

Une révolution est en cours sur les écrans des blocs opératoires, où apparaissent de véritables modèles 3D des patients. À la clé, la promesse de gestes chirurgicaux plus précis.

PAR HUGO LEROUX

Et l'imagerie rendit le corps transparent

Lundi 4 décembre 2017, CHU de Rouen. Le docteur Jean-Marc Baste, spécialiste de la chirurgie mini-invasive entre dans le bloc opératoire. Après avoir salué son équipe, il affiche sur un écran la cartographie en trois dimensions de poumons. Ce sont ceux de la patiente qui, couchée sur le flanc et déjà anesthésiée, attend l'ablation d'une partie de son poumon droit, touché par une tumeur. Depuis son smartphone, le chirurgien fait pivoter l'entrelacs de ramifications blanches (les bronches) et bleues (les artères) sous tous les angles. Au centre de ce modèle reconstitué à partir des images 2D du scanner préopératoire saillie une boule jaune figurant la tumeur à extraire, large de un centimètre à peine.

L'opération s'annonce ardue : « Cette patiente présente une variation anatomique rare : trois artères irriguent la section pulmonaire à opérer, contre deux habituellement », indique Jean-Marc Baste à

TEMAISON AQUARIUS INTUITION

A La « fusion 3D » des organes du patient (ici, le cœur et ses artères au premier plan), réalisée à partir des images 2D du scanner, donne à voir au chirurgien l'invisible.

Les nouveaux outils

ses assistants, en zoomant sur la zone concernée. Une donnée qui modifie complètement le planning opératoire que s'apprête à suivre le chirurgien, depuis les manettes de son robot Da Vinci, utilisé dans ce bloc depuis 2012. Une fois la caméra endoscopique et les bras du robot insérés entre les côtes de la patiente, le chirurgien ne cessera de se reporter à cette « cartographie » gardée à portée de main sur son smartphone, particulièrement lors du moment crucial de la suture de la fameuse artère supplémentaire, étape indispensable pour retirer le morceau de poumon comportant la tumeur.

UNE ABLATION RÉDUITE À SON MINIMUM

« Sans cette cartographie 3D, je n'aurais pas su exactement où je naviguais », souffle le chirurgien au terme de l'opération, en disposant la section de poumon grosse comme un kiwi dans un récipient. Sans l'aide de la modélisation 3D, il aurait sans doute choisi, pour ne prendre aucun risque, de retirer l'ensemble du lobe supérieur du poumon. Une lobectomie qui aurait entraîné une durée d'hospitalisation plus longue et des douleurs postopératoires bien plus importantes pour la patiente.

Que cette jeune femme ait des poumons à l'anatomie atypique n'est pas une situation rare : « Sur des organes comme le foie ou le poumon, l'anatomie type que l'on apprend en faculté de médecine ne correspond qu'à 50 % des individus. Les 50 % restants possèdent des variations anatomiques qu'il est impossible de se représenter à partir des seules coupes 2D », souligne Luc Soler, fondateur de la start-up Visible Patient qui a construit le modèle numérique utilisé par Jean-Marc Baste. Cette émanation de l'Institut de recherche contre les cancers de l'appareil digestif (Ircad) s'est fait une spécialité de la fusion, selon le terme consacré, d'images médicales préopératoires obtenues par scanner

La moitié des individus présentent des variations anatomiques qu'il est impossible de visualiser à partir des seules coupes 2D

ou IRM. Non seulement ses logiciels assemblent ces coupes en 2D, mais surtout ils modélisent les contours de chaque organe grâce à des algorithmes d'intelligence artificielle.

