

L'anatomie 3D personnalisée appliquée à la chirurgie : du concept à la routine clinique

Patient Specific Anatomy: From Concept to Clinical Routine

Luc Soler [1,2], Didier Mutter [2,3], Jacques Marescaux [2,3]

1- *Visible Patient - 8, rue Gustave Adolphe Hirn 67000 Strasbourg.*

2- *Faculté de médecine - Université de Strasbourg.*

3- *IRCAD - 1, place de l'Hôpital 67091 Strasbourg.*

Résumé

L'imagerie médicale (scanner ou IRM) permet d'obtenir une vision de l'anatomie et des pathologies des patients à partir de coupes en niveaux de gris. Mais comment efficacement détecter une variation anatomique présente dans l'image à partir de ces coupes ? La solution réside dans des programmes de traitement d'images qui fournissent une reconstruction 3D de l'anatomie du patient. Pour réellement profiter de cette anatomie 3D personnalisée, il est nécessaire d'ajouter un logiciel de planification ou de simulation préopératoire qui permet de tester avant l'opération la stratégie chirurgicale sans risque pour le patient. Parmi les solutions disponibles une seule est aujourd'hui prise en charge en France à 100 % par un nombre croissant de mutuelles et assurances : la solution Visible Patient qui est un laboratoire d'analyse d'imagerie médicale en ligne. Nous illustrerons l'intérêt en chirurgie thoracique, digestive, urologique et pédiatrique de cette solution fournissant une anatomie 3D personnalisée en routine clinique. Nous proposons ici d'illustrer le processus de modélisation 3D et les avantages associés sur trois exemples de cas cliniques de patients dans ces domaines principaux. Dans chaque cas, nous présenterons les limites de l'analyse d'images médicales habituelles en raison d'une définition anatomique moyenne et d'une perception humaine limitée. La modélisation 3D est fournie par un service en ligne qui présente l'avantage d'être utilisable partout en France sans installation particulière et d'être prise en charge par un nombre croissant d'assurances et de mutuelles, rendant possible un usage en routine clinique. Nous comparerons le résultat obtenu à partir d'une analyse anatomique normale avec le résultat obtenu à partir de la modélisation 3D et de la planification préopératoire associée. Ces exemples illustrent l'important avantage de l'utilisation de la modélisation 3D patient-spécifique et de la planification virtuelle préopératoire par rapport à la définition anatomique habituelle utilisant uniquement des coupes d'images médicales. Ces exemples confirment également que cette nouvelle anatomie patient-spécifique corrige de nombreuses erreurs créées par la définition standard actuelle, augmentées par l'interprétation du médecin pouvant varier d'une personne à une autre.

Mots clés

- ◆ Anatomie
- ◆ Réalité virtuelle
- ◆ Simulation
- ◆ Planification chirurgicale virtuelle

Abstract

Medical imaging (CT-scan or MRI) allows to see patient anatomy and pathologies from gray level slices. But how to efficiently detect an anatomical variation in the image from these slices? The solution lies in image processing programs that provide a 3D reconstruction of patient anatomy. In order to truly take advantage of this personalized 3D anatomy, preoperative planning or simulation software has to be added so as to test the surgical strategy before surgery with no risk for the patient. Among the available solutions only one is currently 100% covered in France by an increasing number of private health insurances: The Visible Patient solution, which is an online medical image analysis laboratory. We will illustrate in thoracic, digestive, urologic and pediatric surgery the interest of this solution providing personalized 3D anatomy in clinical routine. In each case we will present the limits of usual medical image analysis due to an average anatomical definition and limited human perception. 3D modelling is provided by an online service that has the advantage of being usable anywhere in France without any specific infrastructure and being covered by a growing number of private health insurances, making it possible to use in clinical routine. We will then compare the result obtained from a normal anatomical analysis with the result obtained from the 3D modelling and associated preoperative planning. These examples illustrate the great benefit of using patient-specific 3D modelling and preoperative virtual planning in comparison with the usual anatomical definition using only medical image slices. These examples also confirm that this new patient-specific anatomy corrects many mistakes created by the current standard definition, increased by physician interpretation that can vary from one person to another

Keywords

- ◆ Anatomy
- ◆ Virtual reality
- ◆ Simulation
- ◆ Virtual Surgical planning

Correspondance

Luc Soler

Visible Patient - 8, rue Gustave Adolphe Hirn 67000 Strasbourg.

E-mail : luc.soler@visiblepatient.com - Tel : 03 68 66 81 91

Introduction

Il est impossible d'imaginer toute sorte de soins médicaux sans un minimum de connaissances anatomiques. Dans le cas de la chirurgie, un maximum de connaissances est indispensable. La « description anatomique moderne », introduite par André Vésale au XVI^{ème} siècle, repose sur une description de l'anatomie humaine de « l'homme vivant ou qui a vécu » représentée par une anatomie moyenne et standardisée. Mais les patients étant différents, cette anatomie moyenne a été complétée par des variations ou des exceptions. Depuis André Vésale, l'anatomie a été progressivement améliorée grâce à de nouvelles techniques et technologies, augmentant les variations mais rendant l'anatomie moyenne plus précise. Une telle définition de l'anatomie a un avantage majeur : elle permet aux médecins d'utiliser des noms et des étiquettes standardisés. Les procédures chirurgicales ont alors pu être plus facilement expliquées et décrites pour un meilleur partage des connaissances. Elle présente également un inconvénient : elle peut mener à une erreur lorsqu'on applique une anatomie normalisée à un patient présentant une variation anatomique. Heureusement, au cours du dernier siècle, l'imagerie médicale a ouvert la voie à une nouvelle révolution : l'anatomie interne d'un patient pouvait être vue sans aucune technique invasive. Cette imagerie médicale peut ainsi fournir des données anatomiques patient-spécifiques incluant la géométrie, la topologie et la fonction des organes. Mais certaines limites liées à ces nouvelles technologies sont apparues en parallèle. Premièrement, l'interprétation des informations de l'image médicale et des variations anatomiques visibles est entièrement dépendante des connaissances du médecin et peut varier d'une personne à une autre. Deuxièmement, de plus en plus de variations anatomiques sont découvertes au cours de l'analyse des images médicales ou au cours de l'exploration peropératoire, tous les patients étant différents. Ces limites peuvent induire des erreurs dans la description de l'anatomie du patient et parfois également dans la définition thérapeutique.

