



HAL
open science

Use of 3d printing in oral and maxillofacial surgery

Romain Nicot, Joel Ferri, Gwénaél Raoul

► **To cite this version:**

Romain Nicot, Joel Ferri, Gwénaél Raoul. Use of 3d printing in oral and maxillofacial surgery. Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine, 2021, Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine, 205, 10.1016/j.banm.2021.05.024 . hal-04409638

HAL Id: hal-04409638

<https://hal.univ-lille.fr/hal-04409638v1>

Submitted on 22 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Intérêt de l'Impression 3D en Chirurgie Maxillo-Faciale*

Use of 3D printing in Oral and Maxillofacial Surgery

Romain Nicot, Univ. Lille, Department of Oral and Maxillofacial Surgery, CHU Lille, INSERM U 1008, Controlled Drug Delivery Systems and Biomaterials, F-59000 Lille

Joël Ferri, Univ. Lille, Department of Oral and Maxillofacial Surgery, CHU Lille, INSERM U 1008, Controlled Drug Delivery Systems and Biomaterials, F-59000 Lille

Gwénaél Raoul, Univ. Lille, Department of Oral and Maxillofacial Surgery, CHU Lille, INSERM U 1008, Controlled Drug Delivery Systems and Biomaterials, F-59000 Lille

Corresponding author:

Dr. Romain Nicot:

Service de Chirurgie Maxillo Faciale et Stomatologie Hôpital Roger Salengro - Bd du Prof Emile Laine - 59037-Lille-Cedex - FRANCE;

Tel.: 33 3 20 44 63 60

Fax: 33 3 20 44 58 60

E-mail: romain.nicot@gmail.com

*Séance du 1^{er} juin 2021

Mots clés : Conception assistée par ordinateur ; Enseignement ; Reconstructions chirurgicales ; Impression tridimensionnelle

Keywords: Computer-Aided Design ; Teaching ; Surgically-Created Structures ; Printing, Three-Dimensional

Résumé

En chirurgie orale et maxillo-faciale, l'impression 3D a très vite séduit dès les années 1990, compte tenu de la complexité anatomique du squelette facial et de la place fondamentale des capacités visuo-spatiales nécessaires à l'élaboration d'une reconstruction tridimensionnelle en adéquation avec les exigences esthétiques et fonctionnelles faciales. Elle est utilisée en pédagogie dans l'apprentissage de l'anatomie normale et pathologique et se développe dans le domaine de la simulation pour l'apprentissage des techniques opératoires. Néanmoins, ce champ d'activité nécessite le développement de matériaux permettant un retour haptique optimal associé à une haute précision d'impression. L'impression 3D a d'autre part des indications croissantes en pratique clinique dans la planification pré-chirurgicale et la chirurgie guidée. Elle permet l'exécution de tâches complexes avec une haute précision tout en réduisant significativement le temps opératoire. Cet article a pour objectif de réaliser une revue de la place de cette technologie en pratique quotidienne, tant pour son usage pédagogique qu'en pratique clinique.

Abstract

In oral and maxillofacial surgery, 3D printing has quickly been attractive since the 1990s, given the anatomical complexity of the facial skeleton and the fundamental role of the visuospatial skills necessary for the development of a 3D reconstruction with high aesthetic and functional requirements. It is used in education to learn normal and pathological anatomy and is developing in the field of simulation for the learning of operative techniques. However, this field of activity requires the development of new materials allowing optimal haptic feedback associated with high printing precision. 3D printing, on the other hand, has increasing indications in clinical practice for pre-surgical planning and guided surgery. It allows the execution of complex tasks with high precision while significantly reducing operating time. The purpose of this article is to review the place of this technology in daily practice, both for its educational use and in clinical practice.

Introduction

L'impression 3D, également appelée fabrication additive, est une technique de fabrication de pièces en volume par rajout ou agglomération de matière. Elle permet l'obtention d'un objet physique à partir de données numériques obtenues par imagerie volumique, le plus souvent sous format « DICOM » ou issues d'une conception assistée par ordinateur (CAO), converties en fichiers 3D avec l'aide de logiciels spécifiques qui réalisent une segmentation de l'image. L'imprimante 3D dépose ou solidifie la matière couche par couche pour obtenir l'objet 3D issu de la segmentation. Alors qu'elle était initialement réservée à des applications industrielles, l'impression 3D s'est progressivement développée dans le champ médical du fait de l'expiration des brevets concernant les principales technologies (SLS, SLA et FDM), du développement des logiciels de segmentation, de simulation et de conception en libre accès et de la diminution importante des coûts d'obtention du matériel. C'est en chirurgie osseuse que se sont développées les principales indications de recours à cette technologie.

En chirurgie orale et maxillo-faciale, son utilisation a très vite séduit dès les années 1990, compte tenu de la complexité anatomique du squelette facial et de la place fondamentale des capacités visuo-spatiales nécessaires à l'élaboration d'une reconstruction tridimensionnelle en adéquation avec les exigences esthétiques et fonctionnelles faciales [1]. Elle a progressivement trouvé une place en pédagogie dans l'apprentissage de l'anatomie normale et pathologique et des techniques opératoires, et en clinique dans la planification pré-chirurgicale et la chirurgie guidée. Elle reste par ailleurs un outil indispensable en recherche avec le développement du bio-printing.

L'objectif de cet article était de réaliser une revue de la place de l'impression 3D en pratique quotidienne, tant pour son usage pédagogique qu'en pratique clinique.

