

UNIVERSITE DU DROIT ET DE LA SANTE DE LILLE 2

**FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE**

Année de soutenance : 2017

N°:

THESE POUR LE  
**DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE**

Présentée et soutenue publiquement le 25 septembre 2017

Par HERNU Sophie

Née le 20 janvier 1990 à Lille – France

Intérêts de la chirurgie assistée par ordinateur appliquée à la reconstruction  
mandibulaire par lambeau libre de fibula micro-anastomosé

**JURY**

Président : Pr. G. PENEL

Assesseurs : Dr. L. NAWROCKI  
Dr. J.M. LANGLOIS  
Dr. S. LHOMME

Président de l'Université	:	Pr. X. VANDENDRIESSCHE
Directeur Général des Services de l'Université	:	P-M. ROBERT
Doyen	:	Pr. E. DEVEAUX
Vice-Doyens	:	Dr. E. BOCQUET, Dr. L. NAWROCKI et Pr. G. PENEL
Responsable des Services	:	S. NEDELEC
Responsable de la Scolarité	:	L. LECOCQ

## **PERSONNEL ENSEIGNANT DE L'U.F.R.**

### **PROFESSEURS DES UNIVERSITES :**

<b>P. BEHIN</b>	Prothèses
<b>T. COLARD</b>	Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques, Biomatériaux, Biophysiques, Radiologie
<b>E. DELCOURT-DEBRUYNE</b>	Professeur Emérite Parodontologie
<b>E. DEVEAUX</b>	Odontologie Conservatrice - Endodontie <b>Doyen de la Faculté</b>
<b>G. PENEL</b>	Responsable de la Sous-Section des <b>Sciences Biologiques</b>

### MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES

<b>T. BECAVIN</b>	Responsable de la Sous-Section d' <b>Odontologie Conservatrice – Endodontie</b>
A. BLAIZOT	Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale.
<b>F. BOSCHIN</b>	Responsable de la Sous-Section de <b>Parodontologie</b>
<b>E. BOCQUET</b>	Responsable de la Sous- Section d' <b>Orthopédie Dento-Faciale</b>
<b>C. CATTEAU</b>	Responsable de la Sous-Section de <b>Prévention, Epidémiologie, Economie de la Santé, Odontologie Légale.</b>
A. de BROUCKER	Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques, Biomatériaux, Biophysiques, Radiologie
T. DELCAMBRE	Prothèses
C. DELFOSSE	Odontologie Pédiatrique
F. DESCAMP	Prothèses
A. GAMBIEZ	Odontologie Conservatrice - Endodontie
F. GRAUX	Prothèses
P. HILDEBERT	Odontologie Conservatrice - Endodontie
<b>J.M. LANGLOIS</b>	Responsable de la Sous-Section de <b>Chirurgie Buccale, Pathologie et Thérapeutique, Anesthésiologie et Réanimation</b>
C. LEFEVRE	Prothèses
J.L. LEGER	Orthopédie Dento-Faciale
M. LINEZ	Odontologie Conservatrice - Endodontie
G. MAYER	Prothèses
L. NAWROCKI	Chirurgie Buccale, Pathologie et Thérapeutique, Anesthésiologie et Réanimation Chef du Service d'Odontologie A. Caumartin - CHRU Lille
C. OLEJNIK	Sciences Biologiques
P. ROCHER	Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques, Biomatériaux, Biophysiques, Radiologie
L.ROBBERECHT	Odontologie Conservatrice - Endodontie
<b>M. SAVIGNAT</b>	Responsable de la Sous-Section des <b>Sciences Anatomiques et Physiologiques, Occlusodontiques, Biomatériaux, Biophysiques, Radiologie</b>
T. TRENTESAUX	Odontologie Pédiatrique
<b>J. VANDOMME</b>	Responsable de la Sous-Section de <b>Prothèses</b>

## **Réglementation de présentation du mémoire de Thèse**

Par délibération en date du 29 octobre 1998, le Conseil de la Faculté de Chirurgie Dentaire de l'Université de Lille 2 a décidé que les opinions émises dans le contenu et les dédicaces des mémoires soutenus devant jury doivent être considérées comme propres à leurs auteurs, et qu'ainsi aucune approbation, ni improbation ne leur est donnée.