Le foie est ici l'illustration parfaite de telles limites. La chirurgie offre le plus important taux de réussite en cas de tumeur hépatique (plus de 50 % de taux de survie à 5 ans). Malheureusement, moins de 20 % des patients sont éligibles pour la chirurgie en raison de restrictions anatomiques. En effet, l'éligibilité repose sur différents critères et règles. Il est ainsi établi que deux segments hépatiques adjacents peuvent être séparés avec un flux vasculaire entrant et sortant adéquat, ainsi qu'un drainage biliaire, et que le résidu hépatique standardisé (FLR standardisé = volume hépatique restante/volume hépatique) doit être supérieur à 20 % chez les patients avec un foie par ailleurs normal, 30 % chez les patients ayant subi une chimiothérapie systémique extensive préopératoire et 40 % chez les patients présentant une maladie hépatique chronique existante telle que l'hépatite, la fibrose ou la cirrhose. La connaissance précise de l'anatomie hépatique du patient est ainsi un point clé de toute procédure chirurgicale, y compris la résection des tumeurs hépatiques ou la transplantation à partir d'un donneur vivant, l'éligibilité chirurgicale étant liée à la définition des segments hépatiques. Bien que définie de façon préopératoire, l'anatomie hépatique du patient reste parfois un défi. En effet, il existe aujourd'hui quatre définitions anatomiques principales utilisées en routine dans le monde entier : la définition des segments de Takasaki (1), principalement utilisée en Asie, la définition des secteurs de Goldsmith et Woodburn (2), principalement utilisée en Amérique du Nord, la définition corrigée des secteurs de Bismuth (3), principalement utilisée en Europe, et la définition des segments de Couinaud (4) utilisée dans le monde entier.

Ces définitions reposent sur l'étiquetage de la distribution de l'arbre portal dans le foie suivant des critères essentiellement géométriques quant à la position relative dans le foie : droite, milieu, gauche, antérieur, postérieur, latéral, médian et caudal. Nous pouvons également noter que les veines hépatiques définissent des limites de séparation entre des secteurs principaux dans les définitions de Goldsmith et Woodburn et Bismuth. Cet aperçu général illustre également clairement que la segmentation de Couinaud est la plus précise. Toutes les autres segmentations peuvent être obtenues en regroupant les segments de Couinaud dans différents ensembles. Mais la segmentation de Couinaud contient d'importantes erreurs. Platzer et Maurer (5) ont été les premiers à montrer en 1966 que la variabilité des contours de segments était trop importante pour qu'un schéma général soit viable. De nombreuses recherches (6-12), sont par la suite venues compléter cette première étude en apportant des résultats quantifiables grâce à l'imagerie médicale 3D. Couinaud (13) lui-même a décrit des anomalies topographiques en 2002. Dans 34 cas sur 111, (i.e. 30,36 % des cas), il a démontré que le secteur anatomique antérieur réel du foie (segment V + segment VIII) était différent de sa propre définition. Ceci peut avoir des conséquences chirurgicales. Ainsi, en serrant la veine paramédiane droite, les branches portales qui sont topologiquement considérées comme se situant dans le segment VI, trouvaient en fait leur origine dans la branche paramédiane droite et se situaient topologiquement dans le secteur antérieur du foie. Couinaud a conclu qu'il y avait une incohérence entre la topologie vasculaire et la topographie des segments qui pouvait être corrigée en utilisant nos logiciels (14) de modélisation 3D et de segmentation que nous avons validés cliniquement.

En fait, tous les patients ont une anatomie différente qui est d'autant plus difficile à prédire puisque certaines pathologies peuvent modifier la vascularisation. De plus, même si l'image médicale contient toutes les informations requises pour extraire la configuration anatomique patient-spécifique, il est trop complexe pour tout médecin de reconstruire mentalement cette anatomie en 3D à partir de l'ensemble de coupes 2D fournies par le système d'imagerie médicale. Afin de surmonter cette limite humaine, nous avons développé un système de chirurgie assistée par ordinateur au cours de 20 dernières années et ce système a été validé cliniquement (15-18), pour obtenir le marquage CE et l'agrément FDA pour l'utilisation clinique. Le système de chirurgie assistée par ordinateur qui en résulte est composé de plusieurs étapes : la modélisation 3D des patients, la planification chirurgicale préopératoire et l'utilisation peropératoire de cette assistance en réalité virtuelle. Dans ce chapitre, nous allons décrire la technique et illustrer ces divers éléments et résultats dans trois domaines principaux : la chirurgie hépatique, thoracique et rénale. Puis nous concluons sur le besoin réel d'une telle anatomie patient-spécifique reposant sur la modélisation 3D.