Apports en pédagogie

Les modèles imprimés en 3D sont largement utilisés dans l'enseignement et la formation chirurgicale [2,3]. Au cours des 5 dernières années, plus de 80 articles concernant l'impression 3D dans le domaine de la pédagogie médicale ont été publiés. Plusieurs essais randomisés ont été menés en pédagogie principalement en chirurgie cardiovasculaire [4–9], en chirurgie digestive [10–13], en orthopédie et traumatologie [14–17], et en chirurgie cranio-faciale [18–22]. Ces études ont montré que les modèles imprimés en 3D amélioraient globalement la compréhension et la reconnaissance des structures anatomiques dans l'espace par rapport aux méthodes traditionnelles (images affichées en deux dimensions telles que les manuels et l'apprentissage assisté par ordinateur), soit en améliorant les scores d'évaluation [7,12–15,17,19,21,22], soit par le biais d'une amélioration de la satisfaction des apprenants [5,17,18,20], soulignant l'intérêt de ce support en pédagogie chirurgicale. Les résultats publiés par White et al. illustrent bien cet intérêt sélectif pour l'apprentissage des structures anatomiques complexes, ne montrant aucun avantage supplémentaire des modèles imprimés en 3D pour la compréhension des anomalies septales ventriculaires, mais une meilleure compréhension de la tétralogie de Fallot compte tenu de la complexité particulière de cette pathologie [7]. Il a également été démontré que la mémoire des objets réels était nettement meilleure que leurs représentations bidimensionnelles [23] tandis qu'il existe une influence prédictive des compétences visuo-spatiales sur les performances d'apprentissage en anatomie [24]. D'autre part, l'évaluation unique de la composante haptique par l'évaluation des personnes malvoyantes a montré que les modèles imprimés en 3D donnaient des informations

spécifiques liées à la perception tactile du support imprimé en 3D, soutenant son rôle dans le domaine de la pédagogie [25].

Dans le domaine de la pédagogie maxillo-faciale, seuls 4 essais randomisés contrôlés ont été publiés pour évaluer l'efficacité de modèles imprimés en 3D dans l'enseignement à des étudiants de premier et deuxième cycle [18–20,22]. Chen et al. ont montré que l'apprentissage sur des modèles de crânes colorés imprimés en 3D était supérieur à l'apprentissage sur crânes secs ou à l'aide d'un atlas en facilitant la reconnaissance des structures anatomiques [20]. Dans le domaine de la patho-anatomie, AlAli et al. ont montré que l'utilisation d'un modèle de fente labio-palatine imprimé en 3D entraînait une amélioration significative du pourcentage moyen de connaissances acquises. Une vaste étude randomisée contrôlée a montré l'intérêt des modèles imprimés en 3D de fractures cranio-faciales, en soulignant l'amélioration de la compréhension de cet outil d'apprentissage, notamment pour l'identification diagnostique, la compréhension anatomique et la composante biomécanique [22]. Dans cette étude l'aspect biomécanique a été considéré en évaluant la compréhension des troubles de l'articulé dentaire liés aux déplacements fracturaires. Pour ce faire, les étudiants disposaient de modèles 3D en plusieurs parties (modèle cranio-facial comprenant le maxillaire et modèle de mandibule fracturée) qu'ils pouvaient articuler afin d'évaluer le retentissement des fractures sur l'occlusion dentaire. Lane et al. ont étudié la valeur éducative des modèles imprimés en 3D de différents modèles de craniosténoses, parmi lesquels la scaphocéphalie, la trigonocéphalie et la brachycéphalie [18]. Cette étude, réalisée sur des étudiants de deuxième cycle, s'est concentrée sur l'enseignement de la pathologie cranio-faciale et sa réparation chirurgicale. Elle n'a pas retrouvé de différence statistique selon les supports

d'enseignement (présentation PowerPoint® vs présentation PowerPoint® associée à l'utilisation de modèles imprimés en 3D) même s'il y existait une tendance en faveur des modèles pédagogiques imprimés 3D. Néanmoins, une évaluation qualitative a montré que tous les étudiants du groupe 3D recommanderaient l'utilisation de ces modèles comme support pédagogique. Un essai randomisé contrôlé réalisé par notre équipe, actuellement en cours de publication, a évalué la rétention d'information à long terme selon que le support pédagogique était un modèle 3D de craniosténose ou une photographie d'une représentation 3D. Cet essai a montré une amélioration très significative de la rétention d'information à long terme dans le groupe 3D, associée à un avis qualitatif très favorable de la part des étudiants.

Le principal avantage d'un tel support pédagogique est la capacité à visualiser l'anatomie anormale. Ainsi, de nombreux étudiants de premier et deuxième cycle ont pu suivre lors de leurs études des cours d'anatomie avec dissection cadavérique au cours desquelles ils ont pu se familiariser avec l'anatomie normale. Toutefois, ces séances ne permettent pas l'apprentissage de la patho-anatomie acquise comme par exemple l'étude des différents types de fracture [26]. De la même façon, une pathologie constitutionnelle rare comme une craniosténose n'est pas rencontrée par l'ensemble des étudiants au cours de leur cursus. L'impression 3D offre la possibilité de proposer à volonté les modèles de patho-anatomie quelle que soit leur rareté. Par exemple, dans le cas d'une fracture maxillo-faciale, un modèle imprimé en 3D peut être généré à partir du scanner d'un cas de traumatisme intéressant rencontré dans la pratique clinique ou de la modification du fichier « STL » obtenu à partir d'un scanner indemne de toute fracture [27]. Ces modèles peuvent alors être imprimés en série pour réaliser des enseignements dirigés avec un nombre d'étudiant important. Il est par

