

CHIRURGIE ORTHOGNATHIQUE GUIDÉE : IMPRESSION 3D IN-HOUSE ET IMPLANTS SUR MESURE

La chirurgie orthognathique a profité, comme cela a été le cas pour l'implantologie, des outils numériques. La création d'un clone numérique du patient permet au praticien de planifier la chirurgie sur ordinateur. L'acquisition squelettique se fera via le scanner ou le cone-beam, l'acquisition dentaire via l'empreinte optique, et l'acquisition surfacique cutanée via la photogrammétrie ou le scanner. Plus rarement, on pourra réaliser une acquisition cinématique par l'enregistrement des amplitudes articulaires (Modjaw®). Le transfert de cette planification au bloc opératoire peut se faire de multiples façons. Si, initialement, plusieurs solutions ont été envisagées en chirurgie guidée dynamique ou statique, le recul actuel de plus de dix ans a permis de valider deux solutions : les gouttières d'intercuspidation, dont l'impression 3D peut se faire au cabinet, ou les guides de coupe/préforages et plaques sur mesure en titane qui produits par un industriel.

AUTEURS

Serge KETTOFF

Chirurgien maxillo-facial
Pratique privée, Paris
Service de chirurgie maxillo-faciale, Hôpital Paris
Saint Joseph, Paris

Gabrielle MAGNANT

Spécialiste en orthodontie dento-faciale
Service de chirurgie maxillo-faciale, Hôpital Paris
Saint Joseph, Paris
Centre dentaire Nanterre Préfecture, Nanterre

Natacha NIEZ

Spécialiste en orthodontie dento-faciale
Service de chirurgie maxillo-faciale, Hôpital Paris
Saint Joseph, Paris
Centre dentaire Reuilly Diderot, Paris

Liens d'intérêts
A venir.

Référencement
bibliographique

Ketoff S, Magnant G, Niez N. Chirurgie orthognathique guidée : impression 3D In-House et implants sur mesure. *Clinic* 2025;46(452/453):40-51.

L'orthognathie est une chirurgie qui, de principe, nécessite une planification. L'occlusion est définie conjointement par le chirurgien et l'orthodontiste. Les mouvements squelettiques sont définis par l'analyse clinique fonctionnelle et esthétique du visage avec l'aide de l'analyse céphalométrique.

Historiquement, la planification était basée sur un dossier clinique se composant d'éléments en deux dimensions (photographies, téléradiographies) et d'éléments tridimensionnels comme les modèles en plâtre et l'enregistrement de l'arc facial (*figure 1*). Cela permettait de planifier les mouvements chirurgicaux qui étaient reproduits ensuite sur les modèles en plâtre afin de réaliser des gouttières chirurgicales. Ce procédé est imprécis et de nombreuses informations ne sont pas prises en compte, ce qui remet en cause sa fiabilité [1].

L'acquisition par tomographie ou cone beam permet d'obtenir la morphologie tridimensionnelle du patient, mais aussi les détails anatomiques importants pour les ostéotomies (nerf alvéolaire, racines dentaires, épaisseurs des corticales).

L'arc facial n'est plus nécessaire étant donné que les mouvements articulaires mandibulaires peuvent être simulés en 3D sur la position réelle des condyles.

LA CHIRURGIE ORTHOGNATHIQUE GUIDÉE

La chirurgie guidée a pour principe de transférer une planification chirurgicale informatisée au bloc opératoire. Elle peut être divisée en trois catégories (*figure 2*):

- la chirurgie guidée statique : à l'aide de guides physiques imprimés en 3D ;
- la chirurgie guidée dynamique : un dispositif actif lors de la chirurgie

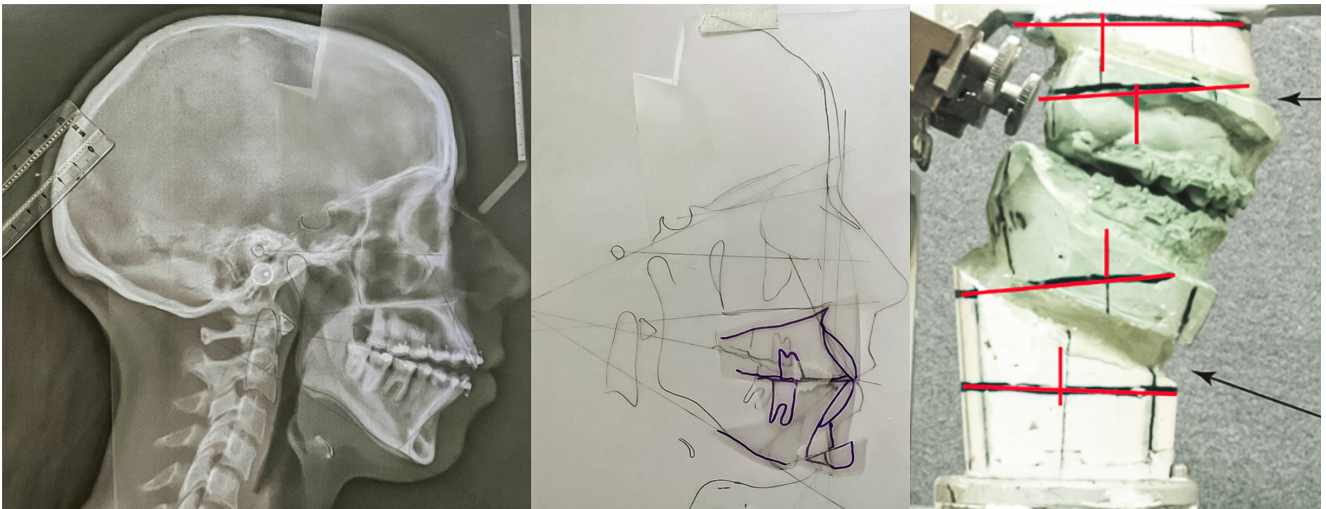
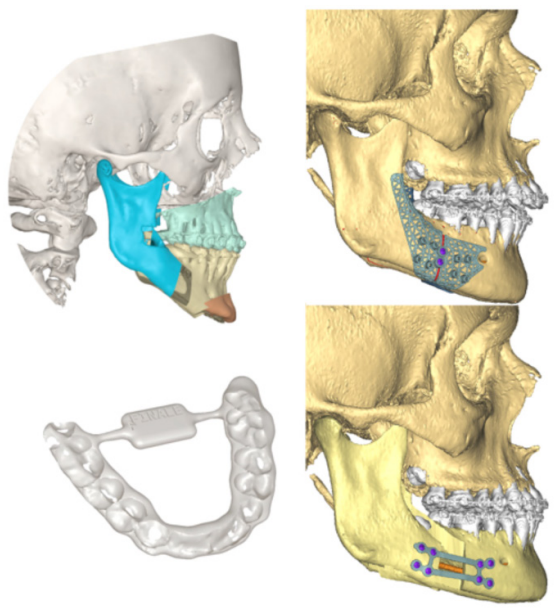