Matériel et méthodes

Le premier avantage attendu d'un système d'assistance par ordinateur appliqué à l'anatomie patient-spécifique est de fournir une manière rapide, efficace et simple de mettre en œuvre une vue de l'anatomie du patient. Tout logiciel Disponible en ligne sur www.academie-chirurgie.fr/publications/les-e-memoires

répondant à ce besoin devrait permettre de lire les images enregistrées au cours de la routine clinique en DICOM, le format standard international. De plus, un tel logiciel devrait fournir au moins deux types de rendus immédiats : une vue 2D des coupes de l'image et une vue 3D. Actuellement, il faut acheter la plupart des applications logicielles disponibles pour les consoles de visualisation des départements de radiologie, ou peuvent être téléchargées gratuitement sur internet. Osirix est le logiciel le plus connu et le plus utilisé, principalement par les radiologues. Bien que très complet, il présente deux inconvénients : il ne fonctionne que sur MacOS et son interface utilisateur n'est pas particulièrement intuitive pour les chirurgiens car elle est trop similaire au logiciel des consoles de post-traitement utilisées en radiologie. Qu'elles soient gratuites ou qu'il faille les payer, nous avons remarqué que ces applications logicielles sont très peu utilisées par les chirurgiens en raison de leur complexité : l'interface utilisateur est submergée d'options compliquées et une formation longue est parfois nécessaire pour pouvoir utiliser le logiciel.

Afin de surmonter cet inconvénient récurrent, nous avons développé un logiciel gratuit à l'instar d'Osirix™, Visible Patient Planning™ (©Visible Patient 2014 <https://www.visiblepatient.com/en/products/software>). La version gratuite d'Osirix n'est toutefois pas certifiée, à l'inverse du logiciel Visible Patient Planning qui est marqué CE et approuvé par la FDA (510k). De plus, Visible Patient Planning fonctionne sous MacOS et Windows. Peu importe que vous utilisiez un poste de travail, Osirix ou Visible Patient Planning, le premier avantage pour les chirurgiens est le rendu volumique direct qui est automatiquement calculé par le logiciel à partir des coupes TDM ou IRM de l'image DICOM (figure 1). Cette technique gratuite peut suffire à une bonne visualisation 3D des structures anatomiques et pathologiques et peut donc être un outil utile pour la planification préopératoire. Afin de voir les structures internes, le niveau de gris initial des voxels est remplacé par une couleur de voxel associée et la transparence. Cette transparence permet de distinguer des structures anatomiques et pathologiques plus contrastées, même lorsqu'elles ne sont pas délimitées dans la réalité. Ce volume peut également être découpé le long des trois axes principaux (axial, frontal ou sagittal) ou avec un plan oblique contrôlé par la souris. En routine clinique, le rendu volumique direct peut présenter un important intérêt préopératoire. C'est le cas de toutes les malformations congénitales, en particulier les malformations vasculaires ou osseuses, mais également les pathologies thoraciques et digestives.

Le rendu volumique direct est donc un outil très utile car il est gratuitement accessible sans prétraitement, mais il a néanmoins certaines limites. Il ne peut ni fournir le volume des organes ni leurs dimensions car ces organes ne sont pas délimités. Pour la même raison, il n'est pas possible de fournir un volume après résection, ou de découper une section de ces structures sans découper des structures avoisinantes (figure 1).

Afin de surmonter cette limite, chaque structure anatomique et pathologique dans l'image médicale doit être délimitée. Une telle délimitation, appelée « segmentation », peut être effectuée grâce à un poste de travail spécifique disponible sur le marché (Myrian™ d'Intrasense, Synapse™ de Fuji) ou à travers un service en ligne à distance qui peut être comparé à un laboratoire d'analyses médicales (Visible Patient Service). Dans la première solution, les hôpitaux payent pour un poste de travail puis les médecins l'utilisent pour réaliser des modélisations 3D eux-mêmes. Dans la deuxième solution, les hôpitaux payent l'analyse d'images pour chaque patient comme ils le feraient pour une analyse biologique. De plus, cette solution de paiement au cas est à présent prise en charge par certaines mutuelles françaises (plus de 60 % de la population française sera ainsi couverte en 2019), ce qui la rend plus facilement accessible. Chaque solution (sur site ou en ligne) permet un rendu surfacique 3D des organes ainsi que le calcul volumique des structures délimitées. Dans cet ensemble de solutions, le service Visible Patient est aujourd'hui le seul service disponible pour toute partie du corps humain et pour toute pathologie ou organe du bébé à l'adulte. Le résultat de la procédure de modélisation 3D peut être visualisé à partir du logiciel gratuit Visible Patient Planning grâce au rendu surfacique et peut également être fusionné avec le rendu volumique (figure 2).

Ce rendu surfacique des structures délimitées offre une vue anatomique plus avancée du patient. Il demeure toutefois insuffisant pour plusieurs chirurgies telles que la résection partielle qui requiert l'évaluation préopératoire des volumes futurs restants après résection. Des solutions plus avancées donnent ainsi la possibilité de simuler la résection virtuelle et d'obtenir le volume restant avant même l'opération. Certains logiciels, tel que Myrian™, offrent cette possibilité à partir de plans de coupe virtuels. D'autres, tels que Synapse™ ou Visible Patient Planning™, ont une approche davantage orientée vers l'anatomie reposant sur la simulation de territoires vasculaires et la pose virtuelle de clips avec positionnement interactif (figure 3).

En définissant les territoires vasculaires, l'anatomie patient-spécifique qui en résulte n'est alors pas seulement une anatomie à géométrie patient-spécifique mais également une anatomie fonctionnelle qui peut être utilisée de manière préopératoire afin de définir une procédure chirurgicale avec plus de précision. Elle peut également servir de manière peropératoire pour guider les chirurgiens grâce au développement d'outils peropératoires. Le logiciel Visible Patient Planning™ peut notamment être apporté dans la salle d'opération afin de visualiser directement le résultat sur un ordinateur portable ou un smartphone, ou indirectement en le branchant sur un écran de la salle d'opération ou sur un robot chirurgical tel que le robot Da-Vinci d'Intuitive Surgical (figure 4).