ailleurs possible d'annoter les modèles et de les identifier [28]. Toutefois, des expériences en simulation chirurgicale plus élaborées restent anecdotiques pour la chirurgie maxillo-faciale, principalement à cause des difficultés à réaliser un modèle dans un matériau permettant un retour haptique optimal associé à une haute précision d'impression [29]. Les principaux matériaux utilisés en pratique courante sont actuellement l'acide polylactique (PLA), l'acrylonitrile-butadiène-styrène (ABS), le polycarbonate (PC), le polyéthylène téréphtalate glycol modifié (PETG) et le nylon. Haffner et al. ont comparé ces cinq matériaux sur un modèle d'os temporal où les participants effectuaient une mastoïdectomie [30]. Le PETG semblait être le matériau le plus réaliste. Le principal avantage du PLA est représenté par ses propriétés biologiques, car il est connu pour ses propriétés biodégradables et son absence de toxicité. De plus, son retour haptique a été montré comme similaire à celui de l'os à basse température lors du forage. Le PC a été accusé quant-à-lui de fondre trop facilement lors du forage alors que l'ABS semblait facilement reproduire le retour haptique osseux lors d'une mastoïdectomie corticale. Le recours à un modèle anatomique imprimé en 3D en polyméthacrylate a récemment été proposé à 24 internes afin de réaliser une ostéotomie sagittale bilatérale de mandibule. Ce modèle permettait de mieux appréhender l'os trabéculaire après l'ostéotomie corticale ainsi que la phase de clivage. L'évaluation finale a montré une amélioration significative des connaissances et des compétences chirurgicales à toutes les étapes de l'ostéotomie mandibulaire et plus particulièrement avec l'utilisation du bistouri piézoélectrique pour l'ostéotomie et la prise en charge de la dent de sagesse dans la zone de clivage [31]. Si l'apport de l'impression 3D en pédagogie chirurgicale semble être important pour comprendre la patho-anatomie, il existe encore une d'importants progrès à réaliser afin d'obtenir des modèles susceptibles d'être utilisés en simulation chirurgicale,

principalement dans le développement de nouveaux matériaux plus fidèles dans leur rendu biomécanique.

Apports en pratique clinique

L'impression 3D en chirurgie maxillo-faciale peut intervenir sous différentes formes et au travers de plusieurs indications thérapeutiques [1,32]. L'ensemble des étapes de conception et de fabrication assistée par ordinateur (CFAO) peut être déléguée à un industriel ou être réalisée en interne. La reconstruction osseuse lourde, la chirurgie orbito-zygomatique, la chirurgie orthognathique et la chirurgie implantaire et pré-implantaire constituent les indications les plus populaires. Dans une revue récente (Louvrier et al., 2017) des indications et méthodes en chirurgie maxillo-faciale, il a été identifié que 34% des auteurs utilisaient l'impression 3D pour réaliser des modèles anatomiques, 59% pour des guides chirurgicaux, et 35% pour d'autres indications telles que des dispositifs médicaux implantables (23%), des gouttières occlusales (8%) ou des épithèses (4%) [1].

L'impression de modèles anatomiques est utilisée dans un objectif cartographique où de planification pré-chirurgicale, en permettant de déterminer à l'avance le tracé des ostéotomies ou les limites de résection chirurgicale, pour évaluer la perte de substance osseuse avant une greffe ou un lambeau libre osseux, pour aider à la préparation de l'instrumentation chirurgicale ou au choix de la taille ou de la forme d'un implant, ou encore pour pré-conformer des plaques d'ostéosynthèse avant l'intervention

chirurgicale. Dans cet objectif de planification, ils peuvent n'intervenir qu'avant l'étape chirurgicale, où, sous réserve du respect des contraintes réglementaires, être stérilisés et utilisés pendant l'intervention chirurgicale sans contact direct avec le patient. Ils peuvent aussi n'être utilisés que dans un objectif d'information. Schlund et al. ont par exemple proposé l'utilisation de modèles imprimés en 3D à partir de données échographiques prénatales afin d'informer les futurs parents sur les anomalies faciales et le plan de traitement en rapport avec une fente labio-palatine [33].

Un niveau d'utilisation supérieur consiste à réaliser une planification de l'intervention chirurgicale assistée par ordinateur. Le chirurgien, idéalement aidé d'un ingénieur biomédical, détermine les traits d'ostéotomie, le mouvement souhaité des pièces osseuses, ainsi que la position et la forme des plaques d'ostéosynthèse sur un modèle 3D numérique. L'ensemble de cette planification est ensuite transféré au sein de guides de coupe, de forage ou de positionnement, de gouttières occlusales de repositionnement ou de plaques d'ostéosynthèse sur mesure. Ces objets de conception et de fabrication assistée par ordinateur sont ensuite stérilisés pour être utilisés au contact direct du patient et permettent de reproduire les étapes définies numériquement.

Enfin, un troisième niveau est représenté par la conception et la production de dispositifs médicaux implantables. Le chirurgien, idéalement aidé d'un ingénieur biomédical, détermine par CAO la forme d'un implant qui est ensuite produit par impression 3D dans le matériau choisi. De nombreux matériaux peuvent aujourd'hui être imprimés parmi lesquels le titane ou les biocéramiques.

L'exemple emblématique de la reconstruction mandibulaire

L'exemple de plus emblématique de l'utilisation de l'impression 3D en chirurgie maxillo-faciale est celui de la reconstruction mandibulaire, principalement par lambeau libre ostéo-myo-cutané de Fibula. Dans ce type de reconstruction, les trois niveaux d'utilisation de l'impression 3D sont possibles. Le chirurgien peut par exemple réaliser une planification pré-chirurgicale et son impression sur modèle anatomique afin de pré-conformer des plaques d'ostéosynthèse [34]. Villa et al. [34] proposaient ainsi de réaliser numériquement les sections osseuses correspondant à la zone d'exérèse avant de combler le défaut avec des cubes matérialisant le futur lambeau fibulaire. Le modèle était ensuite imprimé de façon à permettre la conformation d'une plaque de reconstruction en titane qui était ensuite stérilisée selon les méthodes classiquement utilisées par l'établissement. Cette technique simple et peu coûteuse présente l'avantage d'obtenir une aide à la réalisation de l'étape de conformation en obtenant une plaque de reconstruction en titane faite « sur mesure » sans toutefois permettre d'avoir un guide de coupe précis de l'os fibulaire, celui-ci restant découpé de façon conventionnelle pour s'appliquer au mieux à la plaque pré-conformée. Pour combler ce fossé, il est d'autre part possible au chirurgien de planifier l'ensemble de la chirurgie d'exérèse et de reconstruction en générant des transferts chirurgicaux [35]. Les guides de coupe utilisés pour les ostéotomies mandibulaires et fibulaires permettent l'exécution du plan prévu en préopératoire, minimisant ainsi le temps requis pour la conformation de l'os fibulaire et améliorant la qualité de la reconstruction en permettant d'obtenir un meilleur résultat morphologique et occlusal. D'autre part, cette technologie permet de réaliser l'ensemble de l'étape de conformation à la jambe, avant le sevrage du lambeau fibulaire, permettant au chirurgien préleveur d'avancer sur la reconstruction mandibulaire avant même la fin de l'exérèse carcinologique, réduisant ainsi le temps chirurgical et la durée de l'ischémie du lambeau. La planification peut