Figure 1
Planification conventionnelle céphalométrique et « chirurgie des calques » puis transfert sur les modèles.

CHIRURGIE GUIDÉE


1
STATIQUE :
GUIDE / PSI



2
DYNAMIQUE :
NAVIGATION / AR



3
ROBOTISÉE
AUTONOME



CHU AMIENS 2022

Figure 2
Les trois modalités de chirurgie guidée. En chirurgie orthognathique, seule la chirurgie guidée statique est utilisée en pratique courante.



Figure 3

Classe 2 dentaire et squelettique avec apnée du sommeil.

permet au chirurgien de repérer un point (en général un instrument) de manière dynamique dans l'espace par rapport à la planification informatisée (exemple du Xguide pour l'implantologie ou des lunettes de réalité augmentée). Ce procédé n'est pas utilisé de façon courante en chirurgie orthognathique ;

- la chirurgie guidée autonome robotisée : dans le cadre de projets de recherche a eu lieu une première ostéotomie de Le Fort I automatisée par robot autonome (ostéotomie laser) [2]. De façon courante, c'est la chirurgie guidée statique qui est utilisée *via* deux procédés. Le premier est l'impression 3D de gouttières chirurgicales, qui date du début des années 2000 [3]. Elle s'est démocratisée du fait de sa fiabilité, de son faible coût et de la facilité d'usage des imprimantes 3D. Le second est les guides de coupe et plaques sur mesure imprimés en titane qui ont été introduits aux cours des années 2010 et largement développés par des équipes françaises [4].

PRINCIPE D'ACQUISITION DES DONNÉES PRÉOPÉRATOIRES

Comme toute chirurgie guidée, un jeu de données fiable est primordial pour une planification précise. La contrainte

de l'enregistrement de l'occlusion est de le réaliser en l'absence de mouvement dentaire orthodontique ultérieur afin d'avoir un jeu de données fiable et identique lors de la chirurgie. Dans le cadre de gouttières sur mesure de production locale, il peut se faire dans un délai de quelques jours seulement avant l'intervention. Il doit en revanche être anticipé d'au minimum six semaines avant la chirurgie, si l'on souhaite réaliser des guides de coupe et des plaques sur mesure en titane (planification en binôme avec l'ingénieur biomédical et délais de production important).

Les modalités d'acquisition radiologique du massif facial font débat, notamment concernant la position des condyles mandibulaires qui doivent être en relation centrée. En effet, cette position diffère si le patient est en décubitus dorsal lors d'un scanner voire assis ou debout lors d'un cone beam. Le port d'une cire d'occlusion en relation centrée lors de l'examen radiologique peut être utilisé pour pallier ce problème. Cette cire est confectionnée en amont.

La prise d'empreinte peut se faire par empreinte optique. L'occlusion finale est planifiée dans la majorité des cas par la mise en occlusion des modèles imprimés afin d'avoir une sensation haptique. Ces modèles sont ensuite

scannés en occlusion (empreinte optique ou cone beam) afin d'être importés dans la planification. Pour certains, l'occlusion peut être établie de façon complètement numérique.

CAS CLINIQUE : CHIRURGIE ORTHOGNATHIQUE AVEC GOUTTIÈRES D'INTERCUSPIDATION 3D PRODUITES « IN HOUSE »

Une patiente de 17 ans présente une classe 2 dentaire et squelettique avec apnée du sommeil sévère appareillée (*figure 3*). Le protocole orthodontique et chirurgical prévoit une décompensation de la classe 2. La chirurgie ne peut pas se limiter à une avancée mandibulaire pour normaliser l'occlusion car il faut prendre en compte l'apnée du sommeil et majorer l'avancée mandibulaire en réalisant une avancée et une rotation antihoraire du maxillaire. La planification 3D permet de quantifier précisément les mouvements chirurgicaux (*figure 4a*). La plupart des logiciels de planification peuvent réaliser une simulation des tissus mous (*figure 4b*), le praticien doit rester critique à l'égard de la fiabilité de celle-ci.

