

# Modèles 3D, guides de coupe et réalité augmentée en chirurgie plastique et maxillo-faciale

## 3D Models, Cutting Guides and Augmented Reality in Plastic and Maxillofacial Surgery

JP Meningaud, R Bosc, L Ganry

*Service de chirurgie plastique, reconstructrice et esthétique et maxillo-faciale - CHU Henri Mondor - Créteil, France.*

### Résumé

Depuis les travaux de Sushruta en Inde au V<sup>ème</sup> siècle avant notre ère, la chirurgie plastique faciale a toujours utilisé des guides de tissu ou de papier imprimés pour aider à la réalisation des techniques de reconstruction chirurgicale. Puis ces guides sont devenus des moulages en trois dimensions (3D) permettant de gagner en précision. Depuis une vingtaine d'années, grâce aux technologies assistées par ordinateur, les guides utilisés en reconstruction osseuse Cranio-Maxillo-Faciale se sont améliorés en termes de précision, d'anticipation, de symétrie, de flexibilité, de rapidité, de reproductibilité, etc. Si bien que depuis cinq ans, les imprimantes 3D sont devenues directement accessibles dans les services de chirurgie, au point de faire partie du paysage et qu'un service comme le nôtre à l'hôpital Henri Mondor, dispose d'une salle dédiée à cette technologie.

Ces technologies permettent la création de dispositifs médicaux sur-mesure transposables au sein du champ opératoire, directement à partir des données radiologiques de nos patients. Il s'agit notamment de guides de coupes pour la réalisation de certains lambeaux libres osseux. Ils permettent de transformer aisément des structures rectilignes tel le lambeau de fibula en formes tridimensionnelles complexes telle une mandibule. Ces technologies permettent aussi de fabriquer des guides de forage pour les implants dentaires nécessaires à la réhabilitation orale, ou pour les implants extra-oraux utiles à la mise en place d'épithèses faciales, elles-mêmes conçues par ordinateur. On peut aussi planifier informatiquement les marges de résection pour les tumeurs à envahissement osseux et fabriquer des guides de coupes adaptés qui permettent au chirurgien de réaliser une exérèse prenant en compte plus précisément l'étendue des lésions. Enfin, les modèles 3D permettent de mieux comprendre certaines déformations faciales complexes, voire de simuler des interventions difficiles et d'en discuter en staff, et enfin de mieux faire comprendre au patient l'objectif de son intervention. Tout cela n'est pas toujours aisé sur des images bidimensionnelles (2D) ou 3D sur un écran d'ordinateur. Leur rôle pédagogique dans la formation des internes n'est pas à négliger. En définitive, au moment de l'opération, c'est bien une structure 3D palpable que nous aurons entre les mains. Or, nous possédons une certaine mémoire tactile dont il serait dommage de se priver quand elle peut faire la différence dans certains cas difficiles.

Parfois, ces guides ne peuvent être positionnés de façon optimale sur une surface rigide osseuse, du fait de la fibrose des parties molles ou d'autres conditions locales particulières. Ils deviennent alors inadaptés. Après le moulage en plâtre, puis le modèle en résine obtenu de façon numérique, un 3<sup>ème</sup> type de modèle fait son apparition : le guide virtuel en réalité augmentée. Il peut représenter une solution de choix, ouvrant la porte à un nouveau monde sensoriel affranchi des contraintes de l'impression 3D. Même si cette technologie n'en est qu'à ses premiers balbutiements, elle semble prometteuse.

### Mots clés

- ◆ Impression 3D
- ◆ Réalité augmentée
- ◆ Réalité virtuelle

### Abstract

Since the work of Sushruta in India in the 5th century B.C., facial plastic surgery has always used fabric or paper guides as aids in surgical reconstruction techniques. Later, three-dimensional (3D) molds were used, with a gain in precision. In the last 20 years, thanks to computer-aided technologies, the guides used for craniomaxillofacial bone reconstruction have been improved in terms of precision, anticipation, symmetry, flexibility, speed, reproducibility, etc. Furthermore, over the last five years, 3D printers have become directly accessible in surgery departments, so that today they are part of the landscape. Our department at Henri Mondor Hospital even has a special room dedicated to this technology.