*Aux membres du jury,*

**Monsieur le Professeur Guillaume Penel**

**Professeur des universités – Praticien hospitalier**

*Sous-Section Sciences Biologiques*

Docteur en Chirurgie Dentaire

Doctorat de l'Université René DESCARTES (PARIS V)

C.E.S d'Odontologie Chirurgicale

Habilité à Diriger des Recherches

Vice-Doyen Recherche de la Faculté de Chirurgie Dentaire

Responsable de la Sous-Section Sciences Biologiques

*Vous me faites l'honneur de présider ce jury*

*et je vous en remercie.*

*Veillez trouver, dans ce travail, le témoignage de  
mon profond respect et de mon admiration.*

**Madame le Docteur Sarah Lhomme**

**Assistante hospitalo-Universitaire des CSERD**

*Sous-Section Chirurgie Buccale*

Docteur en Chirurgie Dentaire

Master I de Biologie Cellulaire

C.E.S de Parodontologie (PARIS V)

Diplôme Universitaire d'implantologie clinique et prothétique

Diplôme Universitaire clinique d'occlusodontie et d'équilibre corporel

*Merci d'avoir accepté de diriger mon travail,  
d'avoir été patiente et à l'écoute  
et de m'avoir toujours très bien conseillée.*

*Veillez trouver dans ce travail toute ma reconnaissance.  
J'espère que ce dernier est à la hauteur de vos espérances.*

**Monsieur le Docteur Laurent Nawrocki**

**Maître de Conférence des Universités – Praticien Hospitalier des CSERD**

*Sous-Section Chirurgie Buccale, Pathologie et Thérapeutique, Anesthésiologie et Réanimation*

Docteur en Chirurgie Dentaire

Doctorat de l'Université de Lille 2 (mention Odontologie)

Maîtrise en Biologie Humaine

C.E.S d'Odontologie Chirurgicale

Coordonnateur Adjoint du D.E.S de Chirurgie Orale

Secrétaire du Collège Hospitalo-Universitaire de Médecine Buccale et Chirurgie Buccale

Vice Doyen Relations intérieures et extérieures de la Faculté de Chirurgie Dentaire

Chef du Service d'Odontologie du Centre Abel Caumartin – CHRU de LILLE

*C'est pour moi un honneur de vous compter parmi les membres de ce jury.*

*Veillez trouver dans cette thèse l'expression de ma reconnaissance et de mes remerciements les plus sincères.*

**Monsieur le Docteur Jean-Marie Langlois**

**Maître de Conférences des Universités – Praticien Hospitalier des CSERD**

*Sous-Section Chirurgie Buccale, Pathologie et Thérapeutique, Anesthésiologie et Réanimation*

Docteur en Chirurgie Dentaire

Doctorat de l'Université de Lille II (mention Odontologie)

Responsable de la Sous-Section Chirurgie Buccale, Pathologie et Thérapeutique, Anesthésiologie et Réanimation.

*Je vous remercie d'avoir accepté de faire partie de ce jury.  
Soyez assuré de ma profonde gratitude pour  
la qualité de vos enseignements en Chirurgie Orale,  
mais également pour vos conseils lors de la rédaction de cette thèse.*