Selon les logiciels, le dessin de la gouttière d'intercuspidation est manuel ou automatisé (*figure 5*). Le praticien doit choisir de commencer par l'ostéotomie

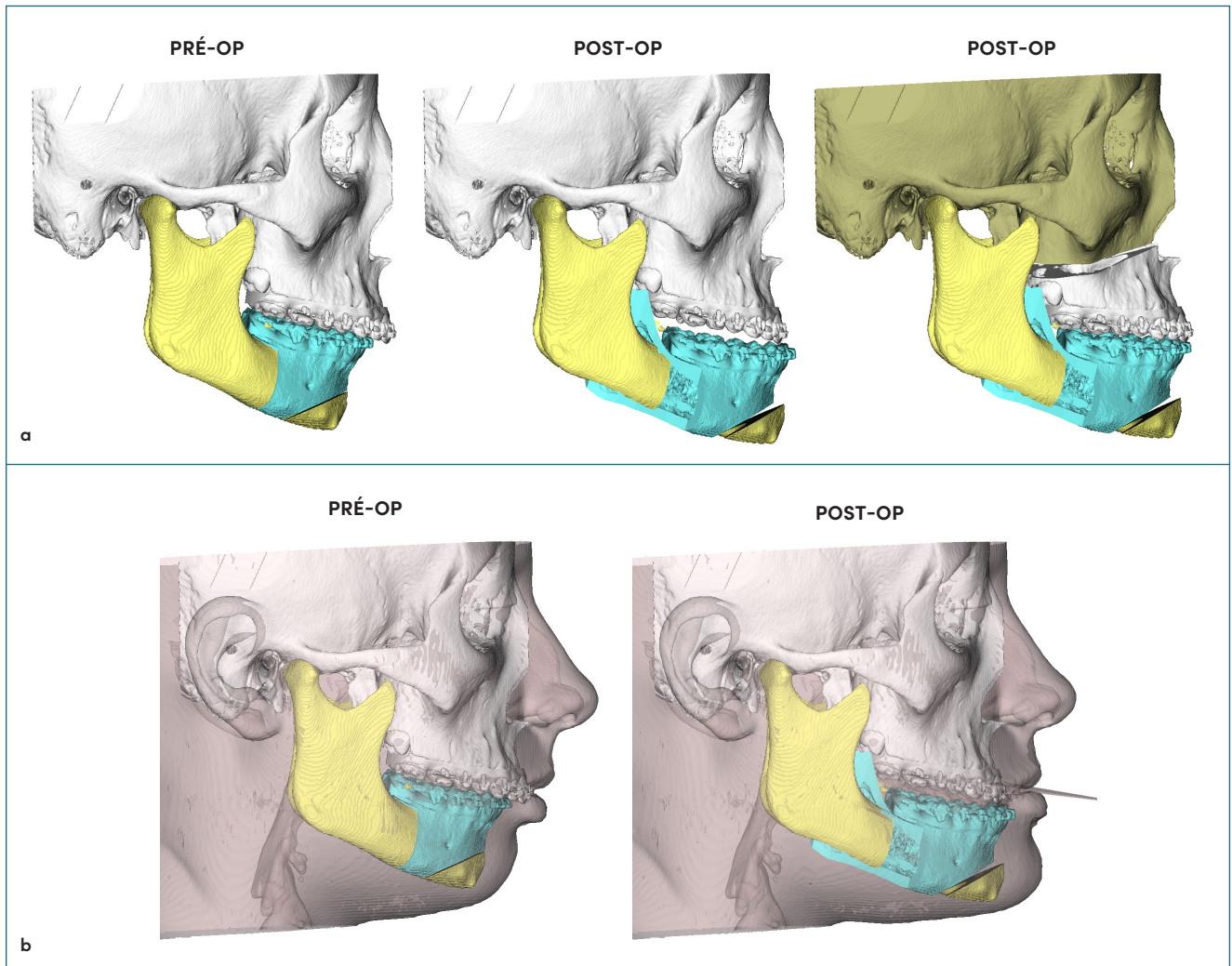


Figure 4

(a) Planification de la chirurgie bimaxillaire. Première étape : ostéotomie mandibulaire d'avancée (gouttière intermédiaire) ; seconde étape : ostéotomie de Le Fort I (gouttière finale) ; troisième étape : génioplastie.

(b) Simulation des tissus mous.

mandibulaire ou maxillaire. Dans ce cas, la première ostéotomie est mandibulaire (*figure 4a*), la gouttière d'intercuspitation intermédiaire est conçue au maxillaire en position initiale et à la mandibule en position finale. Selon les mouvements effectués, il est parfois nécessaire d'ouvrir la mandibule en utilisant un point de rotation au niveau des condyles afin de créer l'espace minimal nécessaire à la gouttière. La gouttière d'intercuspitation finale

correspond à la mise en occlusion des modèles importée dans la planification. Le logiciel produit un fichier STL qui peut être imprimé au cabinet ou par un laboratoire par des imprimantes stéréolithographiques (SLA Résine) plus précises que l'impression par dépôt de fil fondu (FDM). La gouttière d'intercuspitation est un dispositif médical réglementé dont la production est normée et soumise à une législation européenne [5].

Les logiciels de planification permettent d'analyser et de superposer les images pré- et post-opératoires (*figure 6a*). Il est ainsi possible de quantifier les modifications morphologiques et les modifications du volume des voies aériennes qui ont été significativement augmentées chez cette patiente (*figure 6b*). Le résultat final est en accord avec le plan de traitement, normalisation de la classe dentaire, amélioration fonctionnelle et esthétique (*figure 7*).