Pour illustrer les bénéfices cliniques de cette anatomie patient-spécifique assistée par ordinateur et du système de planification chirurgicale, pendant plusieurs années, nous les avons appliqués à une large palette de procédures chirurgicales, notamment digestive, thoracique, urologique, endocrine et pédiatrique. Nous limiterons ici notre description des bénéfices cliniques aux trois mêmes patients illustrés sur les figures 1 à 3. Nous donnerons ensuite d'autres références d'articles illustrant les bénéfices cliniques d'une telle anatomie patient-spécifique assistée par ordinateur avant de conclure.

Résultats

Le premier patient était âgé de 55 ans et on lui avait diagnostiqué un hépatocarcinome. De l'image TDM seule, une seule tumeur était détectée à l'arrière de la veine hépatique droite (cercle jaune à gauche sur l'image 5), soit la partie la plus à

droite du foie. La modélisation 3D en ligne de Visible Patient a montré un nodule additionnel (cercle rouge sur les figures 5 et 6), validé par le radiologue après une deuxième analyse de l'image médicale comme étant une tumeur hépatique potentielle. Cette seconde tumeur se situait entre la veine hépatique médiane et la veine hépatique droite, soit à nouveau dans le foie droit. Additionnellement, le service de radiologie a diagnostiqué un volume hépatique droit d'environ 60 % du volume hépatique global, mais ce volume a été calculé sans le logiciel Visible Patient Planning. En analysant cette analyse radiologique et en utilisant des repères anatomiques standard, l'équipe chirurgicale pensait à une résection hépatique droite, la position de la deuxième tumeur (cercle rouge) étant trop profonde et en contact avec des vaisseaux avoisinant trop larges pour être réséquée ou brûlée via thermoablation.

Mais en utilisant le logiciel Visible Patient Planning, les chirurgiens ont simulé cette résection hépatique droite en agrafant virtuellement la branche droite. Le territoire orange sur la figure 6 montre le foie droit, mais aucune tumeur ne se situait dans ce territoire réel de la veine porte ne représentant que 45 % du volume hépatique. A l'inverse, en agrafant virtuellement la branche portale gauche (territoire bleu sur l'image 6), les deux tumeurs sont apparues dans le foie gauche dévascularisé représentant 55 % du volume hépatique. Enfin, en analysant plus précisément la raison de cette erreur, on voit facilement en 3D que ce patient n'avait pas de branche paramédiane droite permettant l'apport sanguin aux segments 5 et 8. Une nouvelle branche inhabituelle venant de la branche portale gauche apportait le sang d'un territoire localisé dans la zone inhabituelle du segment 8, mais était vascularisés par la branche portale gauche. La pose virtuelle de clips sur cette branche a donc donné le plus petit territoire à réséquer (13,3 % du volume hépatique, zone bleue de l'image gauche de la figure 3).

Cet exemple illustre le problème bien connu des variations anatomiques du foie déjà décrites par Couinaud (13) et que nous avons récemment pointées dans un article (19). En fait, les études (16,20), montrent que dans plus d'un tiers des interventions chirurgicales hépatiques la modélisation 3D et la simulation préopératoire permettent de corriger des imperfections ou des erreurs de la planification chirurgicale initiale. Une autre étude (21) montre que pour certaines interventions le temps opératoire peut être réduit de 25 % et les complications peuvent diminuer de plus d'un tiers. Ces résultats impressionnants en lien avec l'analyse de Couinaud illustrent les importantes variations anatomiques du foie et leurs potentielles conséquences dans le choix du traitement. Ils illustrent également l'important bénéfice d'utiliser de manière préopératoire des modélisations 3D patient-spécifiques assistées par ordinateur afin d'éviter de telles erreurs d'interprétation des images médicales en chirurgie hépatique. Mais qu'en est-il de la chirurgie du poumon ?

De fait, les cancers du poumon sont traités de nos jours comme le foie, en réséquant la partie malade de l'arbre bronchique, un peu comme les branches malades d'un arbre afin de préserver la partie saine. Tout comme pour la chirurgie du foie, la difficulté résidera dans la définition des territoires de cet arbre bronchique, qui sont très compliqués à identifier depuis une simple image scanner. C'est d'autant plus complexe que la pathologie, cancéreuse ou non, peut localement modifier l'anatomie ou masquer des repères présents dans l'image. Le deuxième exemple illustré sur les figures 1 à 3 est un enfant de 6 mois avec un kyste pulmonaire dû à la maladie adénomatoïde kystique du poumon, une pathologie des voies respiratoires qui requiert la résection de la partie malade de l'arbre bronchique, comme pour une pathologie tumorale. À partir de l'image scanner de l'enfant, le kyste créé par cette maladie (partie noire au centre de l'image gauche de la figure 7) semblait localisé dans le lobe supérieur du poumon droit. Tel était le diagnostic posé par l'équipe de radiologie et validé par l'équipe chirurgicale. Mais après la modélisation 3D en ligne délivrée par le service Visible Patient, la pose virtuelle de clips réalisée par le chirurgien a montré que le kyste (en vert sur l'image droite de la figure 7) ne se situe pas dans le lobe supérieur droit (en jaune). Grâce à cette modélisation 3D, la chirurgie a été modifiée et parfaitement réalisée, validant ainsi l'efficacité de la simulation préopératoire.