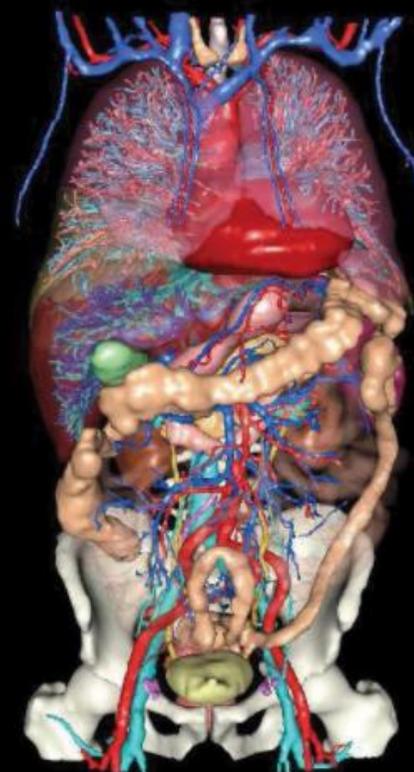
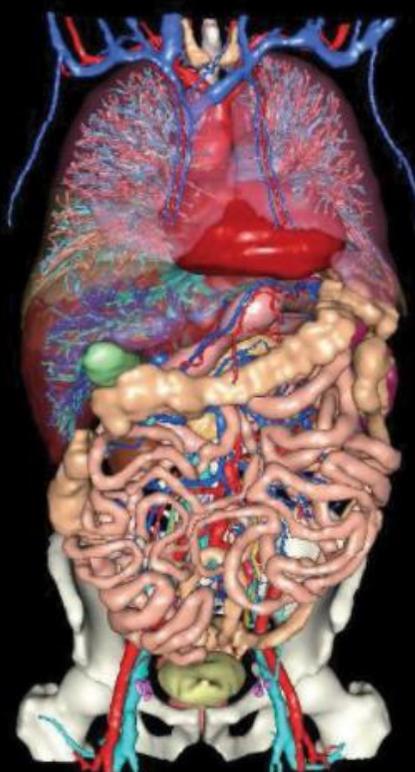
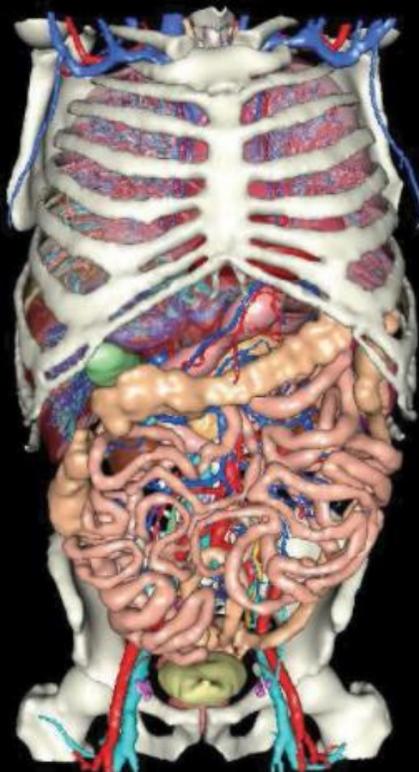
L'enjeu est celui du confort opératoire : « C'est un outil de plus vers une chirurgie mini-invasive, plus respectueuse du corps du patient », se félicite le docteur Baste. Employés en routine au sein l'unité de chirurgie thoracique au CHU de Rouen depuis le début de l'année 2017, ces reconstructions en

3D ne constituent que le premier stade d'une plus ample révolution du bloc opératoire.

La prochaine étape ? Caler ce modèle 3D sur le patient afin de guider le geste du chirurgien en direct lors de l'opération. Un modèle dynamique qui deviendra également plus accessible : visible dans un premier temps sur les écrans opératoires, il s'intégrera directement dans les postes de pilotage des robots chirurgicaux ou dans des lunettes de réalité augmentée pour les opérations manuelles. « On est encore à l'âge de pierre dans

l'utilisation de ces images 3D. Aujourd'hui, je dois les consulter sur mon smartphone ou sur un écran. Demain, elles fusionneront avec la robotique pour plus d'ergonomie », résume Jean-Marc Baste. Le patient deviendra alors véritablement transparent aux yeux du chirurgien !

Un avenir pas si lointain, puisque cette vision dynamique en 3D est déjà une réalité en chirurgie orthopédique. En effet, la start-up grenobloise Surgivisio a mis au point un véritable GPS pour



▲ Ces modèles en 3D de l'anatomie interne d'un patient ont été élaborés par des algorithmes d'intelligence artificielle à partir des images préopératoires obtenues par scanner ou IRM. Des modèles sur lesquels le chirurgien peut s'appuyer pour préparer de façon précise l'intervention chirurgicale.

la chirurgie du rachis. Dotée d'un scanner rotatif pour une représentation 3D rapide de la colonne vertébrale, sa machine montre au chirurgien la trajectoire précise de ses outils pendant l'opération, la position de l'outil et l'image étant calés en permanence sur les mouvements du patient (dus à sa respiration ou au geste chirurgical lui-même). Pour parvenir à ce « recalage dynamique », les caméras de l'appareil suivent des marqueurs fixés sur les vertèbres du patient, à même la peau : de simples boules blanches faciles à repérer.