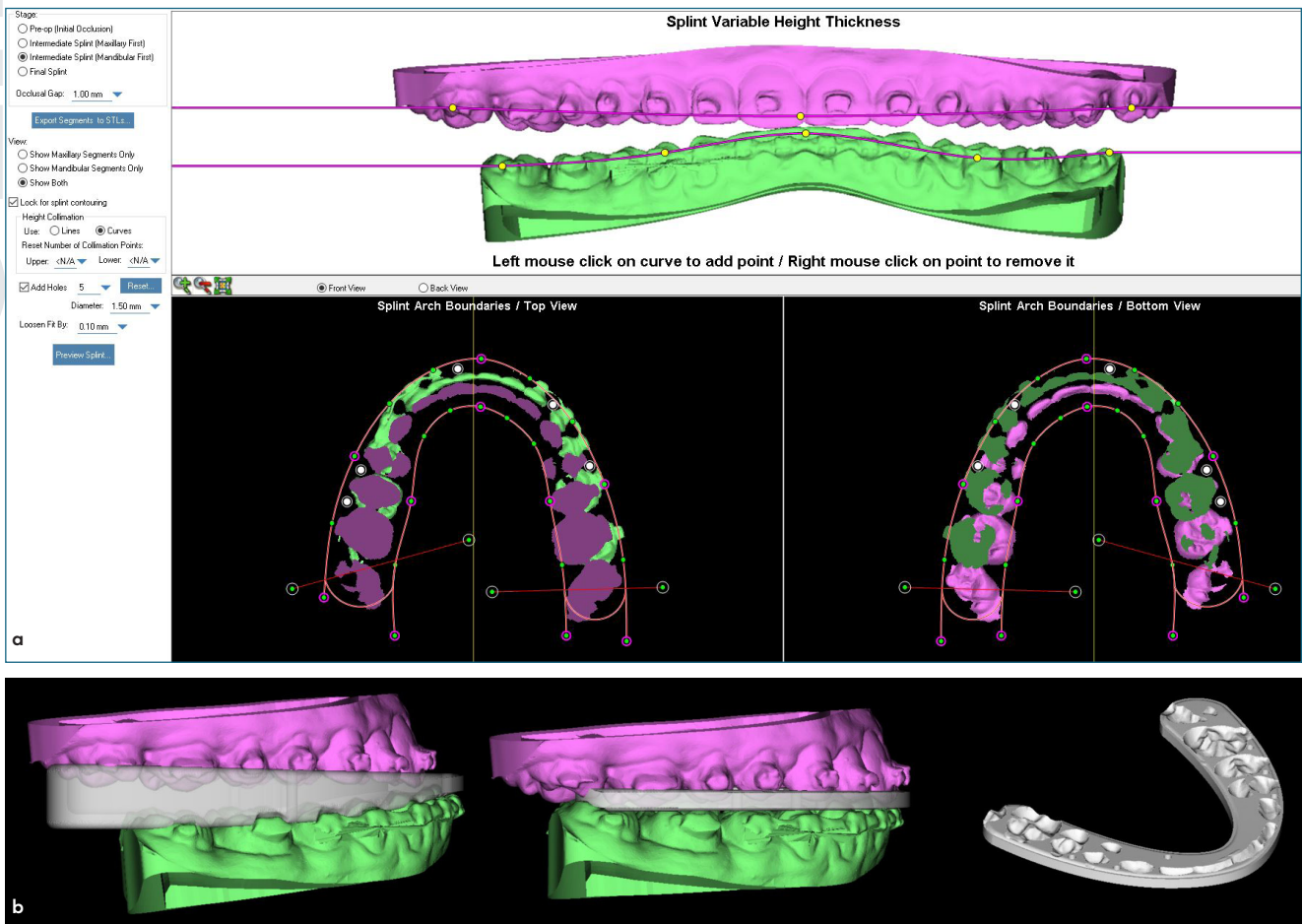


Figure 5

(a) Dolphinimaging : production des deux gouttières d'intercuspitation.
 (b) Gouttière intermédiaire pour l'ostéotomie mandibulaire première et finale pour l'ostéotomie de Le Fort I.

CAS CLINIQUE : CHIRURGIE ORTHOGNATHIQUE AVEC GUIDE DE COUPE FORAGE ET PLAQUES SUR MESURE

Une patiente adulte présente un schéma facial hyperdivergent avec infracluse de 14 à 24 et incompetence labiale (figure 8). Le protocole orthodontique et chirurgical doit impérativement comprendre une prise en charge par kinésithérapie maxillo-faciale pour réduire la déglutition, la ventilation et

l'apprentissage de la mastication incisive une fois l'occlusion de classe 1 obtenue. L'objectif du traitement est d'obtenir une occlusion de classe 1 stable en favorisant la compétence labiale.

L'analyse du scanner pré-opératoire montre une asymétrie frontale du plan d'occlusion vers le bas à droite (figure 9), le milieu interincisif est centré. S'agissant de matériel implantable sur mesure, la planification et la production est réalisée par un ingénieur médical

sur prescription médicale. Dans ce cas il est réalisé une horizontalisation du maxillaire dans le plan frontal et rotation horaire du plan d'occlusion dans le plan sagittal pour fermer l'infracluse. Contrairement à la chirurgie avec gouttière, où le praticien réalise le trait d'ostéotomie à main levée et conforme ensuite les plaques d'ostéosynthèse et où seule la position d'un fragment d'ostéotomie est guidée par appui dentaire par rapport à son antagoniste [6],