With computer-aided technologies, we can create customized medical devices based on our patients' radiological data, which become a key part of the surgical procedure. They are used in particular to make cutting guides for free bone flaps. Thanks to these technologies, we can easily transform straight shapes, such as a fibular flap, into complex three-dimensional structures, such as a mandible. They also make it possible to create drilling templates for dental implants required for oral rehabilitation, and for extra-oral implants that are used for attaching facial prostheses, which are themselves computer designed. We can use computer tools for planning the resection margins of invasive bone tumors and for making adapted cutting guides, which enable the surgeon to have a more precise understanding of the extent of the tumors when performing surgery to remove them. Lastly, 3D models allow us to better understand certain complex facial deformations and even simulate difficult surgical interventions - which is useful for staff discussions and to help patients understand the objective of their surgery. All of the above is not easy to accomplish using bi-dimensional (2D) or 3D images on a computer screen. Moreover, when it comes to teaching interns, the educational value of 3D models should not be underestimated. Ultimately, when the time comes to operate, what we will have in our hands is indeed a palpable 3D structure. We essentially possess a kind of tactile memory that it would be a shame not to take advantage of, especially when it can make all the difference in certain difficult cases.

At times, these guides cannot be optimally positioned on a rigid bone surface due to soft tissue fibrosis, or another specific local condition, in which case they are not suited to the task at hand. After plaster molds, followed by digitally generated resin models, we now have a third option: the augmented reality virtual guide. This could be a solution of choice, opening the door to a new sensory world free of the limitations of 3D printing. Although this technology is still in its infancy, it seems promising.

### Keywords

- ◆ 3D printing
- ◆ Augmented reality
- ◆ Virtual reality

### Correspondance

Pr Jean-Paul Meningaud

*Chef du service de chirurgie plastique reconstructrice et esthétique et maxillo-faciale - CHU Henri Mondor - 94010 Créteil.*

*E-mail: meningaud@me.com - Tel : +33 (0) 1 49 81 25 31*

Depuis les travaux de Sushruta (1) en Inde au V<sup>ème</sup> siècle avant notre ère, la chirurgie plastique et maxillo-faciale a toujours utilisé des guides de tissu ou papier imprimés pour aider à la réalisation des techniques de reconstruction chirurgicale. Sushruta décrit une reconstruction du nez faisant appel à un lambeau cutané-musculaire prélevé sur le front. Cette technique est encore utilisée aujourd'hui. Des éléments de tissu ou de papier étaient utilisés pour rapporter les mesures du nez à reconstruire, sur le dessin du lambeau frontal. Ils préfiguraient les guides de coupes beaucoup plus sophistiqués que nous utilisons aujourd'hui. Puis, ces guides sont devenus des moulages en plâtre en 3D (2) permettant de gagner en précision. Ils ont largement été utilisés pour la confection des épithèses (3), et beaucoup de chirurgiens maxillo-faciaux les utilisent encore pour planifier les ostéotomies faciales dans le cadre de la chirurgie orthognatique. On peut les placer sur des articulateurs semi-adaptables afin de prévoir l'articulé dentaire et réaliser un guide d'ostéosynthèse peropératoire à l'aide d'une cire d'occlusion placée sur les dents.

Mais, depuis une vingtaine d'années, grâce aux technologies assistées par ordinateur, les guides utilisés en reconstruction osseuse cranio-maxillo-faciale se sont améliorés en termes de précision, d'anticipation, de symétrie, de flexibilité, de rapidité, de reproductibilité, etc. (6). Si bien que depuis cinq ans, les imprimantes 3D sont devenues directement accessibles dans les services de chirurgie, au point de faire partie du paysage et qu'un service comme le nôtre à l'hôpital Henri Mondor, dispose d'une salle dédiée à cette technologie (4-8).

L'impression 3D, quelle utilité en chirurgie plastique et maxillo-faciale ?