En fait, la modélisation 3D offre les mêmes bénéfices dans la résection des tumeurs pulmonaires que pour les tumeurs hépatiques. La pose virtuelle préopératoire de clips permet ainsi de simuler les territoires bronchiques et de simuler les territoires hépatiques de la veine porte. De plus, la modélisation 3D des structures internes des poumons n'est pas limitée au système bronchique mais inclut également les artères et les veines pulmonaires. Cela permet d'éviter les erreurs de définition de territoires et d'améliorer la planification de la thérapie chirurgicale, comme le valide plusieurs articles et études cliniques récentes (22-25).

Ces deux premiers exemples d'application ont illustré les bénéfices de l'anatomie 3D patient-spécifique assistée par ordinateur pour les procédures chirurgicales utilisant la définition de l'anatomie fonctionnelle. Le foie et les poumons ont des territoires vasculaires anatomiquement définis que des variations anatomiques peuvent perturber et ainsi créer des erreurs dans le choix du traitement. Enfin, nous proposons de conclure avec les reins qui ne disposent pas d'une segmentation anatomique fonctionnelle car leurs variations de vascularisation sont trop importantes.

Le troisième exemple, illustré sur les figures 1 à 3, était un patient de cinq ans, diagnostiqué avec un double néphroblastome. Bien que ce cancer soit fréquent chez l'adulte (plus de 13.000 nouveaux patients chaque année), que très peu d'enfants sont concernés chaque année en France (130 nouveaux patients par année). À partir de l'image scanner seule (à gauche sur la figure 8), l'équipe chirurgicale experte pour ce genre de chirurgie propose de réséquer la moitié du rein droit et la résection totale du rein gauche, où selon les images l'invasion tumorale est trop importante. Cette chirurgie induira nécessairement une insuffisance rénale qui se traduira par six mois de dialyse au maximum. Ces 6 mois permettront de vérifier qu'aucune nouvelle repousse tumorale n'apparaît dans la partie inférieure du rein droit restant. Après ces six mois, et si aucune tumeur n'est apparue, une transplantation du rein gauche sera proposée. La transplantation augmentera l'espérance de vie de l'enfant de plus de 50 ans, mais impliquera aussi un traitement antirejet à vie. Cette proposition thérapeutique est soumise à une deuxième équipe, également experte de ce genre de pathologie, pour un deuxième avis médical. La deuxième équipe valide entièrement ce choix de traitement.

À partir de la modélisation et en utilisant le logiciel VISIBLE PATIENT Planning™, le chirurgien simule la pose virtuelle de clips (agrafage de vaisseaux) et valide qu'il est possible de réséquer uniquement la moitié du rein droit, 50,9 % du rein droit restant fonctionnel après chirurgie. Mais la surprise vient du rein gauche, car en simulant l'opération, le chirurgien voit qu'il

peut préserver un tiers du rein fonctionnel. Pourtant, le calcul du volume fourni par le logiciel montre que les deux parties de rein restant sur la gauche et sur la droite après chirurgie auront un volume légèrement plus important que le volume d'un rein chez un enfant de cet âge et de cette taille. Ainsi, le choix chirurgical est modifié et une chirurgie de conservation de la partie fonctionnelle du rein gauche est proposée et validée par une deuxième équipe. La chirurgie se fait en deux étapes. En janvier 2018, et à la fin du mois de janvier, aucune insuffisance rénale n'a été notée après résection de la partie malade des deux reins de l'enfant. L'enfant est retourné à l'école en février. Un an plus tard, l'image de contrôle ne montre aucune repousse tumorale et l'enfant est en parfait état de santé (image droite).

Comme l'illustre cet exemple, le même bénéfice observé pour le foie et les poumons est également obtenu pour les reins en utilisant la pose virtuelle de clips sur la modélisation 3D assistée par ordinateur du patient. Une telle modélisation 3D peut être utilisée pour toute autre chirurgie et pathologie urologique telle que la dilatation du bassinet (figure 9 à gauche), l'ectopie rénale croisée (figure 9 au centre) ou la transplantation rénale (figure 9 à droite). Dans tous les cas, la visualisation 3D précise des structures vasculaires, des uretères et des organes avoisinants apporte un bénéfice majeur lors de la planification de l'acte chirurgical (26,27).

Discussion et conclusion

Ces trois exemples illustrent l'important bénéfice qu'apporte l'utilisation des modèles 3D patient-spécifiques et la planification virtuelle préopératoire comparés à la définition anatomique habituelle qui n'utilise que les coupes des images médicales. Ils confirment également que cette nouvelle anatomie patient-spécifique corrige le nombre important d'erreurs créées par l'actuelle définition standard, augmentée par l'interprétation du médecin qui peut varier d'une personne à l'autre. Une telle anatomie patient-spécifique reposant sur la modélisation 3D à partir de l'imagerie médicale du patient devrait à présent être utilisée pour proposer une nouvelle définition anatomique.

Ainsi, dans un article récent (19), nous avons proposé une nouvelle segmentation anatomique du foie qui repose sur quatre règles principales à appliquer afin de corriger les erreurs topologiques des quatre principales segmentations standard. Dans le passé, le seul moyen de corriger des erreurs anatomiques courantes était de clamer les vaisseaux pendant l'opération, les territoires vasculaires associés apparaissant alors clairement. En appliquant ces règles et en utilisant la modélisation 3D préopératoire, nous pouvons à présent obtenir les mêmes résultats de manière préopératoire, ces règles reposant sur la logique chirurgicale de clamage des territoires vasculaires et utilisant les technologies de Réalité Virtuelle. Par ailleurs, des logiciels plus récents peuvent simuler de la même manière la pose virtuelle de clips sur un vaisseau et ainsi fournir virtuellement le territoire vasculaire en temps réel. Ces règles devraient donc être appliquées à tout organe afin d'optimiser et de personnaliser la définition de son anatomie fonctionnelle.