À partir du mouvement de ces marqueurs, il est possible de prédire, par triangulation, les mouvements des os. Les instruments du chirurgien sont également munis de marqueurs, de manière à pouvoir suivre leurs mouvements à l'intérieur du corps du patient. « Parfois, les outils sont mal enfoncés, ce qui peut entraîner des complications ou la nécessité de refaire l'opération. Ce GPS sécurise le geste opératoire et réduit le risque d'erreur »,

UNE FLUORESCENCE RÉVÉLATRICE

Si les images en 3D promettent de guider le chirurgien durant les opérations, une autre technique, optique, s'annonce prometteuse pour la chirurgie des tissus mous : la fluorescence. Au CHU de Poitiers, l'urologue Olivier Celhay utilise ainsi des marqueurs fluorescents perfusés au patient pendant l'opération. Ils se fixent dans le système vasculaire et font ressortir, par simple projection d'une lumière ultraviolette, les tissus peu vascularisés de la tumeur rénale à enlever. L'opération est ainsi facilitée pour le chirurgien qui peut limiter au strict minimum la quantité de tissus sains à enlever autour de la tumeur, et le patient en retire plus de confort. Pour l'heure, seuls trois marqueurs sont autorisés à l'usage médical. « Il faudrait des marqueurs spécifiques aux différents types de pathologies. Mais le processus de validation clinique des nouveaux marqueurs est très long et coûteux », regrette Serge Mordon, directeur de recherche à l'Inserm, qui pointe une trop grande frilosité des autorités sanitaires françaises : « L'obtention de test clinique en France reste difficile, alors que beaucoup de ces marqueurs sont déjà autorisés à l'étranger. »

Les nouveaux outils

se félicite le professeur Jérôme Tonetti, chirurgien orthopédique au CHU de Grenoble. Ce dernier a présenté en décembre 2017 la première vertébroplastie effectuée grâce à cette technique, que le CHU proposera désormais en routine.

Reste maintenant à adapter ces systèmes de navigation chirurgicale aux tissus mous, par essence déformables et donc bien plus difficiles à « tracker » que les os. C'est ce qu'est en passe de réussir une autre start-up grenobloise, Koelis, qui fait figure de pionnière. Baptisé Trinity, son système est conçu pour faciliter, à partir d'une fusion d'images IRM, l'introduction de sondes à ultrasons au cœur de la prostate pour brûler la tumeur de manière ultra-précise et préserver au maximum les tissus sains.

Ce n'est pas un mince exploit : « Il est bien plus simple de guider un chirurgien pour enfoncer une

thérapeutique totalement satisfaisante n'ait été trouvée, faute notamment de traitement ciblé. Vérifier l'intérêt thérapeutique de ce système de visée ultraprécis sera tout l'objet de l'étude clinique pilote menée par l'équipe d'urologie de Nicolas Barry-Delongchamps à l'hôpital Cochin, à Paris, qui doit opérer une douzaine de patients en 2018.

DE PREMIERS ESSAIS AVEC LE FOIE

Au-delà de cette première application, les modèles biomécaniques progressent rapidement, non plus simplement pour guider des sondes, mais pour des opérations plus mouvantes comme l'ablation manuelle ou robotisée de tumeurs. Pour la chirurgie du foie, le CHU de Strasbourg a ainsi mené depuis 2010 une cinquantaine d'essais cliniques employant un recalage dynamique développé par Visible

Les systèmes de navigation chirurgicale doivent encore être adaptés aux tissus mous, plus difficiles à « tracker » que les os

vis sur une vertèbre que de guider un urologue pour enfoncer une sonde dans la prostate ! » témoigne Yohan Payan, directeur de l'équipe de recherche GMCAO (gestes médicaux-chirurgicaux assistés par ordinateur) au CNRS. Et pour cause : alors que l'os est toujours rigide, l'élasticité des organes et des tissus est propre à chaque patient. « Pour prévoir leur déformation, il faut élaborer des modèles biomécaniques qui deviennent rapidement très complexes et difficiles à faire tourner en temps réel avec une bonne précision », poursuit le chercheur.

Le fait que Koelis s'attaque d'abord à la prostate ne doit rien au hasard : avec quelque 54 000 diagnostics par an, le cancer de la prostate est le plus fréquent chez l'homme, sans qu'aucune solution

Patient. La start-up a peaufiné ses algorithmes pour qu'ils parviennent à s'attacher, en guise de repères, à des zones de peau aussi ténues que les tétons ou des grains de beauté du patient, dont le mouvement peut être corrélé à celui des organes. Des programmes qui sont également capables de reconnaître la texture des objets. Ils parviennent ainsi à identifier la main du chirurgien lorsque celle-ci s'interpose entre la caméra et la peau, de sorte que la main apparait bien au-dessus du modèle sur les écrans du bloc opératoire.