*Je dédie cette thèse*



# Glossaire

3DP : Three-dimensional printing

ABS : Acrylonitrile butadiène styrène

ATM : articulation temporo-mandibulaire

CAD/CAM : Computer-aided design/Computer-aided manufacturing

CAO : Conception assistée par ordinateur

CFAO : Conception et fabrication assistées par ordinateur

DICOM : Digital imaging and communication in medicine

DM : Dispositifs médicaux

FAO : Fabrication assistée par ordinateur

FDM : Fused deposition modeling

IRM : Imagerie par résonance magnétique

ORL : Oto-rhino-laryngologie

PDS : Perte de substance

SLA : Stereolithograph apparatus

SLS : Selective laser sintering

## Table des matières

Glossaire .....	12
1. Introduction .....	16
2. Les pertes de substances mandibulaires .....	17
2.1. La chirurgie d'exérèse mandibulaire .....	17
2.1.1. Rappels anatomiques et histologiques .....	17
2.1.2. Le principe .....	17
2.1.3. La classification .....	18
2.1.4. Les conséquences de la chirurgie d'exérèse .....	19
2.1.4.1. Les séquelles esthétiques .....	19
2.1.4.2. Les conséquences fonctionnelles .....	19
2.1.4.3. Les conséquences prothétiques .....	20
2.1.4.4. Les conséquences psychologiques .....	20
2.2. Les lambeaux libres .....	21
2.2.1. Le principe de la reconstruction .....	21
2.2.2. Le lambeau de fibula .....	22
2.2.2.1. Historique .....	22
2.2.2.2. Composition .....	22
2.2.2.3. Dimensions et vascularisation .....	23
2.2.2.4. Les avantages du lambeau de péroné .....	24
2.2.2.5. Les inconvénients .....	24
3. Le protocole opératoire .....	25
3.1. La pelvimandibulectomie interruptrice .....	25
3.1.1. Définition .....	25
3.1.2. Les étapes .....	25
3.1.2.1. Les étapes préliminaires .....	25
3.1.2.2. L'abord cervical .....	25
3.1.2.3. La préparation des vaisseaux .....	26
3.1.2.4. L'abord de la région d'exérèse .....	26
3.1.2.5. Le temps hémorragique : Exérèse de la tumeur .....	26
3.2. La réparation .....	27
3.2.1. Prélèvement du lambeau .....	27
3.2.2. Mise en place du lambeau .....	29
4. L'impression tridimensionnelle .....	32
4.1. Généralités .....	32
4.2. Historique .....	33
4.3. Les procédés de fabrication additive .....	35
4.3.1. Les étapes .....	35
4.3.2. Le dépôt de matière fondue .....	36
4.3.3. La photopolymérisation en cuve .....	37
4.3.4. L'impression 3D .....	38

4.4.	Les avantages et inconvénients de la fabrication additive .....	39
4.5.	Les applications de l'impression 3D .....	40
4.5.1.	Généralités .....	40
4.5.2.	Applications en chirurgie générale .....	40
4.5.2.1.	Les orthèses, prothèses externes et exosquelette .....	40
4.5.2.2.	La bioimpression.....	41
4.5.3.	Applications en chirurgie maxillo-faciale.....	42
4.5.3.1.	La modélisation 3D.....	42
4.5.3.2.	La formation des médecins et l'éducation des patients .....	42
4.5.3.3.	La création de matériel personnalisé .....	42
4.5.3.4.	Simulations préopératoires .....	44
4.5.3.5.	Utilisation en repérage analogique per-opérateur.....	45
4.5.3.6.	Les applications .....	45
4.5.3.6.1.	Les traumatismes de la face .....	46
4.5.3.6.2.	Les anomalies squelettiques de la face.....	46
4.5.3.6.3.	Les pathologies de l'articulation temporo-mandibulaire .....	48
4.5.3.6.4.	La chirurgie esthétique de la face.....	49
4.5.4.	Les applications en chirurgie dentaire .....	49
4.5.4.1.	La prothèse fixée.....	49
4.5.4.2.	La prothèse amovible.....	50
4.5.4.3.	La chirurgie implantaire.....	51
5.	Les reconstructions mandibulaires assistées par l'impression 3D.....	52
5.1.	Préambule .....	52
5.2.	La planification pré-opératoire .....	54
5.2.1.	Les logiciels .....	54
5.2.2.	Acquisition des données numériques.....	54
5.2.3.	Segmentation .....	55
5.2.4.	La planification de la résection mandibulaire.....	55
5.2.5.	La planification implantaire.....	58
5.2.5.1.	Rappel sur les intérêts de l'implantation primaire.....	58
5.2.5.2.	Les avantages et limites .....	58
5.2.5.3.	Les caractéristiques de la planification implantaire.....	59
5.2.5.4.	Positionnement virtuel des implants dentaires.....	60
5.2.6.	Conception du modèle de reconstruction et conformation de la fibula .....	61
5.3.	L'impression 3D .....	63
5.4.	La technique chirurgicale .....	64
5.4.1.	Prélèvement du lambeau .....	64
5.4.1.1.	Mise en place du guide .....	64
5.4.1.2.	Pose des implants au site de prélèvement selon le guide.....	64
5.4.1.3.	Ostéotomies fibulaires et conformation du lambeau en arc mandibulaire .....	65
5.4.2.	Exérèse de la tumeur.....	66
5.4.3.	Fixation du lambeau au site receveur .....	66