Par le passé, une telle modélisation 3D était limitée et n'était pas utilisée fréquemment en raison du temps de traitement, de la complexité et du coût de tels systèmes. Le fait que des mutuelles françaises prennent en charge le coût d'une telle modélisation en ligne devrait généraliser à présent l'utilisation de l'anatomie patient-spécifique basée sur la modélisation 3D. Cette augmentation de son utilisation devrait augmenter le nombre d'études montrant le bénéfice de cette nouvelle anatomie en routine. La prochaine étape sera de l'utiliser en peropératoire à travers le concept de Réalité Augmentée. Elle associe l'anatomie patient-spécifique sur la vue chirurgicale réelle. Le patient deviendra alors virtuellement transparent, comme l'illustrent nos travaux dans ce domaine (28). Cette anatomie 3D patient-spécifique peut en effet être considérée comme une cartographie du patient, la prochaine étape sera donc de développer le GPS du chirurgien.

Note

Ces recherches contiennent une partie des résultats obtenus lors du projet FP7 en eSanté, le projet PASSPORT, financé par le programme ICT de la Commission Européenne et le projet PSPC intitulé 3D-Surg financé par BPI France.

Références

1. Takasaki K, "Glissonean pedicle transection method for hepatic resection. A new concept of liver segmentation. Journal of Hepato-biliary-pancreatic surgery", 1998, 5(3): 286-291.
2. Goldsmith NA, Woodburne RT. "Surgical anatomy pertaining to liver resection", Surg. Gynecol. Obstet 1957; 105:310
3. Bismuth H, "Surgical anatomy and anatomical surgery of the liver", World J Surg 1982; 6:3-9.
4. C. Couinaud, "Liver Anatomy: Portal (and Suprahepatic) or Biliary segmentation", Digestive Surgery 1999; 16:459-467, 1999.
5. Platzer W, Maurer H. "Zur Segmenteinteilung der Leber", Acta Anat, 63: 8-31, 1966.
6. Nelson RC, Chezmar JL, Sugarbaker PH, Murray DR, Bernardino ME. "Preoperative localization of focal liver lesions to specific liver segments: utility of CT during arterial portography", Radiology, 176; 89-94, 1990.
7. Soyer P, Roche A, Gad M, et al. "Preoperative segmental localization of hepatic metastases: utility of three-dimensional CT during arterial portography", Radiology, 180; 653-658, 1991
8. J. H. D. Fasel, D. Selle, C.J.C. Evertsz, F. Terrier, H.O. Peitgen and P. Gailloud : "Segmental Anatomy of the Liver: Poor Correlation with CT1", Radiology, 206:151-156, 1998.
9. Rieker O, Mildenerberger P, Hintze C, Schunk K, Otto G, Thelen M : "Segmental anatomy of the liver in computed tomography: do we localize the lesion accurately? ", Röfo, 172(2): 147-152, 2000.
10. Fischer L, Cardenas C, Thorn M, Benner A, Grenacher L, Vetter MA, Lehnert T, Klar E, Meinzer H-P and Lamade W : "Limits of Couinaud's liver segment classification: a quantitative computer-based three-dimensional analysis", Journal of Computer Assisted Tomography, 26(6):962-7, 2002.
11. H. Strunk, G. Stuckmann, J. Textor, W. Willinek : "Limitations and pitfalls of Couinaud's segmentation of the liver in transaxial Imaging", European Radiology, 13:2472-2482, 2003.
12. Fasel J : "Portal Venous Territories within the Human Liver: An anatomical Reappraisal", The anatomical record, 291:636-642, 2008.