alors être développée à l'extrême, en simulant les guides de positionnement des implants dentaires qui permettront de fixer ou de stabiliser une prothèse dentaire. Ces implants ainsi que la prothèse pourront également être mis en place à la jambe avant le sevrage du lambeau libre [36]. Pour ce faire, le chirurgien peut avoir recours à un industriel où produire ces dispositifs de façon internalisée, respectant toutefois un certain nombre d'aspects réglementaires, dont l'évolution est constante. Bosc et al. ont ainsi montré une utilisation de guides de coupe de fabrication non industrielle avec une haute précision dans le cadre d'une étude multicentrique [37,38]. Cette production internalisée, couplée à l'utilisation d'une suite logicielle en Open-source, permet une réduction significative des coûts [39]. Enfin, le chirurgien peut avoir recours à des implants mandibulaires confectionnés sur mesure et produits par impression 3D [40]. Ces dispositifs médicaux implantables présentent l'avantage de s'affranchir des transferts et d'obtenir la reconstruction de la perte de substance souhaitée. En reconstruction mandibulaire, il existe encore peu de preuves scientifiques permettant de justifier de leur utilisation en routine. Il existe encore certains verrous, tels que l'irradiation postopératoire, qui contribuent aux freins existants. Toutefois, les avantages sont nombreux et les bénéfices rapportés supérieurs aux inconvénients, faisant de ces dispositifs une option d'avenir possible particulièrement en chirurgie de reconstruction de l'articulation temporo-mandibulaire [40].

Une revue systématique réalisée par Serrano et al. en 2019 a évalué les résultats de 14 études comparatives ayant eu recours à différents niveaux d'impression 3D pour la reconstruction des mâchoires (93.7% de reconstructions mandibulaires) [41]. Les résultats comparatifs n'ont pas mis en évidence de différence significative selon que les patients aient bénéficié de l'impression 3D ou d'une planification conventionnelle

pour la survenue de complications ou pour la durée d'hospitalisation. En revanche, il a été mis en évidence une différence significative en faveur de l'impression 3D pour la durée opératoire, les résultats esthétiques et la précision du transplant. D'autre part, une méta-analyse effectuée sur 4 de ces études a montré que le temps opératoire était significativement réduit avec impression 3D avec un effet global de 21.2% (IC95% [10 ; 33], $p < 0.001$). La revue systématique publiée par Nilsson et al. en 2020 a quant-à-elle comparé les résultats de la chirurgie de reconstruction des mâchoires assistée par ordinateur avec recours à des guides/plaques imprimés 3D à la chirurgie avec planification conventionnelle [42]. Une méta-analyse effectuée sur 15 études a alors montré que la CFAO permettait de réduire le temps opératoire de 84.61 min (IC95% [-106.77 ; -62,45], $p < 0.001$) et le temps d'ischémie du lambeau de 36.14 min (IC95% [-50.57 ; -21.71], $p < 0.001$) par rapport à la chirurgie conventionnelle. Elle retrouvait également une réduction du temps d'hospitalisation de 1.99 jours (IC95% [-3.80 ; -0.18], $p=0.03$) suggérant un enjeu médico-économique de ce type de dispositifs médicaux. Ces résultats sont globalement similaires à ceux publiés par Baar et al. qui montraient une réduction significative du temps opératoire de 44,64 minutes (IC95% [-74,69 ; -14,58], $p<0,01$) et de la durée d'hospitalisation de 1,24 jours (IC95% [-4,00 ; 1,52], $p=0,38$), chez les patients ayant bénéficié d'une reconstruction par CFAO [43]. Powcharoen et al. présentaient également une réduction du temps ischémique, du temps de reconstruction, du temps opératoire total et une durée de séjour plus courte [44]. Il n'y avait par ailleurs, comme pour Barr et al. [43], aucune différence dans le taux de complications postopératoires. Toutefois, il peut exister des erreurs à toutes les étapes de la CFAO (segmentation, impression 3D ou encore mauvaise utilisation des transferts), générant une imprécision dans le résultat chirurgical obtenu. Deux récentes revues systématiques de la littérature (Van Baar et al. 2018 ; Pucci et al.,

2020) ont tenté d'évaluer la précision des résultats lorsque la reconstruction mandibulaire avait nécessité un recours à la CFAO [45,46]. Toutes deux ont montré d'importantes variations entre la planification pré-chirurgicale et le résultat chirurgical obtenu. Van Baar et al. ont étudié 413 reconstructions mandibulaires dans 42 études et comparé le modèle 3D planifié au modèle postopératoire, estimant des déviations entre 0 et 12.5mm et 0.9 et 17.5° [45]. Dans 12 de ces études, le groupe CFAO a été comparé avec un groupe similaire traité sans CFAO mettant en évidence une amélioration de la précision avec la CFAO. Les résultats publiés par Pucci et al. ont montré quant-à-eux une différence moyenne pondérée pour la distance inter-condylienne estimée à 2mm pour la CFAO versus 3.9mm pour la chirurgie manuelle, ($p=0.101$), à 3.6° pour l'angle goniale versus 7.7° ($p<0.05$) [46]. L'industrialisation des procédés de fabrication, l'expérience du chirurgien dans l'utilisation des guides de coupe, ou encore l'optimisation de la conception des guides peuvent permettre de réduire ces variations de résultat. Druelle et al. ont ainsi imaginé un guide de coupe en suspension, s'affranchissant des tissus mous qui peuvent générer une imprécision lors de l'application du transfert sur le site de prélèvement [35].