L'impression 3D a de nombreuses applications en chirurgie plastique et maxillo-faciale, notamment la compréhension des cas difficiles, la création de guides de coupe, la réalisation d'implants et la pédagogie (9).

## Les cas difficiles

L'impression de structures osseuses cranio-maxillo-faciales à partir des données du scanner permet d'étudier des structures complexes de façon plus concrète qu'une image 3D visualisée sur un écran d'ordinateur. Au moment de l'intervention, c'est essentiellement avec ses mains que le chirurgien régularisera une aspérité, ajustera une pige de réduction, évaluera une symétrie. Or, on oublie souvent qu'il existe une intelligence et une mémoire tactile qui sont très développées chez le chirurgien. L'image 3D que l'on peut faire tourner sur un écran a l'avantage de la rapidité d'acquisition. Si elle est suffisante dans la plupart des cas, elle ne permet pas une appréhension tactile des structures en cause. Dans les cas difficiles, le fait de pouvoir manipuler l'objet offre l'atout d'un sens complémentaire de la vision, le toucher. En réunion de staff, le modèle 3D peut passer d'une main à l'autre, occasion de discussions fécondes sans compter l'aspect pédagogiques pour les plus jeunes sur lequel nous reviendrons. Par exemple, le modèle 3D peut permettre de mieux comprendre pourquoi une enophtalmie n'a pas été correctement corrigée, qu'elle est la meilleure stratégie pour aborder une séquelle de fracture du malaire, mieux appréhender une asymétrie osseuse, etc.

## La création des guides de coupe en chirurgie maxillo-faciale

Il existe deux types de guides de coupes. L'un concerne les structures faciales où ils vont guider les ostéotomies en vue de pratiquer l'exérèse d'une tumeur ou dans le cadre d'une dysmorphose ou d'une séquelle de traumatisme. L'autre concerne les lambeaux libres osseux qui vont être segmentés pour reconstruire des structures faciales, essentiellement la mandibule ou la région orbito-maxillaire. En cancérologie, le guide de coupe offre une plus-value significative car l'imagerie montre parfois un envahissement médullaire de la lésion plus important que l'extension directement visible en peropératoire. Ainsi le guide de coupe, offre la garantie de marges saines suffisantes (Fig 1). Dans les cas complexes de chirurgie orthognatique ou séquellaire, le guide de coupe permet une précision millimétrique. En reconstruction, l'impression 3D permet aussi une aide indirecte à travers le modelage préalable des plaques et attelles d'ostéosyntheses, qui sont cintrées sur le modèle 3D, puis stérilisées (Fig 2) (10). Elles permettent en peropératoire, indirectement à travers le vissage, de retrouver la conformation osseuse souhaitée : déplacement 3D d'une ostéotomie de Lefort 1, réduction d'une fracture complexe, maintien à l'identique de l'espace entre deux moignons mandibulaires après une exérèse carcinologique, etc. Enfin, grâce aux algorithmes disponibles aujourd'hui, dont certains sont même en accès libre de droit sur Internet (11,12), il est possible de créer des guides qui permettent de segmenter une structure rectiligne telle un lambeau libre de péroné, de telle sorte que les angulations dans les trois plans de l'espace anticipent celles de la mandibule du patient opéré (Fig 3). Deux solutions s'offrent aux chirurgiens, soit de les concevoir soi-même, soit de confier leur réalisation à l'industrie. Comme toujours chaque solution a ses avantages et inconvénients. La conception « maison » est chronophage. L'encadrement réglementaire n'est pas encore complètement clair et stabilisé, mais il est évident que dans ce cas le chirurgien en assume l'entière responsabilité. Réciproquement, il existe des avantages de recherche et d'enseignement très intéressants. La conception des guides sous-traitée par l'industrie, permet au chirurgien de gagner un temps considérable parfois au prix de délais plus importants (13,14). C'est à dire que le nombre d'heures consacrées par le chirurgien sera nettement plus faible mais il sera difficile d'avoir un rendu au cours d'un week-end, par exemple. Dans tous les cas, la qualité du guide dépendra de l'échange entre le chirurgien et l'ingénieur. C'est pourquoi, pour faciliter cette interaction, une connaissance minimale de la planification 3D, nous apparaît nécessaire. Elle devrait désormais, à notre avis, faire partie du cursus de la formation initiale. Les guides de coupes, peuvent être complétés par des guides de forage qui prévoient à l'avance, c'est-à-dire sur le péroné lui-même avant sa segmentation, les angles des implants dentaires qui permettront une réhabilitation orale totale (15), c'est-à-dire la mise en place d'un bridge dentaire complet sur la mandibule reconstruite.