13. C. Couinaud : "Erreur dans le diagnostic topographique des lésions hépatiques", *Annales de Chirurgie* 2002;127:418-30.
14. L. Soler, H. Delingette, G. Malandain, J. Montagnat, N. Ayache, C. Koehl, O. Dourthe, B. Malassagne, M. Smith, D. Mutter, J. Marescaux : "Fully automatic anatomical, pathological, and functional segmentation from CT scans for hepatic surgery", *Computer Aided Surgery*, 2001;6(3):131-142.
15. Bégin A, Martel G, Lapointe R, Belblidia A, Lepanto L, Soler L, Mutter D, Marescaux J, Vandenbroucke-Menu F, "Accuracy of preoperative automatic measurement of the liver volume by CT-scan combined to a 3D virtual surgical planning software", *Surg Endosc*. 2014;28:3408-12.
16. L. Soler, S. Nicolau, P. Pessaux, D. Mutter, J. Marescaux, Real time 3D image reconstruction guidance in Liver Resection Surgery, *Hepatobiliary Surgery and Nutrition*, 2014, 3:73-81.
17. Mutter D, Soler L, Marescaux J, "Recent advances in Liver imaging", *Expert Review of Gastroenterology and Hepatology*, 2010;4:613-21.
18. Mutter D, Dallemagne B, Bailey C, Soler L, Marescaux J, "3D virtual reality and selective vascular control for laparoscopic left hepatic lobectomy", *Surg Endosc* 2009;23 :432-5.
19. L Soler, D Mutter, P Pessaux, J Marescaux, "Patient-specific anatomy: the new area of anatomy based on computer science illustrated on liver", *J Vis Surg*, 2015;1:21
20. X-D Wang, H-G Wang, J Shi, W-D Duan, Y Luo, W-B Ji, N Zhang and J-H Dong, "Traditional surgical planning of liver surgery is modified by 3D interactive quantitative surgical planning approach: a single-center experience with 305 patients", *Hepatobiliary Pancreat Dis Int*. 2017;16:271-8.
21. Y-B He, L Bai, T Aji, Y Jiang, J-M Zhao, J-H Zhang, Y-M Shao, W-Y Liu, H Wen, "Application of 3D reconstruction for surgical treatment of hepatic alveolar echinococcosis", *World J Gastroenterol*. 2015;21:10200-7.
22. D Gossot, J Lutz, M Grigoriou, E Brian, A Seguin-Givelet, "Thoracoscopic anatomic segmentectomies for lung cancer: technical aspects", *J Viz Surg* 2016;2(171):1-8
23. J Le Moal, C Peillon, JN Dachet, JM Baste, "Three-dimensional computed tomography reconstruction for operative planning in robotic segmentectomy: a pilot study", *J Thorax Dis* 2018; 10:196-201
24. D Gossot, A Seguin-Givelet, "Thoracoscopic right S9+10 segmentectomy", *J Vis Surg*, 2018; 4:181.
25. D Gossot, A Seguin-Givelet, "Anatomical variations and pitfalls to know during thoracoscopic segmentectomies", *J Thorac Dis*. 2018; 10: S1134-S1144
26. Van Cleynenbreugel B, De Bruyn H, Vos G, Everaerts W, Albersen M and Srirangam SJ, "Reduction of warm ischaemia time by preoperative three-dimensional visualisation in robot-assisted partial nephrectomy", *Urology: Research and Therapeutics Journal*, 2019; 2(1):123-133.
27. Lachkar A-A, Soler L, Diana M, Becmeur F, Marescaux J, "3D imaging and urology: Why 3D reconstruction will be mandatory before performing surgery", *Arch Esp Urol*. 2019; 72:347-352
28. L. Soler, S. Nicolau, P. Pessaux, D. Mutter, J. Marescaux, "Augmented reality in minimally invasive digestive surgery", *Pediatric Digestive Surgery* 2017, Mario Lima Editor, Springer, 421-432.

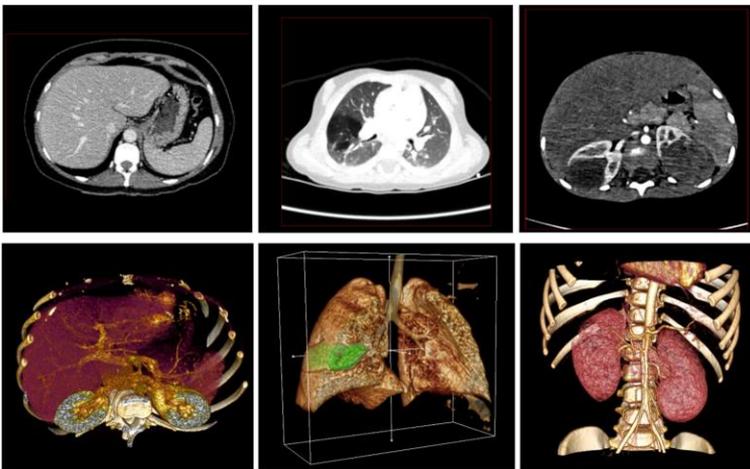


Figure 1 : Rendu volumique direct (deuxième ligne) de trois cas cliniques différents à partir de leur image DICOM (première ligne), ici à partir de l'image TDM d'un foie (gauche), des poumons (centre) et des reins (droite) en utilisant le logiciel Visible Patient Planning™.

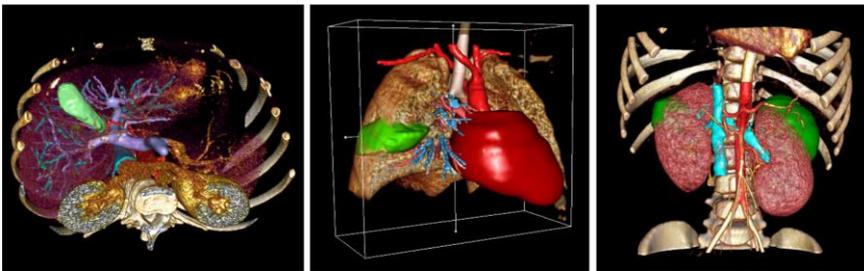


Figure 2 : Visible Patient Planning™ - Fusion entre rendu volumique direct et rendu surfacique des organes fournis par le service en ligne Visible Patient pour les mêmes patients que sur la Figure 1.

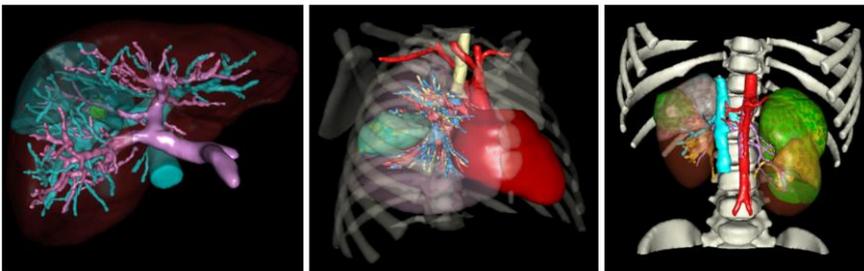


Figure 3 : Pose virtuelle de clips et simulation des territoires dévascularisés en résultant avec Visible Patient Planning™ pour les mêmes patients que sur la Figure 1.