Alors que la reconstruction mandibulaire par lambeau libre ostéo-myo-cutané de fibula a constitué un des premiers modèles dans le développement de la CFAO en chirurgie maxillo-faciale, d'autres indications cliniques ont progressivement vu le jour. En effet, il apparaît que ces transferts permettent une optimisation de la qualité des reconstructions osseuses craniofaciales dont l'anatomie est particulièrement complexe, nécessitant une gestion tridimensionnelle. Ainsi, la CFAO s'est progressivement développée dans d'autres domaines d'activité de la sphère oro-

faciale comme la chirurgie orbito-zygomatique, la chirurgie orthognathique, ou encore la chirurgie implantaire et pré-implantaire.

En chirurgie orbito-zygomatique, la CFAO permet en associant une superposition à partir du complexe orbito-zygomatique sain controlatéral et une mesure de la volumétrie orbitaire, de réaliser des reconstructions qui prennent en compte l'ensemble des éléments morpho-fonctionnels et permettent de gérer l'énophtalmie [47,48]. Il est ainsi possible d'utiliser la CFAO pour produire des modèles anatomiques qui permettront de pré-conformer une plaque d'ostéosynthèse dans le traitement d'une reconstruction du cadre orbitaire [49,50], de produire des transferts en vue d'une greffe osseuse autologue orbito-zygomatique d'origine crânienne [51,52] ou pour produire un implant en titane ou en biocéramique [53,54]. Toutefois, le volume orbitaire n'étant pas le seul paramètre à prendre en compte dans le rapport contenu/contenant de l'orbite, et compte tenu de la modification possible du volume de la péri-orbite dans certaines pathologies, il est parfois difficile dans les reconstructions orbito-zygomatiques complexes d'obtenir une correction optimale de l'énophtalmie. De ce fait, des ajustements per-opératoires ou une intervention complémentaire peuvent être nécessaires [47].

Concernant la chirurgie orthognathique, plusieurs méthodes sont possibles [55–57]. L'impression 3D permet d'obtenir des gouttières de repositionnement occlusal qui permettent de réaliser les mouvements du maxillaire ou de la mandibule tels qu'ils ont été définis préalablement lors de la planification. Ainsi, si le chirurgien débute par l'ostéotomie maxillaire, il dispose d'une première gouttière qu'il positionne sur l'arcade mandibulaire puis vient y associer le maxillaire sectionné afin d'effectuer son repositionnement. Une fois l'ostéosynthèse du maxillaire effectuée, une gouttière d'intercuspidation permet d'obtenir le résultat occlusal souhaité. Il est également

possible de réaliser des guides de coupe et de forage avec des plaques d'ostéosynthèse sur mesure. Néanmoins, la précision accrue nécessaire à la réalisation de guides de coupe, pour un obtenir un résultat garant des exigences occlusales, impose une conception industrialisée avec des guides idéalement réalisés en titane ou avec un appui dentaire [57,58]. Malgré le faible niveau de preuves, ces dispositifs semblent suffisamment précis dans cette indication [59]. Ils sont particulièrement adaptés à la gestion des grandes asymétries faciales, qu'elles soient malformatives ou non, pour lesquelles il est parfois compliqué d'effectuer un repositionnement dans les 3 sens de l'espace avec un résultat orthogonal [56].

Dans le domaine de l'implantologie dentaire et de la chirurgie pré-implantaire, l'utilisation des guides radiologiques et des guides chirurgicaux a été initialement basée sur l'utilisation des prothèses amovibles du patient qui étaient perforées dans l'axe dentaire, soit directement, soit après réalisation d'un duplicata. La généralisation de la planification tridimensionnelle a fait évoluer le concept en positionnant les implants sur l'imagerie pour évaluer le besoin d'une éventuelle greffe osseuse, puis la possibilité de réaliser un guide chirurgical tenant compte de la position virtuelle des implants. Ces guides sur mesure possèdent un diamètre et une hauteur des futs de forage définis à partir de la planification tridimensionnelle et permettent, d'une part de respecter parfaitement l'axe de pose et le point d'émergence sur la zone crestale, mais également de réaliser un forage avec des systèmes de réduction de diamètre dégressifs et des forêts de longueur adaptées pour réaliser le forage jusqu'à la butée du guide sur mesure pour assurer de respecter l'enfouissement du forage et éviter les organes nobles. Ainsi l'ensemble du forage et du placement de l'implant peut se réaliser guide en place sans réalisation de lambeau muqueux (technique flap-less), uniquement par operculisation de la muqueuse en regard du fut de forage [60]. Ceci

peut s'envisager pour tous types d'implants, courts, standards, longs (type zygomatique [61], au niveau endobuccal, mais également directement durant le prélèvement d'un lambeau micro-anastomosé [62]. L'utilisation des guides de coupe est également utile pour la pré-conformation sur site des fragments d'os prélevés sur mesure grâce aux guides de coupe et aux pré-trous d'assemblage dans un objectif pré-implantaire [51, 63]. Finalement l'ensemble des procédures implantaire et pré-implantaire pouvant être couplées à la chirurgie orthognathique (Le Fort I-greffe) peut être facilité par la CFAO.

Conclusion

L'impression 3D présente un intérêt en pédagogie ou elle trouve sa place dans la confection de modèles de patho-anatomie. Le développement de nouveaux matériaux reste fondamental pour permettre le développement de modèles pertinent pour un usage en simulation chirurgicale. En pratique clinique, la CFAO a permis d'optimiser le résultat des procédures les plus complexes. Des études médico-économiques semblent indispensables pour arbitrer son usage au quotidien pour des procédures plus standard. Enfin, son développement sera à mettre en perspectives avec le développement plus récent de la réalité augmentée et virtuelle qui peut permettre de transférer la planification pré-chirurgicale sans impression de transferts physiques. Les guides virtuels permettent alors de s'affranchir des étapes de fabrication assistée par ordinateur, limitant les contraintes règlementaires et sanitaires liées à la production d'un dispositif en contact avec le patient.