## La réalisation d'implants à demeure

Il s'agit par exemple de prothèses d'articulation temporo-mandibulaire, de plancher d'orbite, de malaire, de structures complexes, etc. (16). Ces implants ne peuvent être réalisés que par l'industrie, tant le niveau d'exigence est élevé sur tous les plans (17). Les plus intéressants sont ceux qui sont réalisés sur mesure. Ils offrent non seulement la prédictibilité maximale du résultat mais épargnent aussi beaucoup de temps opératoire. Tous types de matériaux peuvent être imprimés, du Polyéther Ether Cétone (PEEK) (18), du titane (19), du polyéthylène poreux, etc.

On peut aussi imprimer des prothèses résorbables en hydroxyapatite qui seront progressivement ré-habitées par l'os environnant. L'évolution se fera vers des prothèses composites, c'est à dire associant plusieurs matériaux dans la même masse et surtout avec des gradients de densité permettant des propriétés biomécaniques nouvelles. Une autre évolution attendue et sur laquelle travaille plusieurs start-up est celle des matrices « scaffold » sur mesure en vue d'êtreensemencées par des cellules souches (20,21). En plus de propriétés biomécaniques classiques, on en attend des propriétés biologiques de chimiotactisme par exemple, voire de profil de résorption.

La pédagogie. Il existe deux types de pédagogie. L'une concerne nos internes et jeunes chirurgiens (22), l'autre l'information et l'éducation thérapeutique des malades (23). L'impression 3D trouve une place de choix dans ces deux domaines. Lorsque que l'on demande à un interne correctement encadré de réaliser toute la planification opératoire d'un cas complexe, jusqu'à l'impression 3D, puis de simuler les ostéotomies sur le modèle imprimé voire les ostéosynthèses, et enfin de présenter son travail en staff, on observe une compréhension totale qui déborde largement le cas étudié et qui se ressent énormément au bloc opératoire. La transmission du savoir chirurgical en est grandement facilitée surtout pour les cas que l'on a du mal à confier du fait d'un accès difficile ou d'un champ opératoire restreint. L'évaluation préalable du niveau de l'interne par le senior est plus aisée. Dans les cas d'intervention complexe, le modèle 3D peut aussi être le moyen d'une information éclairée à destination des patients, afin de mieux expliquer l'ampleur d'une exérèse ou la nécessité d'une voie d'abord particulière (24).

## La réalité augmentée est-elle l'avenir de l'impression 3D ?

La réalité augmentée est la possibilité d'avoir des informations supplémentaires se superposant au champ visuel du chirurgien par le biais de lunettes pendant l'acte opératoire. Il peut s'agir d'informations médicales (tension artérielle, fréquence cardiaque, délais de clampage ou de garrot) ou chirurgicales (position d'une artère perforante ou d'une tumeur). Pour les informations chirurgicales, il est nécessaire de stabiliser l'image grâce à un tracker placé en début d'intervention sur le patient. Sans quoi, les éléments virtuels ne cesseraient de bouger avec les mouvements de la tête du chirurgien (25). Dans le cas de tumeurs difficiles car noyées dans des tissus semblables (vidéo 1) ou de corps étrangers, la réalité augmentée peut être une aide appréciable. Dans le cas de perforantes cutanées la réalité augmentée permet de les repérer de façon fiable grâce à un angioscanner réalisé préalablement et sans nécessité de contrôle doppler peropératoire (vidéo 2).