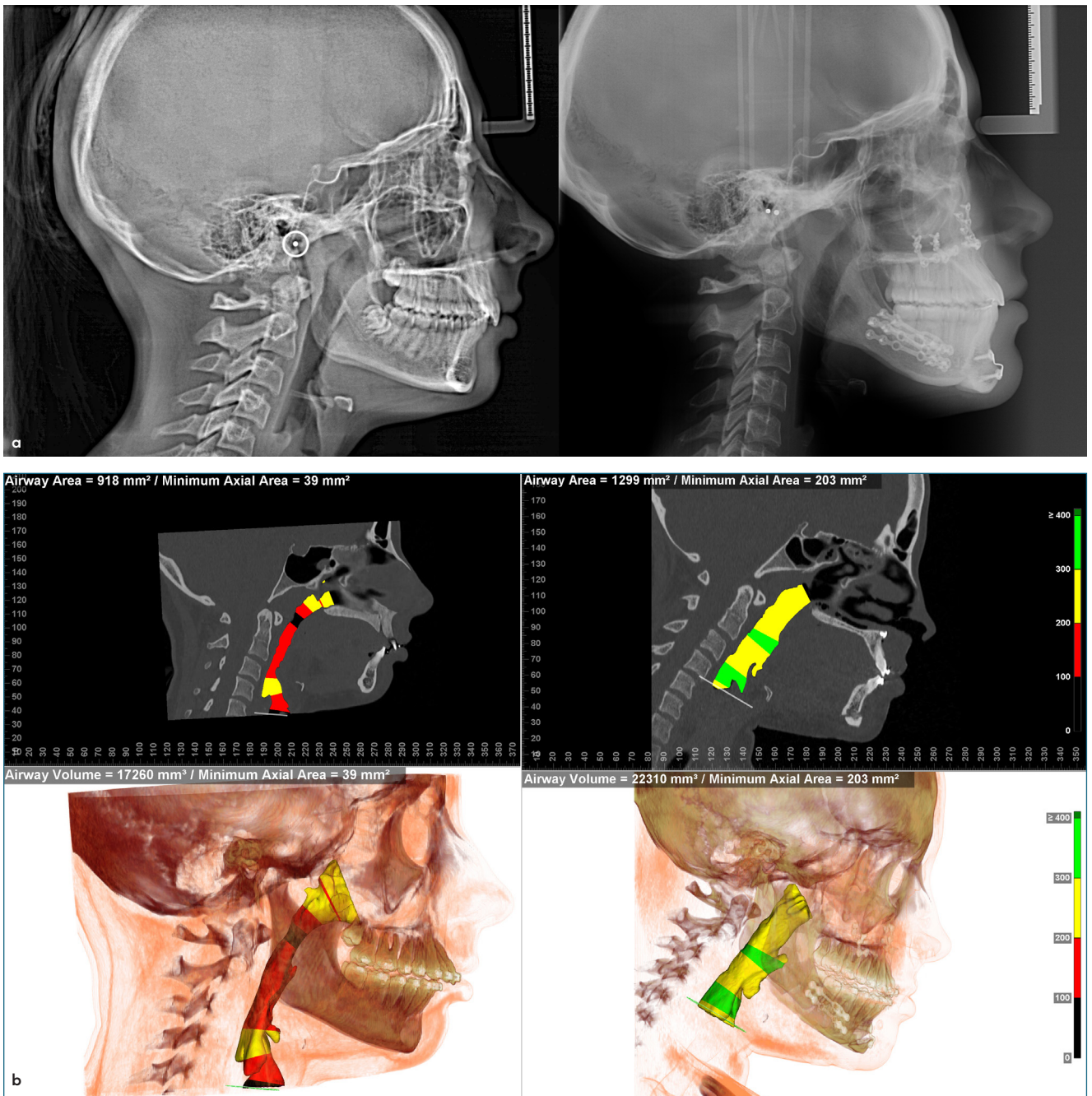


Figure 6

(a) Téléradiographie pré- et post-opératoire.

(b) Le volume des voies aériennes et leur surface de section minimale ont fortement augmenté en post-opératoire.



Figure 7
Résultat en fin de protocole orthodontico-chirurgical.



Figure 8
Hyperdivergence faciale avec infraclusion antérieure et incompetence labiale.