5.4.4.	Le positionnement de la reconstruction .....	66
5.4.4.1.	Les plaques d'ostéosynthèse prémodelées .....	67
5.4.4.2.	La fixation d'une prothèse provisoire immédiate.....	67
6.	Analyse d'études.....	70
6.1.	Les bénéfices de l'impression 3D .....	70
6.1.1.	L'économie du temps opératoire .....	70
6.1.2.	L'ischémie du lambeau .....	70
6.1.3.	Le coût de l'ensemble du procédé.....	71
6.1.4.	La précision de l'impression 3D .....	71
6.1.5.	La réhabilitation dentaire immédiate .....	72
6.2.	Réglementation.....	73
6.3.	Synthèse.....	73
6.3.1.	Avantages .....	73
6.3.1.1.	L'impression 3D .....	73
6.3.1.2.	La planification chirurgicale .....	74
6.3.1.3.	Le modèle 3D.....	74
6.3.1.4.	Les aides chirurgicales numérisées.....	74
6.3.2.	Inconvénients .....	75
7.	Conclusion .....	76
	Références bibliographiques.....	77
	Table des illustrations .....	83
	Table des tableaux.....	85

# 1. Introduction

La mandibule constitue le squelette du massif facial inférieur et possède un rôle fonctionnel majeur, notamment dans l'alimentation, la phonation et la respiration. Elle représente la pièce essentielle de l'appareil masticatoire et est responsable de l'esthétique du visage.

Les Pertes De Substances (PDS) qui entraînent une interruption de la mandibule sont majoritairement d'origine cancéreuse. La prise en charge de ces tumeurs est fondée sur une stratégie pluridisciplinaire combinant la chirurgie et la radiothérapie, pour permettre le traitement le plus personnalisé possible au patient. L'ablation chirurgicale de la tumeur peut être mutilante et induire des troubles fonctionnels et des séquelles esthétiques. Par conséquent, la réparation de l'os est associée à l'exérèse et est pratiquée lors de la même opération.

Or, du fait de sa complexité anatomique, cette reconstruction mandibulaire a toujours constitué un défi technique pour les chirurgiens, la difficulté principale étant de remodeler l'arc antérieur. Les modalités de réparation ont évolué au cours des dernières années et le lambeau libre micro-anastomosé de fibula est considéré comme la référence actuelle pour les restaurations des PDS étendues de la mandibule.

De nombreux progrès dans le domaine de la chirurgie reconstructrice cervicofaciale ont permis d'améliorer les résultats fonctionnels et de limiter les séquelles liées à l'exérèse tumorale. Ces avancées concernent notamment le développement de la Conception et la Fabrication Assistées par Ordinateur (CFAO) et de l'impression 3D au sein des services de chirurgie maxillo-faciale. Par le biais de la planification pré-opératoire, ces outils ont permis la confection de dispositifs sur-mesure facilitant le modelage et la mise en place du lambeau de fibula au niveau de la PDS.

Dans ce travail, nous présenterons d'abord les particularités du traitement chirurgical intéressant la mandibule. Puis nous énoncerons les caractéristiques et les applications de l'impression 3D en chirurgie maxillo-faciale. Enfin, nous nous pencherons sur les étapes de la planification et de la reconstruction guidée de la mandibule, pour terminer sur l'analyse d'études sur ce sujet.

## 2. Les pertes de substances mandibulaires

### 2.1. La chirurgie d'exérèse mandibulaire

#### 2.1.1. Rappels anatomiques et histologiques

La mandibule est un os impair, médian et symétrique, situé au niveau de la partie inférieure de la face. Elle est constituée d'un corps et de deux branches montantes. Ces lames osseuses se prolongent en haut par deux protubérances : l'apophyse coronoïde en avant et le condyle en arrière, qui vient s'articuler avec l'os temporal au niveau des Articulations Temporo-Mandibulaires (ATM). (1)

Le corps a la forme d'un fer à cheval. Il est composé d'un os basal très dense et corticalisé entourant un noyau spongieux, nommé processus alvéolaire, qui porte l'arcade dentaire inférieure. Sa face externe présente une crête verticale appelée la symphyse mentonnière.

La vascularisation est double : axiale (par l'artère alvéolaire inférieure) et périphérique (par le périoste). Le nerf mandibulaire V<sub>3</sub> issu du Trijumeau est responsable de l'innervation sensitive des dents et de l'innervation motrice des muscles masticateurs. Cela induit des rapports de proximité entre la mandibule, les muscles, la langue et le plancher buccal.