L'avenir sera peut-être la réalisation de guides de coupe virtuels. Parfois, les guides en résine ou en nylon ne peuvent être positionnés de façon optimale sur une surface rigide osseuse, du fait de la fibrose des parties molles ou d'autres conditions locales particulières. Ils deviennent alors inadaptés. Après le moulage en plâtre, puis le modèle en 3D obtenu de façon numérique, un 3<sup>ème</sup> type de modèle fait son apparition : le guide virtuel en réalité augmentée. Les guides de coupe imprimés en 3D ont encore l'inconvénient d'un temps d'impression et de stérilisation relativement long. Si l'on parvient à réaliser des guides virtuels effectifs, ce temps sera épargné (voir vidéo). Il existe déjà en implantologie dentaire un système de navigation appelé Robodent® (26) qui permet de guider le geste à l'aide d'une mire et d'une cible et qui préfigure ce qui pourrait être fait à un niveau plus complexe en chirurgie plastique et maxillo-faciale. La réalité augmentée peut représenter une solution de choix, ouvrant la porte à un nouveau monde sensoriel affranchi des contraintes de l'impression 3D (27). Même si cette technologie n'en est qu'à ses premiers balbutiements, elle semble prometteuse.

## La réalité virtuelle est-elle complémentaire de l'impression 3D ?

Contrairement à la réalité augmentée qui ajoute des éléments virtuels à la réalité, la réalité virtuelle offre à voir un environnement virtuel le plus réaliste possible. Il est en 3D et on peut évoluer au sein de cet environnement en tournant la tête où en se déplaçant. Actuellement, on l'utilise en routine pour détendre les patients en préopératoire voire en peropératoire car certains systèmes permettent une déconnexion complète du psychisme par rapport à l'élément stressant, avec une efficacité qui semble supérieure à l'hypnose. Les systèmes les plus performants associent un environnement acoustique adéquat et des palettes d'odeurs et d'arômes choisis pour leurs propriétés relaxantes. Les taux de stress mesurés par les taux de cortisol salivaires, la cohérence cardiaque (variabilité du rythme cardiaque), ou des échelles d'auto-évaluation sont abaissés en quelques minutes.

Pour le chirurgien, la réalité virtuelle pourrait avoir des applications pédagogiques insoupçonnées (28). Elle permettrait de réaliser le meilleur des simulateurs à condition de les combiner avec des supports concrets et touchables sur lesquels opérer (29). Ainsi le meilleur des simulateurs associerait l'impression 3D, la réalité augmentée et la réalité virtuelle. L'impression 3D offrirait un champ opératoire concret le plus proche possible de l'anatomie. Ces systèmes existent déjà avec la possibilité de réaliser des comblements de sinus ou de réduire des fractures du poignet avec tous les tissus concernés, os tendons, peau, muqueuses, etc. La réalité virtuelle permettrait d'avoir l'environnement avec différents scénarii, le son du scope qui s'accélère, les anesthésistes qui s'affairent, l'odeur du bistouri électrique, etc. La réalité augmentée permettrait d'ajouter des informations sur le modèle 3D opéré (30).

## Conclusion

L'impression 3D, la réalité augmentée et la réalité virtuelle ouvrent des horizons insoupçonnés en chirurgie qui vont de la pédagogie médicale, à l'impression d'organes biologiques, en passant par des outils d'information ou de sécurisation du patient. Le champ du possible semble infini. Que de travaux seront écrits, de thèses seront défendues et en définitive de malades mieux traités !

## Remerciements

Nous remercions l'équipe du service de radiologie du CHU Henri Mondor et en particulier le Dr Thu Ha Dao et le Dr Alexandre Fitoussi pour leur aide dans la réalisation des rendus volumiques et leur expertise en imagerie du sein.

## Discussion en séance

### Question de R Villet

Il y a d'une part la chirurgie personnalisée qui permet :

- 1) de simuler l'opération pour minimiser le risque opératoire ;
- 2) de fabriquer éventuellement un matériel adapté ;
- 3) l'enseignement de la chirurgie dont le coût est bien moindre.