Déclaration de liens d'intérêts

Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

Références

- [1] Louvrier A, Marty P, Barrabé A, Euvrard E, Chatelain B, Weber E, et al. How useful is 3D printing in maxillofacial surgery? *J Stomatol Oral Maxillofac Surg* 2017;118: 206-12.
- [2] Langridge B, Momin S, Coumbe B, Woin E, Griffin M, Butler P. Systematic Review of the Use of 3-Dimensional Printing in Surgical Teaching and Assessment. *J Surg Educ* 2018;75: 209-21.
- [3] Grall P, Ferri J, Nicot R. Surgical training 2.0: A systematic approach reviewing the literature focusing on oral maxillofacial surgery - Part I. *J Stomatol Oral Maxillofac Surg* 2021; S2468-7855(21)00007-0.
- [4] Lim KHA, Loo ZY, Goldie SJ, Adams JW, McMenamin PG. Use of 3D printed models in medical education: A randomized control trial comparing 3D prints versus cadaveric materials for learning external cardiac anatomy. *Anat Sci Educ* 2016;9: 213-21.
- [5] Loke Y-H, Harahsheh AS, Krieger A, Olivieri LJ. Usage of 3D models of tetralogy of Fallot for medical education: impact on learning congenital heart disease. *BMC Med Educ* 2017;17: 54.
- [6] Jones TW, Seckeler MD. Use of 3D models of vascular rings and slings to improve resident education. *Congenit Heart Dis* 2017;12: 578-82.
- [7] White SC, Sedler J, Jones TW, Seckeler M. Utility of three-dimensional models in resident education on simple and complex intracardiac congenital heart defects. *Congenit Heart Dis* 2018;13: 1045-9.
- [8] Su W, Xiao Y, He S, Huang P, Deng X. Three-dimensional printing models in congenital heart disease education for medical students: a controlled comparative study. *BMC Med Educ* 2018;18: 178.
- [9] Wang Z, Liu Y, Luo H, Gao C, Zhang J, Dai Y. Is a Three-Dimensional Printing Model Better Than a Traditional Cardiac Model for Medical Education? A Pilot Randomized Controlled Study. *Acta Cardiol Sin* 2017;33: 664-9.
- [10] Kong X, Nie L, Zhang H, Wang Z, Ye Q, Tang L, et al. Do 3D Printing Models Improve Anatomical Teaching About Hepatic Segments to Medical Students? A Randomized Controlled Study. *World J Surg* 2016;40: 1969-76.
- [11] Li A, Tang R, Rong Z, Zeng J, Xiang C, Yu L, et al. The Use of Three-Dimensional Printing Model in the Training of Choledochoscopy Techniques. *World J Surg* 2018;42: 4033-8.
- [12] Bangeas P, Drevelegas K, Agorastou C, Tzounis L, Chorti A, Paramythiotis D, et al. Three-dimensional printing as an educational tool in colorectal surgery. *Front Biosci [Elite Ed]* 2019;11: 29-37.
- [13] Kong X, Nie L, Zhang H, Wang Z, Ye Q, Tang L, et al. Do Three-dimensional Visualization and Three-dimensional Printing Improve Hepatic Segment Anatomy Teaching? A Randomized Controlled Study. *J Surg Educ* 2016;73: 264-9.
- [14] Lim PK, Stephenson GS, Keown TW, Byrne C, Lin CC, Marecek GS, et al. Use of 3D Printed Models in Resident Education for the Classification of Acetabulum Fractures. *J Surg Educ* 2018;75: 1679-84.
- [15] Bohl MA, Zhou JJ, Mooney MA, Repp GJ, Cavallo C, Nakaji P, et al. The Barrow Biomimetic Spine: effect of a 3-dimensional-printed spinal osteotomy model on performance of spinal osteotomies by medical students and interns. *J Spine Surg* 2019;5: 58-65.
- [16] Huang Z, Song W, Zhang Y, Zhang Q, Zhou D, Zhou X, et al. Three-dimensional printing model improves morphological understanding in acetabular

fracture learning: A multicenter, randomized, controlled study. *PloS One* 2018;13:e0191328.

[17] Li Z, Li Z, Xu R, Li M, Li J, Liu Y, et al. Three-dimensional printing models improve understanding of spinal fracture--A randomized controlled study in China. *Sci Rep* 2015;5: 11570.

[18] Lane JC, Black JS. Modeling Medical Education: The Impact of Three-Dimensional Printed Models on Medical Student Education in Plastic Surgery. *J Craniofac Surg* 2020;31(4): 1018-21.

[19] AlAli AB, Griffin MF, Calonge WM, Butler PE. Evaluating the Use of Cleft Lip and Palate 3D-Printed Models as a Teaching Aid. *J Surg Educ* 2018;75: 200-8.

[20] Chen S, Pan Z, Wu Y, Gu Z, Li M, Liang Z, et al. The role of three-dimensional printed models of skull in anatomy education: a randomized controlled trial. *Sci Rep* 2017;7: 575.

[21] Yi X, Ding C, Xu H, Huang T, Kang D, Wang D. Three-Dimensional Printed Models in Anatomy Education of the Ventricular System: A Randomized Controlled Study. *World Neurosurg* 2019;125: e891-901.

[22] Nicot R, Druelle C, Chazard E, Roland-Billecart T, Nuytten A, Richard F, et al. Three-dimensional (3D) printing model enhances craniofacial trauma teaching by improving morphological and biomechanical understanding: A randomized controlled study. 2021; In Press.

[23] Snow JC, Skiba RM, Coleman TL, Berryhill ME. Real-world objects are more memorable than photographs of objects. *Front Hum Neurosci* 2014;8: 837.

[24] Berney S, Bétrancourt M, Molinari G, Hoyek N. How spatial abilities and dynamic visualizations interplay when learning functional anatomy with 3D anatomical models. *Anat Sci Educ* 2015;8: 452-62.