Sur le plan fonctionnel, la mandibule intervient dans la déglutition (par le maintien de la sangle du plancher) et la mastication (par le biais de la dentition et des muscles masticateurs). Elle joue également un rôle dans la respiration car elle maintient la position antérieure de la langue dans la cavité orale. Structure fondamentale de l'architecture de la face et du cou, elle apporte une grande importance à l'esthétique car elle correspond à l'ovale du visage. (2)

La plupart des cancers de la cavité orale sont des tumeurs malignes épithéliales représentées à 90 % par les carcinomes épidermoïdes des muqueuses. C'est la forme histologique la plus fréquente. Les autres formes se répartissent en deux catégories :

- Les adénocarcinomes (touchant les glandes salivaires) ;
- Les tumeurs non épithéliales : le lymphome malin, le fibrosarcome, l'angiosarcome...

Les tumeurs vraies de la mandibule sont rares. En revanche, cet os peut être atteint par l'extension osseuse de ces tumeurs.

#### 2.1.2. Le principe

La chirurgie d'exérèse occupe une place centrale dans le traitement des cancers atteignant la mandibule. Elle doit assurer la résection complète de la tumeur avec des marges de sécurité suffisantes. Cette intervention peut être dénaturante vis-à-vis de l'étage inférieur de la face et engendrer des PDS osseuses étendues. (3)

L'exérèse est dorénavant ciblée sur les structures anatomiques réellement atteintes. Lors du bilan préopératoire, l'imagerie permet de planifier précisément la résection osseuse et donc de la limiter au strict nécessaire. Le scanner visualise les atteintes corticales et l'IRM permet une exploration de l'atteinte médullaire. L'association de ces deux examens est indispensable à l'évaluation de l'envahissement tumoral. (4)

En peropératoire, des examens extemporanés peuvent être réalisés en cas de doute sur le caractère complet de la résection. La tumeur est alors orientée et analysée en anatomocytologie pour définir le stade de la tumeur et les marges de résection.

L'atteinte primitive de la mandibule est peu fréquente. Ce sont les tumeurs du plancher qui vont secondairement envahir l'os. Les chirurgies des tumeurs de ces structures sont appelées les pelvimandibulectomies. Elles peuvent préserver la continuité osseuse, elles sont alors conservatrices de la mandibule. En revanche, si elles sont interruptrices, l'intégrité de la mandibule est rompue. (5)

### 2.1.3. La classification

De nombreuses classifications des pertes de substances mandibulaires d'origine carcinologique ont été proposées. Celle de Cariou est à vocation anatomo-chirurgicale. Elle établit les impératifs de la reconstruction sur le plan osseux. (3,6)

Il différencie trois types de PDS.

#### Type A (antérieure) :

- Aa : PDS faible, limitée à la symphyse pour laquelle le besoin d'os est limité ;
- Ab : PDS étendue, concernant l'ensemble de l'arc antérieur et nécessitant un apport osseux important.

#### Type L (latérale) :

- La : PDS limitée à la branche horizontale ;
- Lb : PDS étendue à une héli-mandibule.

Type T (totale) : PDS supérieure à une héli-mandibule.

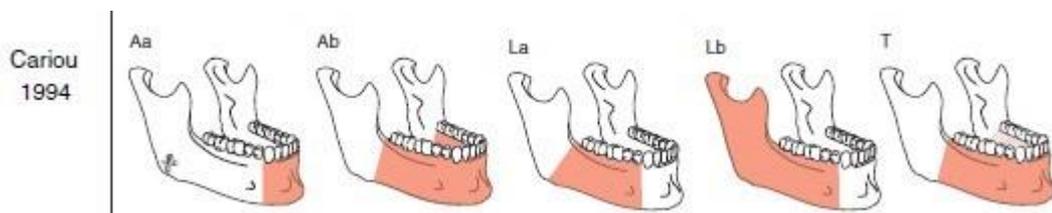


Figure 1 : Classification de Cariou (3)

Ces types de PDS auront un retentissement majeur pour les patients. En l'absence de reconstruction, les complications sont nombreuses et sévères.