### Réponse

En effet, l'impression 3D permet de préparer des cas difficiles afin de minimiser le risque opératoire et d'autre part, elle présente une dimension pédagogique indéniable.

### Question de X Martin

Il faut adapter la simulation à l'objectif pédagogique, cela demande à l'enseignant de réfléchir sur ce qu'il faut enseigner. Cela permet d'abaisser le coût des formations. Quel est l'objectif pédagogique ? A quel étudiant cet enseignement s'adresse t'il ? Il n'est pas obligatoirement nécessaire d'utiliser un simulateur coûteux pour apprendre à réaliser des points de suture avec du fil 4/0 ou 5/0.

### Réponse

L'impression 3D ne doit être utilisée que pour les cas complexes et difficiles à enseigner. Dans ma discipline, il s'agit d'interventions où l'accès est étroit et la visibilité faible pour l'aide-opérateur. L'exemple type est l'ostéotomie sagittale des branches montantes. Cette intervention est relativement fréquente, a un risque de complications élevée et est difficile à transmettre.

### Commentaire de J Baulieux

En chirurgie du foie, il faudra démontrer que la reconstitution 3D est absolument nécessaire pour une chirurgie programmée efficace.

### Réponse

Je connais hélas mal la chirurgie hépatique mais j'imagine que dans le cas d'une variation anatomique, l'impression 3D peut être un atout.

### Question de G Pascal

Stratégie d'exérèse des tumeurs du foie en lien avec leurs rapports vasculaires ? Un modèle en 3D de la tumeur et de ses rapports vasculaires avec les pédicules glissoniens et le confluent cavo-sus-hépatique pour décider du type de reconstruction vasculaire avant l'intervention.

### Réponse

La remarque du Pr G Pascal me semble frappée au coin du bon sens mais si mon équipe participe parfois aux anastomoses microchirurgicales dans le cas de certaines transplantations hépatiques très particulières, notre expérience se limite à cela.

## Références

1. Bath K, Aggarwal S, Sharma V, Sushruta. Father of plastic surgery in Benares. *J Med Biogr.* 2016. <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0967772016643463>.
2. Reuschl RP, Heuer W, Stiesch M, Wenzel D, Dittmer MP. Reliability and validity of measurements on digital study models and plaster models. *Eur J Orthod.* 2016;38:22-26.
3. Thiele OC, Brom J, Dunsche A, Ehrenfeld M, Federspil P et al. The current state of facial prosthetics - A multicenter analysis. *J Craniomaxillofac Surg.* 2015;43:1038-41.
4. Seruya M, Fisher M, Rodriguez ED. Computer-assisted versus conventional free fibula flap technique for craniofacial reconstruction: an outcomes comparison. *Plast Reconstr Surg.* 2013;132:1219-28.
5. Rem K, Bosc R, De Kermadec H, Hersant B, Meningaud JP. How to make your own custom cutting guides for both mandibular and fibular stair step osteotomies? *Ann Chir Plast Esthet.* 2017 Apr 26. pii: S0294-1260(17)30044-4. doi: 10.1016/j.anplas.2017.03.005. [Epub ahead of print].
6. Bosc R, Hersant B, Carloni R, Niddam J, Bouhassira J and al. Mandibular reconstruction after cancer: an in-house approach to manufacturing cutting guides. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2017;46:24-31.
7. Ganry L, Hersant B, Quilichini J, Leyder P, Meningaud JP. Use of the 3D surgical modelling technique with open-source software for mandibular fibula free flap reconstruction and its surgical guides. *J Stomatol Oral Maxillofac Surg.* 2017;118:197-202.
8. Ganry L, Quilichini J, Bandini CM, Leyder P, Hersant B and al. Three-dimensional surgical modelling with an open-source software protocol: study of precision and reproducibility in mandibular reconstruction with the fibula free flap. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2017;46:946-57.
9. Pfaff MJ, Steinbacher DM. Plastic Surgery Applications Using Three-Dimensional Planning and Computer-Assisted Design and Manufacturing. *Plast Reconstr Surg.* 2016;137:603e-616e.
10. Wilde F, Plail M, Riese C, Schramm A, Winter K. Mandible reconstruction with patient-specific pre-bent reconstruction plates: comparison of a transfer key method to the standard method--results of an in vitro study. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2012;7:57-63.
11. Santos O Jr, Pinheiro LR, Umetsubo OS, Sales MA, Cavalcanti MG. Assessment of Open Source Software for CBCT in Detecting Additional Mental Foramina. *Braz Oral Res.* 2013;27:128-35.
12. Jalbert F, Paoli JR. Osirix: free and open-source software for medical imagery. *Rev Stomatol Chir Maxillofac.* 2008;109:53-5.
13. Eufinger H, Wehmöller M. Individual Prefabricated Titanium Implants in Reconstructive Craniofacial Surgery: Clinical and Technical Aspects of the First 22 Cases. *Plast Reconstr Surg.* 1998;102:300-8.
14. Rustemeyer J, Melenberg A, Sari-Rieger A. Costs incurred by applying computer-aided design/computer-aided manufacturing techniques for the reconstruction of maxillofacial defects. *J Craniomaxillofac Surg.* 2014;42:2049-55.