Bien qu'impressionnante, la technique est encore en cours d'affinage : « On parvient pour l'instant à une résolution d'image de 2 millimètres, or une précision chirurgicale nécessite de descendre



« AV Réalisées par la société Terarecon, ces images en 3D construites à partir d'imageries classiques en 2D permettent au chirurgien de se représenter son terrain d'intervention et de choisir la meilleure configuration opératoire. Reste à rendre ces images dynamiques pour les utiliser en temps réel au cours de l'opération dans un casque de réalité virtuelle. Un procédé qui devrait être testé pour la chirurgie vasculaire dès cette année.

LA NAVIGATION CHIRURGICALE, UNE ÉPOPÉE GRENOBLOISE

Surgivisio, Koelis, CHU de Grenoble, équipe Gestes médicaux-chirurgicaux assistés par ordinateur (GMCAO) du CNRS... si autant de noms grenoblois sont associés à l'imagerie médicale, ce n'est pas un hasard : la ville est l'un des berceaux européens de la robotique et de l'imagerie au service de la chirurgie. « Les premières tentatives

de fusion 3D d'imagerie remontent quasiment aux premiers appareils d'IRM, utilisés dans les années 1970 pour étudier le cerveau. Mais on a commencé à y voir un intérêt opératoire au début des années 1990 », confie Yohan Payan, directeur de l'équipe GMCAO du CNRS. L'université de Grenoble, le CHU et le CNRS décident alors de former des équipes

pionnières dans ces domaines. « On a commencé à travailler sur de la navigation chirurgicale en orthopédie, pour des prothèses de la hanche ou du genou. On parlait déjà à cette époque de GPS du chirurgien et de modèle 3D, même si les applications étaient loin d'être prêtes pour le bloc ! » « Aujourd'hui, ces systèmes rassurent le patient, mais

il y a trente ans, personne ne misait dessus ! » se souvient le fondateur de Surgivisio, Stéphane Lavallée, qui était dans l'équipe GMCAO dans les années 1990. Une persévérance payante : aujourd'hui, Grenoble est l'une des capitales mondiales des medtechs, avec quelque 140 entreprises et start-up spécialisées dans le domaine.

TERARECON/QUIRUS INTUITION



TROP DÉPENDANTS DE LA TECHNIQUE ?

Face aux progrès de la robotique et de l'imagerie, devons-nous craindre des chirurgiens toujours plus dépendants de la technologie, qui deviendraient peu à peu incompétents ? « Que le chirurgien soit remplacé un jour par le robot, c'est une possibilité qu'on ne peut pas écarter », concède Olivier Celhay, urologue au CHU de Poitiers. Mais, d'ici là, les progrès de l'imagerie pourraient plutôt améliorer l'apprentissage des chirurgiens : « Le côté immersif est un atout pédagogique considérable », note le chirurgien orthopédique Thomas Gregory, de l'AP-HP, qui au travers de ses lunettes de réalité augmentée peut rediffuser et analyser ses opérations en vue « première personne » pour ses étudiants. Une révolution également collaborative : les chirurgiens aguerris peuvent désormais assister et conseiller leurs pairs à l'autre bout du monde pour les opérations complexes. Le 5 décembre 2017, trois éminents spécialistes britanniques et américains ont ainsi suivi la première opération de Thomas Gregory à l'aide de lunettes Hololens, lui prodiguant des conseils aux moments clés et échangeant sur leurs expériences respectives.



« En décembre 2017, à l'hôpital Avicenne de Bobigny, le chirurgien Thomas Gregory a posé une prothèse d'épaule équipé d'un casque de réalité augmentée. Durant l'intervention (retransmise en direct sur Youtube), il a pu ainsi manipuler l'hologramme de l'anatomie osseuse de la patiente et s'assurer d'avoir la meilleure prise possible sur ses os.

à 1 millimètre. En parallèle, il faut multiplier les essais cliniques pour gagner encore en fiabilité », estime Luc Soler, pour qui cette navigation devrait devenir routinière pour le foie d'ici à 2021. Ce guidage intègre aussi la réalité augmentée. Le modèle 3D dynamique vient en effet se superposer à l'image de la caméra endoscopique dans les jumelles de la cabine de pilotage du robot Da Vinci. Le chirurgien peut ainsi visualiser les organes de son patient en transparence, sans lever les yeux pour consulter un écran ou un smartphone !