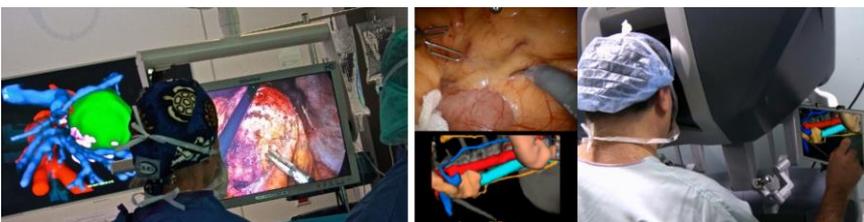


Figure 4 : Utilisation peropératoire de Visible Patient Planning™ branché sur un écran chirurgical (gauche) ou sur l'écran du robot (droite).

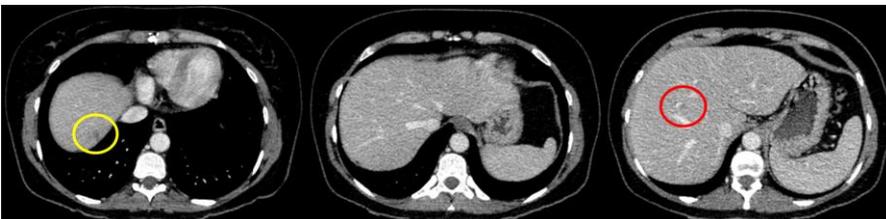


Figure 5 : Trois coupes axiales du premier patient avec deux petites tumeurs hépatiques (cercles).

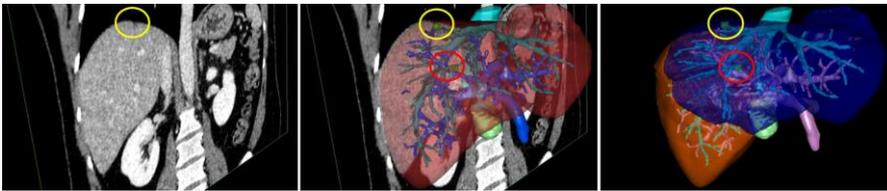


Figure 6 : Modélisation 3D fournie en ligne par le service Visible Patient et permettant de visualiser deux tumeurs hépatiques (cercles). À partir de la pose virtuelle de clips réalisée par le logiciel Visible Patient Planning, la vue 3D du foie gauche (bleu) et du foie droit (orange) montre que les deux tumeurs sont localisées dans le foie gauche et non pas dans le foie droit.

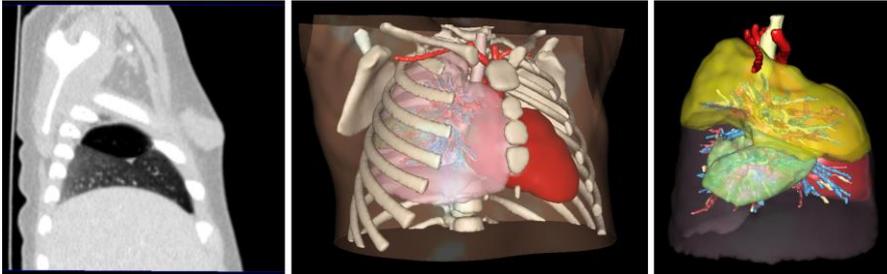


Figure 7 : Maladie adénomatoïde kystique du poumon, détectée dans le lobe supérieur droit à partir d'une image scanner (gauche) d'un patient âgé de 6 mois. La modélisation 3D (centre) fournie par le service en ligne Visible Patient et la simulation de la pose de clip du lobe supérieur droit (jaune) a montré que le kyste ne se situait pas dans ce territoire et a permis d'éviter l'erreur de manière préopératoire.

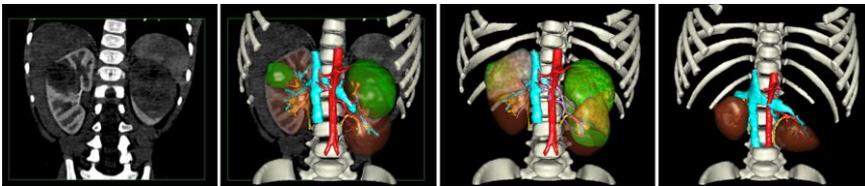


Figure 8 : Double néphroblastome détecté sur les deux reins d'un enfant de 5 ans. Grâce à la modélisation 3D et à la simulation préopératoire de pose de clips en utilisant le service Visible Patient et le logiciel de planification, la résection partielle de chaque rein a été validée et réalisée. Comme illustré sur la droite, un an plus tard, le patient semble guéri.

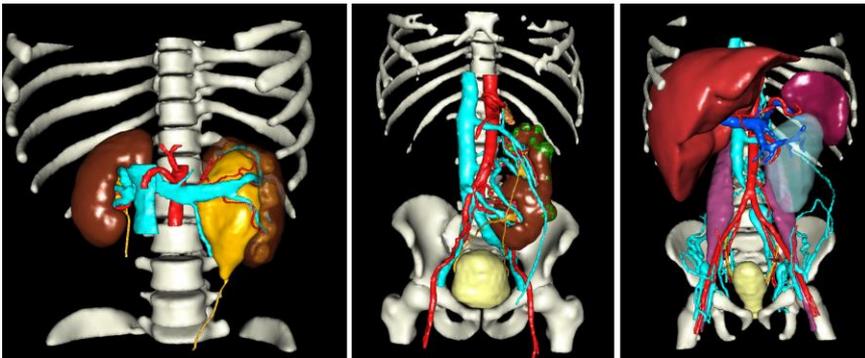


Figure 9 : Dilatation du bassin gauche (gauche), ectopie rénale croisée gauche (centre) et simulation d'une transplantation rénale (en bleu à droite).