15. Dawood A, Marti Marti B, Sauret-Jackson V, Darwood A. 3D printing in dentistry. *Br Dent J.* 2015;219:521-9.
16. Schepers RH, Raghoobar GM, Vissink A, Stenekes MW, Kraeima J and al. Accuracy of fibula reconstruction using patient-specific CAD/CAM reconstruction plates and dental implants: A new modality for functional reconstruction of mandibular defects. *J Craniomaxillofac Surg.* 2015;43:649-57.
17. Johnson NR, Roberts MJ, Doi SA, Batstone MD. Total temporomandibular joint replacement prostheses: a systematic review and bias-adjusted meta-analysis. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2017;46:86-92.
18. Zavatiero E, Zenga F, Bianchi FA, Garzino-Demo P, Berrone S. Primary and secondary reconstruction of complex craniofacial defects using polyetheretherketone custom-made implants. *J Craniomaxillofac Surg.* 2015;43:1356-63.
19. Rachmiel A, Shilo D, Blanc O, Emodi O. Reconstruction of complex mandibular defects using integrated dental custom-made titanium implants. *Br J Oral Maxillofac Surg.* 2017;55:425-7.
20. Allori AC, Davidson EH, Reformat DD, Sailon AM, Freeman J and al. Design and validation of a dynamic cell-culture system for bone biology research and exogenous tissue-engineering applications. *J Tissue Eng Regen Med.* 2016;10:e327-e336.
21. Roskies M, Jordan JO, Fang D, Abdallah MN, Hier MP and al. Improving PEEK bioactivity for craniofacial reconstruction using a 3D printed scaffold embedded with mesenchymal stem cells. *J Biomater Appl.* 2016;31:132-9.
22. Chen S, Pan Z, Wu Y, Gu Z, Li M and al. The role of three-dimensional printed models of skull in anatomy education: a randomized controlled trial. *Sci Rep.* 2017;7:575.
23. Andolfi C, Plana A, Kania P, Banerjee PP, Small S. Usefulness of Three-Dimensional Modeling in Surgical Planning, Resident Training, and Patient Education. *J Laparoendosc Adv Surg Tech A.* 2017;27:512-5.
24. Pulijala Y, Ma M, Ju X, Benington P, Ayoub A. Efficacy of three-dimensional visualization in mobile apps for patient education regarding orthognathic surgery. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2016;45:1081-5.
25. Bosc R, Fitoussi A, Pigneur F, Tacher V, Hersant B and al. Identification of perforating vessels by augmented reality: Application for the deep inferior epigastric perforator flap. *Ann Chir Plast Esthet.* 2017 Mar 7. pii: S0294-1260(17)30018-3. doi: 10.1016/j.anplas.2017.01.002. [Epub ahead of print].
26. Badiali G, Ferrari V, Cutolo F, Freschi C, Caramella D and al. Augmented reality as an aid in maxillofacial surgery: validation of a wearable system allowing maxillary repositioning. *J Craniomaxillofac Surg.* 2014 ;42:1970-6.
27. Armand S, Legac O, Galibourg A. Computer-aided implantology: Contribution of the Robodent® passive robotic system. *Rev Stomatol Chir Maxillofac Chir Orale.* 2013. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2213653313001870>
28. Pfaff MJ, Steinbacher D. Plastic Surgery Resident Understanding and Education Using Virtual Surgical Planning. *Plast Reconstr Surg.* 2016;137:258e-9e.
29. Issenberg SB, McGaghie WC, Petrusa ER, Lee GD, Scalese RJ. Features and uses of high-fidelity medical simulations that lead to effective learning: a BEME systematic review. *Med Teach.* 2005;27:10-28.
30. Stefanidis D, Yonce TC, Korndorffer JR Jr, Phillips R, Coker A. Does the incorporation of motion metrics into the existing FLS metrics lead to improved skill acquisition on simulators? A single blinded, randomized controlled trial. *Ann Surg.* 2013;258:46-52.