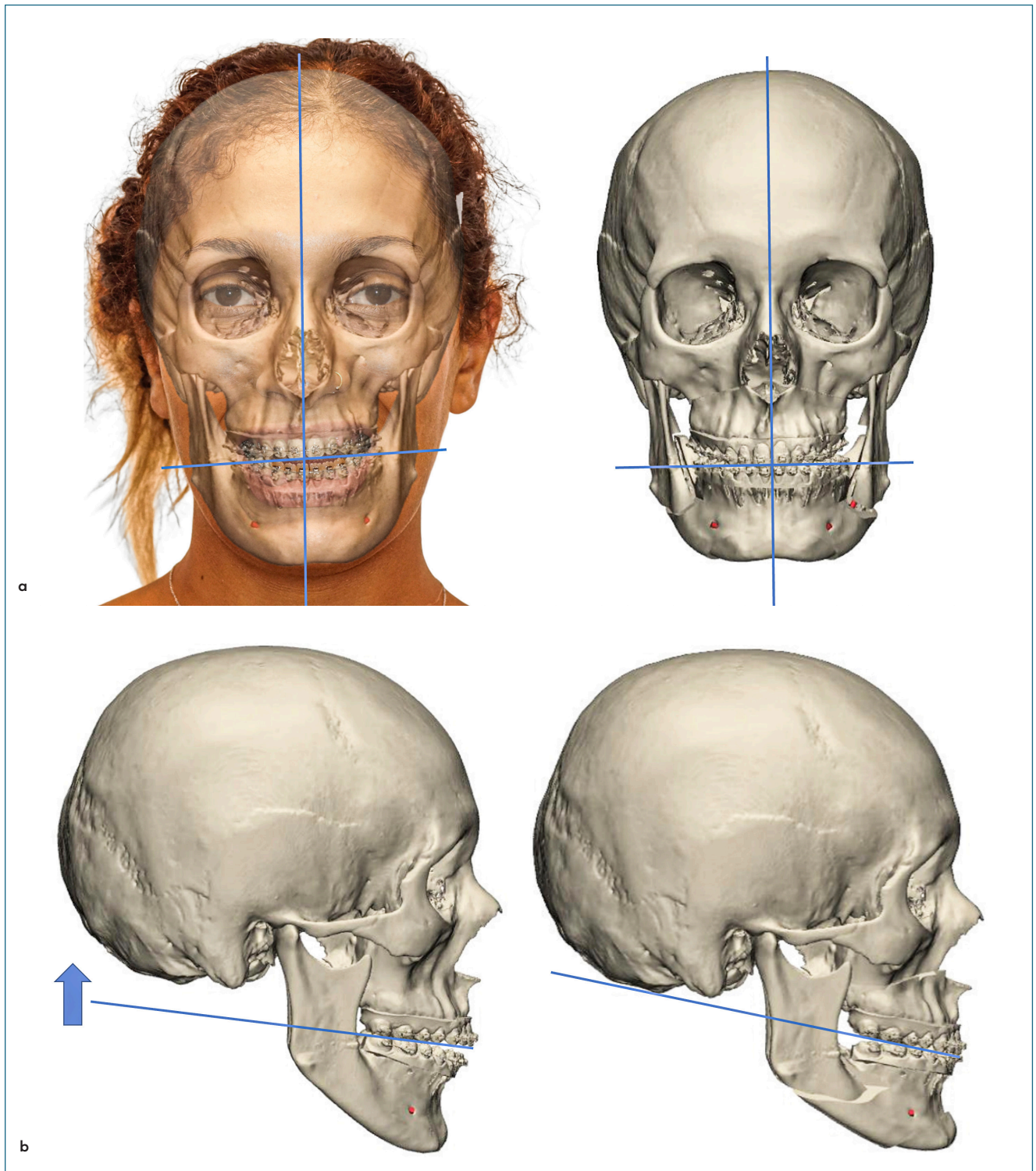


Figure 9

(a) Ostéotomie de Le Fort I de recentrage et horizontalisation.

(b) Rotation horaire du plan d'occlusion et ostéotomie mandibulaire et génioplastie.

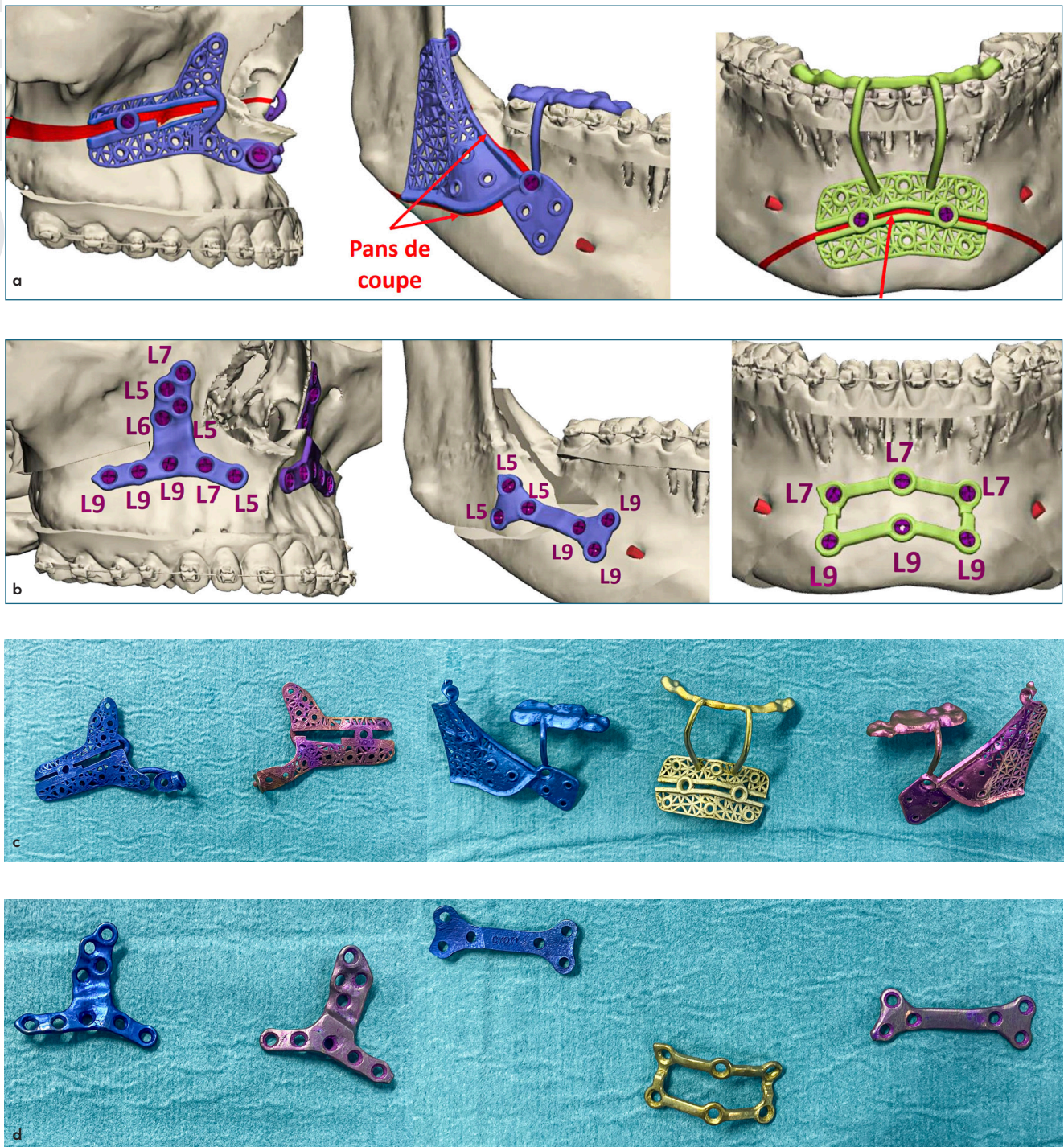


Figure 10
 (a) Dessin des guides de coupe et de préforage.
 (b) Dessin des plaques sur mesure.
 (c) Guides de coupe.
 (d) Plaques sur mesure.