« La fusion des systèmes de navigation chirurgicale et des systèmes de réalité augmentée va

du chirurgien. Grâce au casque développé par Microsoft, Thomas Gregory a pu manipuler tout au long de l'intervention l'hologramme d'une reconstruction 3D de l'anatomie osseuse de la patiente.

Même si l'opération, très médiatisée, tenait plus du coup de communication que de la première médicale (d'autres chirurgiens français avaient déjà expérimenté les lunettes de réalité augmentée) et même si le chirurgien s'est contenté d'un simple visionnage du modèle 3D, sans recalage dynamique, « cette opération a eu le mérite de mettre en lumière les possibilités de la réalité augmentée aux yeux du grand public », commente Luc Soler de Visible

Patient. L'entreprise californienne TeraRecon, qui a produit le modèle 3D et la plateforme interactive pour l'opération, s'apprête d'ailleurs à incorporer un tel système de navigation chirurgicale dans le système Hololens pour la chirurgie vasculaire, avec l'aide du professeur Stéphane Haulon de l'hôpital Marie-Lannelongue, au Plessis-Robinson, en région parisienne. Grâce à une reconstitution en 3D des vaisseaux sanguins du patient, le chirurgien espère

pouvoir guider très précisément la pose de stent. Cette opération délicate consiste à inciser l'artère d'un patient dans un endroit accessible et peu traumatique, puis d'acheminer cette prothèse au moyen d'une sonde jusqu'à l'endroit fragilisé.

DES ARTÈRES VISIBLES SOUS LA PEAU

Stéphane Haulon parvient déjà à réaliser cet exploit, mais au prix d'un ensemble complexe d'équipements et d'imagerie assurant le guidage. « Demain, il sera possible de remplacer tout cela par un calage quasi instantané d'un modèle 3D obtenu à partir d'un simple scanner préopératoire. Grâce aux lunettes Hololens, les artères du patient pourront être observées directement à travers sa peau, ce qui fera gagner du temps et de l'espace dans le bloc opératoire », explique le chirurgien, qui évoque une première opération de ce type courant 2018, « lorsque les bénéfices pour le patient seront tout à fait certains », précise-t-il.

HÔPITAL AVICENNE AP-HP

Tous ces chirurgiens en pointe sur l'imagerie 3D ne doutent pas que ces technologies vont se répandre dans la majorité des blocs opératoires à moyen terme : « Aujourd'hui, les gens ne se posent pas la question de la fiabilité de leur pilote de ligne, car ils savent qu'il dispose dans son cockpit d'un

ensemble de technologies qui standardisent le vol. Il en sera bientôt de même avec la chirurgie qui, pour l'instant, dépend essentiellement de l'expérience et de la compétence du chirurgien », prophétise Thomas Gregory.

Reste une question cruciale : quel surcoût pour le système de santé ? Une fusion 3D de scanner coûte environ 500 euros par patient, ce qui s'ajoute à l'acquisition constante de matériels robotiques et d'imagerie. Toutefois, selon le professeur Jérôme Tonetti, du CHU de Grenoble, « il faut prendre en compte le gain de temps et la réduction des risques opératoires qui autorise des chirurgiens moins expérimentés à réaliser ces opérations de façon routinière. Surtout, tous ces moyens permettant d'opérer de manière moins traumatique, nous rapprochent d'une chirurgie ambulatoire pour laquelle le patient arriverait le matin et repartirait le soir. Lorsque l'on sait qu'une journée d'hospitalisation postopératoire coûte jusqu'à 4 800 euros dans notre service, les économies seront au rendez-vous. »

Sachant que le coût de ces technologies, encore récentes, baissera vraisemblablement à mesure qu'elles seront plus massivement adoptées, l'on serait bien en peine d'imaginer ce qui pourrait stopper leur conquête des blocs opératoires ! ●

Superposé dans des lunettes à l'image de l'endoscope, le modèle 3D permet de visualiser les organes du patient en transparence

se généraliser très vite », pronostique Thomas Gregory. Ce chirurgien orthopédique de l'hôpital Avicenne, à Bobigny, a effectué une opération très médiatique le 5 décembre dernier, en s'équipant pour sa part du casque de réalité augmentée Hololens. Relativement routinière, cette pose de prothèse d'épaule a été retransmise en direct sur la chaîne Youtube de l'AP-HP et donné l'occasion aux spectateurs de s'immerger dans le champ de vision