[25] Nicot R, Hurteloup E, Joachim S, Druelle C, Levailant JM. Using low-cost 3D-printed models of prenatal ultrasonography for visually-impaired expectant persons. *Patient Educ Couns* 2021; S0738-3991(21)00131-2.

[26] Seifert LB, Schnurr B, Herrera-Vizcaino C, Begic A, Thieringer F, Schwarz F, et al. 3D printed patient individualised models versus cadaveric models in an undergraduate oral and maxillofacial surgery curriculum: Comparison of students' perceptions. *Eur J Dent Educ* 2020;24: 809-10.

[27] Nicot R, Druelle C, Schlund M, Roland-Billecart T, Gwénaél R, Ferri J, et al. Use of 3D printed models in student education of craniofacial traumas. *Dent Traumatol* 2019;35: 296-9.

[28] Druelle C, Ferri J, Mahy P, Nicot R, Olszewski R. A simple, no-cost method for 3D printed model identification. *J Stomatol Oral Maxillofac Surg* 2020;121: 219-25.

[29] Meglioli M, Naveau A, Macaluso GM, Catros S. 3D printed bone models in oral and cranio-maxillofacial surgery: a systematic review. *3D Print Med* 2020;6: 30.

[30] Haffner M, Quinn A, Hsieh T-Y, Strong EB, Steele T. Optimization of 3D Print Material for the Recreation of Patient-Specific Temporal Bone Models. *Ann Otol Rhinol Laryngol* 2018;127: 338-43.

[31] Bertin H, Huon J-F, Praud M, Fauvel F, Salagnac J-M, Perrin J-P, et al. Bilateral sagittal split osteotomy training on mandibular 3-dimensional printed models for maxillofacial surgical residents. *Br J Oral Maxillofac Surg* 2020;58: 953-8.

[32] Chepelev L, Wake N, Ryan J, Althobaity W, Gupta A, Arribas E, et al. Radiological Society of North America (RSNA) 3D printing Special Interest Group (SIG): guidelines for medical 3D printing and appropriateness for clinical scenarios. *3D Print Med* 2018;4: 11.

[33] Schlund M, Levailant J-M, Nicot R. Three-Dimensional Printing of Prenatal

Ultrasonographic Diagnosis of Cleft Lip and Palate: Presenting the Needed « Know-How » and Discussing Its Use in Parental Education. *Cleft Palate-Craniofacial J* 2020;57: 1041-4.

[34] Villa S, Druelle C, Juliéron M, Nicot R. [3D-assisted mandibular reconstruction: A technical note of fibula free flap with preshaped titanium plate]. *Ann Chir Plast Esthet* 2021;66: 174-9.

[35] Druelle C, Schlund M, Lutz JC, Constant M, Raoul G, Nicot R. A modified method for a customized harvest of fibula free flap in maxillofacial reconstruction. *J Stomatol Oral Maxillofac Surg* 2020;121: 74-6.

[36] Schepers RH, Raghoobar GM, Vissink A, Lahoda LU, Van der Meer WJ, Roodenburg JL, et al. Fully 3-dimensional digitally planned reconstruction of a mandible with a free vascularized fibula and immediate placement of an implant-supported prosthetic construction. *Head Neck* 2013;35: E109-114.

[37] Bosc R, Hersant B, Carloni R, Niddam J, Bouhassira J, De Kermadec H, et al. Mandibular reconstruction after cancer: an in-house approach to manufacturing cutting guides. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2017;46: 24-31.

[38] Ganry L, Quilichini J, Bandini CM, Leyder P, Hersant B, Meningaud JP. 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.

[39] 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.

[40] Goodson AM, Kittur MA, Evans PL, Williams EM. Patient-specific, printed titanium implants for reconstruction of mandibular continuity defects: A systematic review of the evidence. *J Cranio-Maxillo-fac Surg* 2019;47: 968-76.

[41] Serrano C, van den Brink H, Pineau J, Prognon P, Martelli N. Benefits of 3D printing applications in jaw reconstruction: A systematic review and meta-analysis. *J Cranio-Maxillo-fac* 2019;47: 1387-97.

[42] Nilsson J, Hindocha N, Thor A. Time matters - Differences between computer-assisted surgery and conventional planning in cranio-maxillofacial surgery: A systematic review and meta-analysis. *J Cranio-Maxillo-fac Surg* 2020;48: 132-40.

[43] Barr ML, Haveles CS, Rezzadeh KS, Nolan IT, Castro R, Lee JC, et al. Virtual Surgical Planning for Mandibular Reconstruction With the Fibula Free Flap: A Systematic Review and Meta-analysis. *Ann Plast Surg* 2020;84: 117-22.

[44] Powcharoen W, Yang WF, Yan Li K, Zhu W, Su YX. Computer-Assisted versus Conventional Freehand Mandibular Reconstruction with Fibula Free Flap: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Plast Reconstr Surg* 2019;144: 1417-28.

[45] van Baar GJC, Forouzanfar T, Liberton NPTJ, Winters HAH, Leusink FKJ. Accuracy of computer-assisted surgery in mandibular reconstruction: A systematic review. *Oral Oncol* 2018;84: 52-60.

[46] Pucci R, Weyh A, Smotherman C, Valentini V, Bunnell A, Fernandes R. Accuracy of virtual planned surgery versus conventional free-hand surgery for reconstruction of the mandible with osteocutaneous free flaps. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2020;49: 1153-61.

[47] Sentucq C, Schlund M, Bouet B, Garms M, Ferri J, Jacques T, et al. Overview of tools for the measurement of the orbital volume and their applications to orbital surgery. *J Plast Reconstr Aesthetic Surg* 2021;74: 581-91.

[48] Scolozzi P. Applications of 3D orbital computer-assisted surgery (CAS). *J*

Stomatol Oral Maxillofac Surg 2017;118: 217-23.

[49] Blumer M, Pejicic R, Gander T, Johner JP, Held U, Wagner ME. Customized Titanium Reconstruction of Orbital Fractures Using a Mirroring Technique for Virtual Reconstruction and 3D Model Printing. *J Oral Maxillofac Surg* 2021;79: 200.e1-200.e9.