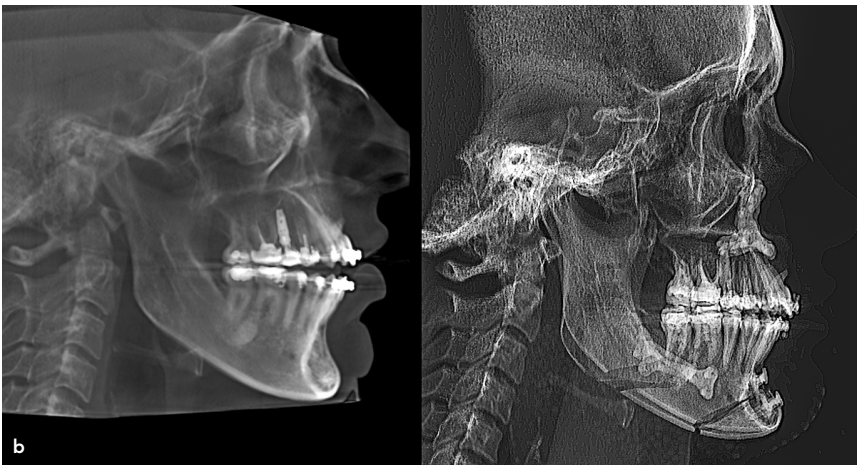


Figure 11

- (a) Photographies de fin de traitement.
 (b) Téléradiographies pré- et post-opératoire.
 (c) Occlusion pré-opératoire et en fin de traitement.

le guide de coupe indique ici le tracé de l'ostéotomie ainsi que le forage et permet de placer les vis selon la qualité de l'os et les obstacles anatomiques. Enfin, les plaques sont dessinées sur mesure, permettant une variabilité infinie de tailles et d'épaisseurs (*figure 10*). Ces plaques vont positionner le segment d'ostéotomie grâce au préforage préalable, il n'y a donc pas de blocage intermaxillaire, contrairement à la technique par gouttière où le fragment d'ostéotomie est repositionné par la mise en relation sur le maxillaire ou la mandibule. Ce repositionnement sur base osseuse et non occlusal est censé être plus précis.

Dans ce cas, plaques et guides maxillaires sont dessinés pour avoir un encombrement minimal afin de réduire l'incision de la voie d'abord maxillaire. La *figure 11* montre le résultat en fin de traitement orthodontique et chirurgical : obtention d'une classe 1 et de la compétence labiale passive. La patiente doit poursuivre la rééducation pour la déglutition mais aussi pour apprendre à mastiquer avec les incisives (mamelons dentaires encore présents un an après la chirurgie).

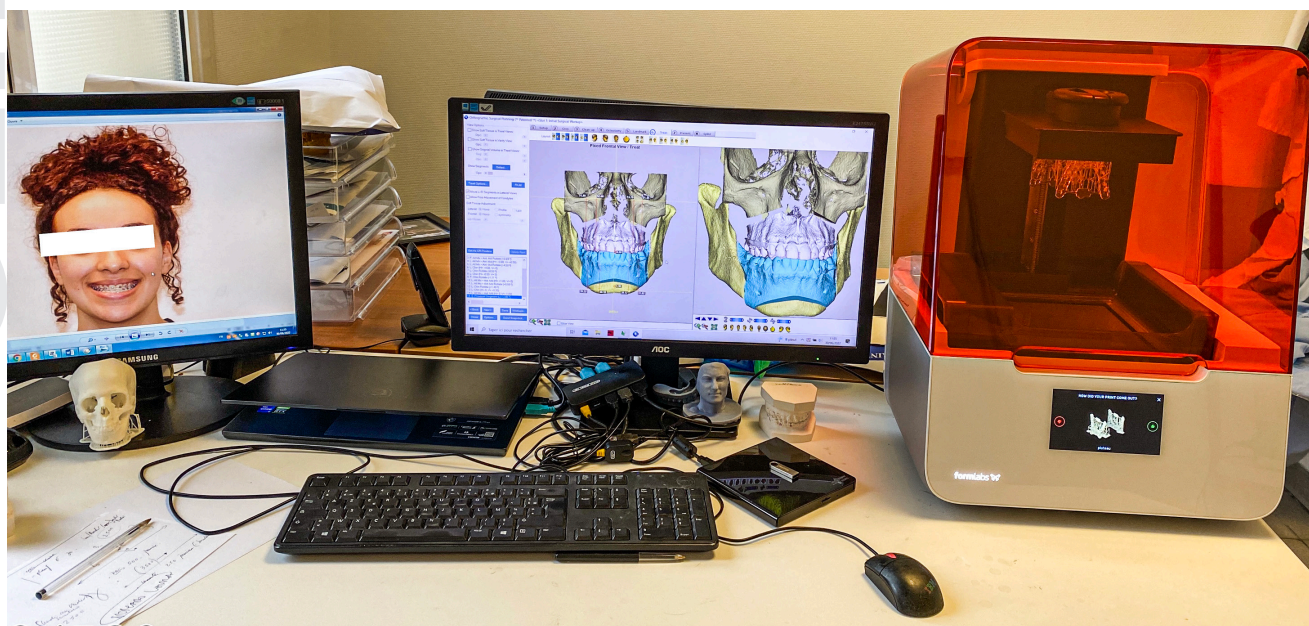


Figure 12

Set up pour produire les gouttières d'intercuspidation. Logiciel adapté (Dolphin imaging) et imprimante 3D médicale (Formlab 3b+), volume d'impression 145 x 145 x 185 mm.