## 2.1.4. Les conséquences de la chirurgie d'exérèse

### 2.1.4.1. Les séquelles esthétiques

La chirurgie résectrice aboutit à des déformations faciales sévères et invalidantes. Elle provoque la disparition des structures osseuses et des tissus mous. En l'absence du segment réséqué, les reliefs du visage sont remplacés par une dépression inesthétique. (6)

La cicatrisation s'effectue en attirant les plans superficiels en dedans et en creusant des plis cutanés. Ces cicatrices provoquent un vieillissement du visage et une asymétrie faciale. La diminution de la motricité et de la sensibilité de la lèvre inférieure par atteinte des filets nerveux font également partis des préjudices esthétiques. (1)

Lorsque la résection touche l'arc osseux antérieur, la perte du soutien mentonnier occasionne une mutilation du visage «en profil d'oiseau». Cette déformation est appelée «Andy Gump», du nom de la première personne touchée par ce type de séquelles et dont la physionomie a inspiré le personnage principal d'une bande dessinée. (2)

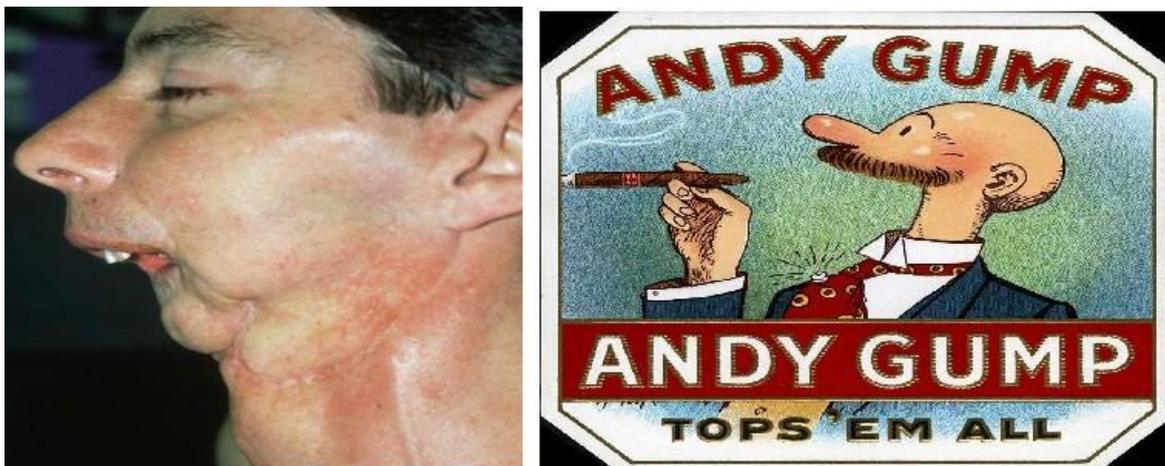


Figure 2 : Séquelle d'interruption de la symphyse mandibulaire. Déformation de "Andy Gump" par réduction de l'étage inférieur de la face (2). Illustration de la BD (7).

### 2.1.4.2. Les conséquences fonctionnelles

D'une part, la chirurgie va créer des troubles de la mastication. La résection mandibulaire provoque un trouble de l'articulé dentaire. Associés à une diminution du nombre de contacts occlusaux, cela entraîne une réduction du pouvoir masticatoire.

Les troubles de la déglutition sont déclenchés par la désinsertion des muscles de la langue engendrant une bascule postérieure de celle-ci. Cette rétropulsion linguale procure une incapacité à propulser le bol alimentaire vers l'arrière avec un risque de fausses routes. (6)

D'autre part, l'exérèse peut sectionner les nerfs alvéolaires inférieur, lingual (V3) et hypoglosse (XII). Cela se manifeste par une paresthésie labiale et une incontinence salivaire.

Enfin, lorsque la perte de substance concerne la région incisive, l'arc mandibulaire prend la forme d'un « V » à sommet antérieur. Les contractions musculaires et les brides

fibreuses sont exacerbées par une éventuelle radiothérapie post-opératoire et rapprochent progressivement les fragments osseux résiduels. Cela complique grandement l'acte de reconstruction s'il n'est pas réalisé immédiatement après l'exérèse, car les segments sont figés dans cette position. (2)

#### **2.1.4.3. Les conséquences prothétiques**

La chirurgie d'exérèse mandibulaire a de nombreuses répercussions locales qui sont dommageables à la restauration prothétique future. En l'absence de réparation, la réhabilitation dentaire est difficile car la résection chirurgicale modifie l'anatomie des surfaces d'appui : leur valeur stabilisatrice, rétentrice et sustentatrice sont diminuées. Ces surfaces ne sont plus exploitables. (1)

On observe aussi la disparition du couloir prothétique, occupé par la projection de la langue dont la mobilité est diminuée. Un déséquilibre anatomique est créé par la rétraction des parties molles due à la fibrose et par la présence de brides cicatricielles. (6)

La limitation de l'ouverture buccale, l'incontinence salivaire et la disparition des vestibules jugaux compliquent le port et la stabilité des prothèses.