[50] Dvoracek LA, Lee JY, Unadkat JV, Lee YH, Thakrar D, Losee JE, et al. Low-Cost, Three-Dimensionally-Printed, Anatomical Models for Optimization of Orbital Wall Reconstruction. *Plast Reconstr Surg* 2021;147: 162-6.

[51] Nicot R, Schlund M, Sentucq C, Raoul G. A New Orbito-Zygomatic Complex Reconstruction Technique Using Computer-Aided Design and Manufacturing-Assisted Harvest of Autologous Calvarial Bone in Cases of Orbito-Zygomatic Benign Tumor. *J Oral Maxillofac Surg* 2019;77: 1082-91.

[52] Opdenakker Y, Ferri J, Nicot R. Workflow for Pediatric Midface and Orbital Reconstruction With a Patient-Specific Autogenous Bone Graft. *Ophthal Plast Reconstr Surg* 2018;34: e172-5.

[53] Kim YC, Min KH, Choi JW, Koh KS, Oh TS, Jeong WS. Patient-specific puzzle implant preformed with 3D-printed rapid prototype model for combined orbital floor and medial wall fracture. *J Plast Reconstr Aesthetic Surg* 2018;71: 496-503.

[54] Rana M, Chui CHK, Wagner M, Zimmerer R, Rana M, Gellrich N-C. Increasing the accuracy of orbital reconstruction with selective laser-melted patient-specific implants combined with intraoperative navigation. *J Oral Maxillofac Surg* 2015;73: 1113-8.

[55] Chen H, Bi R, Hu Z, Chen J, Jiang N, Wu G, et al. Comparison of three different types of splints and templates for maxilla repositioning in bimaxillary orthognathic surgery: a randomized controlled trial. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2020; S0901-5027(20)30375-1

[56] Jandali D, Barrera JE. Recent advances in orthognathic surgery. *Curr Opin Otolaryngol Head Neck Surg* 2020;28: 246-50.

[57] Memon AR, Li D, Hu J, Wang E, Zhang D, Chen X. The development of computer-aided patient-specific template design software for 3D printing in cranio-maxillofacial surgery. *Int J Med Robot Comput Assist Surg* 2021; e2243.

[58] Greenberg S, Buchbinder D, Turner MD, Dhillon P, Afshar AA. Three-Dimensional Repositioning of the Maxilla in Orthognathic Surgery Using Patient-Specific Titanium Plates: A Case Series. *J Oral Maxillofac Surg* 2021;79: 902-13.

[59] Figueiredo CE, Paranhos LR, da Silva RP, Herval ÁM, Blumenberg C, Zanetta-Barbosa D. Accuracy of orthognathic surgery with customized titanium plates-Systematic review. *J Stomatol Oral Maxillofac Surg* 2021;122: 88-97.

[60] D'haese R, Vrombaut T, Hommez G, De Bruyn H, Vandeweghe S. Accuracy of Guided Implant Surgery in the Edentulous Jaw Using Desktop 3D-Printed Mucosal Supported Guides. *J Clin Med* 2021;10: 391.

[61] Wang CI, Cho S-H, Ivey A, Reddy LV, Sinada N. Combined bone- and mucosa-supported 3D-printed guide for sinus slot preparation and prosthetically driven zygomatic implant placement. *J Prosthet Dent* 2021; S0022-3913(21)00107-4

[62] Schouman T, Khonsari RH, Goudot P. Shaping the fibula without fumbling: the SynpliciTi customised guide-plate. *Br J Oral Maxillofac Surg* 2015;53: 472-3.

[63] Nicot R, Schlund M, Touzet-Roumazeille S, Ferri J, Raoul G. Unicortical Calvarial Autologous Bone Graft Harvest. *Plast Reconstr Surg Glob Open* 2020;8: e3241.

Figures

Figure 1 : Modèle imprimé en 3D en deux parties articulables représentant la face d'un traumatisé crânien avec une fracture de l'os zygomatique gauche et une fracture bifocale de mandibule associant une fracture angulaire droite et une fracture parasymphysaire gauche.

Figure 2 : Planification préopératoire de l'exérèse d'une tumeur osseuse bénigne avec agressivité locale associée une reconstruction du maxillaire par un lambeau libre ostéo-myo-cutané de fibula sur mesure. Une réhabilitation implantaire est planifiée dans le même temps opératoire en réglant axes et émergences des implants en fonction de la superposition avec la denture sacrifiée (Materialise, Leuven, Belgium).

Figure 3 : Photographie peropératoire d'une reconstruction mandibulaire avec réhabilitation implantaire sur mesure (Materialise, Leuven, Belgium). Le lambeau libre est conformé avant l'étape de sevrage des vaisseaux fibulaires. Après sevrage, il pourra être mis en place directement au niveau du site receveur, sans conformation supplémentaire, limitant son temps d'ischémie.

Figure 4 : Planification d'une reconstruction orbito-zygomatique complexe chez une patiente multi-opérée dans un contexte de polytraumatisme facial avec fracture enfoncement de l'os zygomatique gauche et énoptalmie sévère résiduelle (Materialise, Leuven, Belgium). La volumétrie orbitaire, couplée à la réalisation d'une superposition en miroir par rapport au côté sain, permet de retrouver une anatomie optimale avec un contrôle du volume intra-orbitaire. Plaques et grille en titane sont

imprimés sur mesure. Un prélèvement crânien sur mesure y est associé dans l'objectif d'une greffe d'apposition zygomatique.

Figure 5 : Planification d'une chirurgie orthognathique sur mesure pour la gestion d'une dysmorphose dento-maxillo-faciale avec une importante asymétrie faciale (Materialise, Leuven, Belgium).

Figure 6 : Guides chirurgicaux à usage implantaire sur mesure permettant de réaliser un forage avec des systèmes de réduction de diamètre dégressifs et des forêts de longueur adaptées (A, B), et de respecter parfaitement l'axe de pose et le point d'émergence sur la zone crestale (C, D).