## Légende des figures

Figure 1 : Planification des marges de résection mandibulaire en fonction de l'envahissement osseux.

Figure 2 : Adaptation et chantournage des macro-plaques titane sur le modèle mandibulaire imprimé en 3D.

Figure 3 :

A: Modélisation informatique tridimensionnelle de la mandibule ;

B : Conception informatisée du guide de coupe adaptée à l'envahissement tumoral osseux ;

C : Planification du positionnement du guide de coupe sur son support osseux ;

D : Modélisation informatique des ostéotomies fibulaires ;

E : Planification du positionnement de la reconstruction sur le support anatomique du patient.

## Légende des vidéos

Vidéo 1 : Tumorectomie mammaire assistée par réalité augmentée « tête haute » : lunettes intelligentes Epson Moverio BT 200®.

Vidéo 2 : Contrôle de positionnement du guide de coupe fibulaire et ostéotomies fibulaires assistée par réalité augmentée.

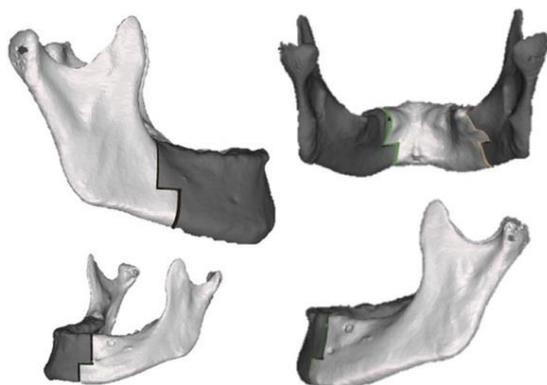


Figure 1 : Planification des marges de résection mandibulaire en fonction de l'envahissement osseux.



Figure 2 : Adaptation et chantournage des macro-plaques titane sur le modèle mandibulaire imprimé en 3D.

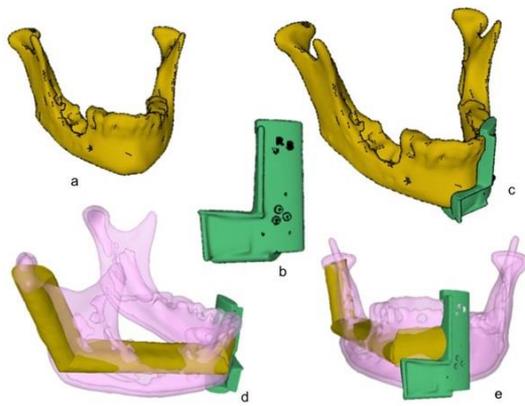


Figure 3 :

- A: Modélisation informatique tridimensionnelle de la mandibule ;
- B : Conception informatisée du guide de coupe adaptée à l'envahissement tumoral osseux ;
- C : Planification du positionnement du guide de coupe sur son support osseux ;
- D : Modélisation informatique des ostéotomies fibulaires ;
- E : Planification du positionnement de la reconstruction sur le support anatomique du patient.