 3D, elles pourraient dans le futur permettre une reconnaissance des contours osseux et ainsi de combiner planification 3D et navigation peropératoire.²⁶

CONCLUSION

Les avantages liés à la planification 3D semblent indéniables. L'essor des guides de visée PSI va dépendre de leur coût-bénéfice qui est intimement lié aux résultats cliniques à long terme. La navigation peropératoire, actuellement peu en vogue, pourrait connaître une renaissance si elle peut être intégrée de façon efficace à la réalité augmentée. La chirurgie orthopédique assistée par ordinateur est un secteur en plein essor. Avec des avantages potentiels multiples, qui vont d'une précision chirurgicale augmentée à une diminution d'exposition au rayonnement ionisant pour le patient et l'équipe opératoire, elle saura trouver sa place dans l'arsenal du chirurgien orthopédique.

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

IMPLICATIONS PRATIQUES

- Le descellement aseptique de l'implant glénoïdien est le facteur clé limitant la survie de la prothèse d'épaule
- Un positionnement adéquat de l'implant glénoïdien permet de limiter le risque de descellement aseptique
- La planification 3D, les guides de visée spécifique au patient (PSI) et la navigation peropératoire permettent tous les trois d'améliorer la précision chirurgicale lors de l'implantation d'une prothèse totale d'épaule
- Les données quant aux bénéfices pour le patient, en termes de survie augmentée des implants, d'amélioration des scores fonctionnels et de satisfaction, ainsi que de coût-bénéfice, vont être déterminantes pour le développement futur de ces technologies

1 Fenlin JM, Frieman BG. Indications, technique, and results of total shoulder arthroplasty in osteoarthritis. *Orthop Clin North Am* 1998;29:423-34.

2 Bryant D, Litchfield R, Sandow M, et al. A comparison of pain, strength, range of motion, and functional outcomes after hemiarthroplasty and total shoulder arthroplasty in patients with osteoarthritis of the shoulder. A systematic review and meta-analysis. *J Bone Joint Surg Am* 2005;87:1947-56.

3 Walch G, Young AA, Boileau P, et al. Patterns of loosening of polyethylene keeled glenoid components after shoulder arthroplasty for primary osteoarthritis: results of a multicenter study with more than five years of follow-up. *J Bone Joint Surg Am* 2012;94:145-50.

4 Young A, Walch G, Boileau P, et al. A multicentre study of the long-term results of using a flat-back polyethylene glenoid component in shoulder replacement for primary osteoarthritis. *J Bone Joint Surg Br* 2011;93:210-6.

5 Farron A, Terrier A, Büchler P. Risks of loosening of a prosthetic glenoid implanted in retroversion. *J Shoulder Elbow Surg* 2006;15:521-6.

6 Werner BS, Hudek R, Burkhart KJ, Gohlke F. The influence of three-dimensional planning on decision-making in total shoulder arthroplasty. *J Shoulder Elbow Surg* 2017;26:1477-83.

7 Iannotti JP, Greens C, Downing D, et al. Effect of glenoid deformity on glenoid

component placement in primary shoulder arthroplasty. *J Shoulder Elbow Surg* 2012;21:48-55.

8 Daggett M, Werner B, Gauci MO, et al. Comparison of glenoid inclination angle using different clinical imaging modalities. *J Shoulder Elbow Surg* 2016;25:180-5.

9 ** Boileau P, Cheval D, Gauci M-O, et al. Automated Three-Dimensional Measurement of Glenoid Version and Inclination in Arthritic Shoulders. *J Bone Joint Surg Am* 2018;100:57-65.

10 Throckmorton TW, Gulotta LV, Bonnarens FO, et al. Patient-specific targeting guides compared with traditional instrumentation for glenoid component placement in shoulder arthroplasty: a multi-surgeon study in 70 arthritic cadaver specimens. *J Shoulder Elbow Surg* 2015;24:965-71.

11 * Iannotti J, Baker J, Rodriguez E, et al. Three-dimensional preoperative planning software and a novel information transfer technology improve glenoid component positioning. *J Bone Joint Surg Am* 2014;96(9):e71.

12 Walch G, Vezeridis PS, Boileau P, et al. Three-dimensional planning and use of patient-specific guides improve glenoid component position: an in vitro study. *J Shoulder Elbow Surg* 2015;24:302-9.

13 Hendel MD, Bryan JA, Barsoum WK, et al. Comparison of patient-specific instruments with standard surgical instruments in determining glenoid component position: a randomized prospective

clinical trial. *J Bone Joint Surg Am* 2012;94:2167-75.

14 Berhouet J, Rol M, Spiry C, et al. Shoulder patient-specific guide: First experience in 10 patients indicates room for improvement. *Orthop Traumatol Surg Res* 2018;104:45-51.

15 * Gauci MO, Boileau P, Baba M, et al. Patient-specific glenoid guides provide accuracy and reproducibility in total shoulder arthroplasty. *Bone Joint J* 2016;98-B:1080-5.

16 Lau SC, Keith PPA. Patient-specific instrumentation for total shoulder arthroplasty: not as accurate as it would seem. *J Shoulder Elbow Surg* 2018;27:90-5.

17 Dallalana RJ, McMahon RA, East B, Geraghty L. Accuracy of patient-specific instrumentation in anatomic and reverse total shoulder arthroplasty. *Int J Shoulder Surg* 2016;10:59-66.

18 Burns DM, Frank T, Whyne CM, Henry PD. Glenoid component positioning and guidance techniques in anatomic and reverse total shoulder arthroplasty: A systematic review and meta-analysis. *Shoulder Elbow* 2019;11(2 Suppl):16-28.

19 Sadoghi P, Vavken J, Leithner A, Vavken P. Benefit of intraoperative navigation on glenoid component positioning during total shoulder arthroplasty. *Arch Orthop Trauma Surg* 2015;135:41-7.

20 Kircher J, Wiedemann M, Magosch P, et al. Improved accuracy of glenoid positioning in total shoulder arthroplasty with intraoperative navigation: a

prospective-randomized clinical study. *J Shoulder Elbow Surg* 2009;18:515-20.

21 Verborgt O, De Smedt T, Vanhees M, et al. Accuracy of placement of the glenoid component in reversed shoulder arthroplasty with and without navigation. *J Shoulder Elbow Surg* 2011;20:21-6.

22 * Theopold J, Pieroh P, Henkelmann R, Osterhoff G, Hepp P. Real-time intraoperative 3D image intensifier-based navigation in reversed shoulder arthroplasty- analyses of image quality. *BMC Musculoskelet Disord* 2019;20:262.

23 Barrett I, Ramakrishnan A, Cheung E. Safety and efficacy of intraoperative computer-navigated versus non-navigated shoulder arthroplasty at a tertiary referral. *Orthop Clin North Am* 2019;50:95-101.

24 Chytas D, Malahias M-A, Nikolaou VS. Augmented reality in orthopedics: current state and future directions. *Front Surg* 2019;6:38.

25 Ponce BA, Menendez ME, Oladeji LO, et al. Emerging technology in surgical education: combining real-time augmented reality and wearable computing devices. *Orthopedics* 2014;37:751-7.

26 ** Ma L, Fan Z, Ning G, et al. 3D Visualization and augmented reality for orthopedics. *Adv Exp Med Biol* 2018;1093:193-205.

* à lire

** à lire absolument