GOUTTIÈRES « IN HOUSE » OU GUIDES ET PLAQUES SUR MESURE ?

Les deux procédés ont une base commune qui est la planification. Ils diffèrent par leur mise en œuvre, mais aussi par leur principe. La chirurgie par gouttières laisse une part à l'appréciation du chirurgien, tandis que la chirurgie par dispositifs sur mesure implantables est guidée de bout en bout et contraint le chirurgien à exécuter la planification telle qu'elle a été planifiée en amont ; il ne lui est pas possible d'adapter le tracé d'ostéotomie ou l'ostéosynthèse à la situation opératoire.

GOUTTIÈRES « IN HOUSE »

Il s'agit d'une technique rapide. En effet, l'acquisition des données patient,

la planification et la production de la gouttière peuvent techniquement se faire en une demi-journée.

Les praticiens qui utilisent cette solution apprécient d'avoir le contrôle de bout en bout sur leur planification. En revanche, cela peut être très chronophage. Le matériel nécessaire est peu onéreux et peu encombrant (figure 12). La gouttière d'intercuspidation est un dispositif médical [7], sa production doit répondre à un cahier des charges et doit faire l'objet d'une déclaration à l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM).

En outre, l'ensemble de la chaîne de production (logiciel, imprimante, résine) doit avoir un marquage CE médical et la résine doit être biocompatible et stérilisable [8]. Le coût est estimé entre 100 et 300 euros par cas.

GUIDES ET PLAQUES SUR MESURE EN TITANE

L'impression 3D de titane se fait par un procédé de fusion sur lit de poudre par faisceau laser. Il n'existe pas actuellement d'imprimante titane grand public. La poudre de titane a la particularité d'être très réactive, et notamment explosive, ce qui nécessite un local industriel avec des normes anti-explosion (figure 13). L'avantage du procédé est la grande précision [9] du repositionnement maxillaire et la possibilité de guider précisément le tracé d'ostéotomie, notamment pour les ostéotomies interdentaires dans le cadre de segmentations maxillaires. Outre son coût de conception et de production élevé estimé entre 1500 et 6500 euros selon les cas, le délai de confection, d'un minimum de 4 à 6 semaines selon les laboratoires, peut également constituer un frein.



Figure 13
Imprimante industrielle pour l'impression 3D de titane. Procédé de fusion sur lit de poudre par faisceau laser ; taille du plateau d'impression : 280 × 280 × 350 mm.

CONCLUSION

La planification est essentielle à la chirurgie orthognathique ; l'impression 3D a permis de transférer cette planification au bloc opératoire de façon précise et fiable. Le choix entre les différentes techniques se fait selon les habitudes des praticiens et la spécificité

du cas à prendre en charge. Bien que la chirurgie orthognathique soit prise en charge, la chirurgie guidée ne bénéficie d'aucune valorisation par la Sécurité sociale, ce qui peut contraindre les praticiens dans leurs choix selon leurs modalités ou lieux d'exercice.

BIBLIOGRAPHIE

- Zinser MJ, Sailer HF, Ritter L, Braumann B, Maegele M, Zöller JE. A paradigm shift in orthognathic surgery? A comparison of navigation, computer-aided designed/computer-aided manufactured splints, and « classic » intermaxillary splints to surgical transfer of virtual orthognathic planning. *J Oral Maxillofac Surg Off J Am Assoc Oral Maxillofac Surg* 2013;71(12):2151.e1-21.
- Ureel M, Augello M, Holzinger D, Wilken T, Berg BJ, Zeilhofer HF, et al. Cold Ablation Robot-Guided Laser Osteotome (CARLO®): From Bench to Bedside. *J Clin Med*. 24 janv 2021;10(3):450.
- Carvalho FSR, de Oliveira Barbosa DI, Torquato IF, Britto de Souza AM, Dalcico R, Chaves FN, et al. The Use of Surgical Splints in Orthognathic Surgery: A Bibliometric Study. *Indian J Plast Surg Off Publ Assoc Plast Surg India* 2022;55(1):26-30.
- Dubois G, Goudot P, Schouman T. Implant et guide pour chirurgie maxillo-faciale [Internet]. EP4245263A3, 2023 [cité 13 mars 2025]. Disponible sur: <https://patents.google.com/patent/EP4245263A3/fr>
- Khonsari RH, Adam J, Benassarou M, Bertin H, Billotet B, Bouaoud J, et al. In-house 3D printing: Why, when, and how? Overview of the national French good practice guidelines for in-house 3D-printing in maxillo-facial surgery, stomatology, and oral surgery. *J Stomatol Oral Maxillofac Surg* 2021;122(4):458-61.
- Schouman T, Rouch P, Imholz B, Fasel J, Courvoisier D, Scolozzi P. Accuracy evaluation of CAD/CAM generated splints in orthognathic surgery: a cadaveric study. *Head Face Med* 2015;11:24.
- Pajot T, Benichou L, Moreau E, Tallon V, Meningaud JP, Khonsari RH, et al. Implementation of a digital chain for the design and manufacture of implant-based surgical guides in a hospital setting. *J Stomatol Oral Maxillofac Surg* 2020;121(4):347-51.
- Ribier Z, Dacosta-Noble E, Benichou L, Ketoff S, Talon V, Bézie Y, et al. [Sterilisation of patient specific surgical guide for dental implantology made in a hospital: Validation of a sterility test and structural deformation study]. *Ann Pharm Fr* 2021;79(5):582-8.
- Rios O, Lerhe B, Chamorey E, Savoldelli C. Accuracy of Segmented Le Fort I Osteotomy with Virtual Planning in Orthognathic Surgery Using Patient-Specific Implants: A Case Series. *J Clin Med* 2022;11(19):5495.