#### **2.1.4.4. Les conséquences psychologiques**

Le patient voit toute sa vie de relation modifiée et fait l'objet d'une stigmatisation et d'un repli sur soi. Par la constitution d'un handicap majeur, ces séquelles viennent fortement compromettre la réinsertion sociale et professionnelle de l'individu. (6)

Le patient peut traduire sa détresse psychique par une irritabilité ou un état dépressif avec un besoin de s'isoler.

L'altération du schéma corporel est omniprésente, à laquelle s'ajoute les difficultés de communication.

À la vue de ces complications, il apparaît fondamental de restaurer la PDS antérieure de la mandibule à l'aide d'un procédé fiable et durable. Nous allons à présent détailler la manière de réparer cette perte osseuse par un lambeau de fibula.

## **2.2. Les lambeaux libres**

### **2.2.1. Le principe de la reconstruction**

Les PDS étendues du tiers inférieur de la face se caractérisent par l'importance des volumes concernés et leur caractère composite touchant différents tissus (os, muqueuse, peau, muscle, organe dentaire). L'impératif de reconstruire ces PDS dans les 3 dimensions est donc fondamental.

Cette reconstruction fait appel à des procédés chirurgicaux tel que le lambeau de fibula (péroné) micro-anastomosé. La technique est exigeante car elle nécessite la conformation d'un os longiligne en un arc avec des angulations dans les trois plans de l'espace puis la réalisation d'anastomoses microchirurgicales. (3,8)

La réparation impose de restaurer la continuité de l'arc mandibulaire. Elle demeure un véritable enjeu pour le chirurgien maxillo-facial car l'objectif est de récupérer également l'esthétique et les fonctions altérées par la PDS. Elle s'inscrit dans une démarche visant à rétablir au mieux les préjudices dues à la pathologie tumorale et à son exérèse. Elle a donc pour but de : (9–11)

- Restituer un volume osseux adéquat, autant dans son anatomie que dans sa forme ;
- Restaurer les défauts des tissus mous ;
- Rétablir une symétrie et une harmonisation du visage ;
- Chercher à obtenir une normalisation des fonctions oro-faciales ;
- Préparer la réhabilitation dentaire ultérieure.

La reconstruction immédiate (ou primaire) est effectuée dans le même temps opératoire que la résection carcinologique. Cela a l'avantage de diminuer la rançon esthétique cervico-faciale due à l'amputation d'une partie de la mandibule, de réduire les complications post-opératoires et d'améliorer le confort du patient.

La radiothérapie post-opératoire peut être à l'origine d'effets secondaires intenses et durables sur les parties molles et sur les os. On peut citer le délai retardé de la cicatrisation du greffon, l'hypovascularisation des tissus et l'ostéoradionécrose de la mandibule. Cependant, lors d'une reconstruction primaire, les radiations ionisantes ne compromettent pas la vitalité du lambeau car il est richement vascularisé. Il faut tout de même chercher à obtenir une cicatrisation muqueuse avant le début du traitement. (2)

En chirurgie oncologique, l'exérèse de la lésion ne doit en aucun cas tenir compte du procédé de réparation prévu. C'est pourquoi il est préférable que la résection et la reconstruction soient entre les mains de chirurgiens différents. Le chirurgien reconstructeur s'adapte aux exigences de la chirurgie d'exérèse. Le prélèvement et la manipulation du lambeau doivent, de ce fait, offrir la possibilité d'un travail chirurgical en double équipe. (12)

## **2.2.2. Le lambeau de fibula**

### **2.2.2.1. Historique**

Les lambeaux pour reconstruction osseuse sont des lambeaux composites constitué d'os, de muscles et/ou de peau. Les plus utilisés sont le lambeau de fibula, le lambeau de scapula (omoplate) et le lambeau de crête iliaque.

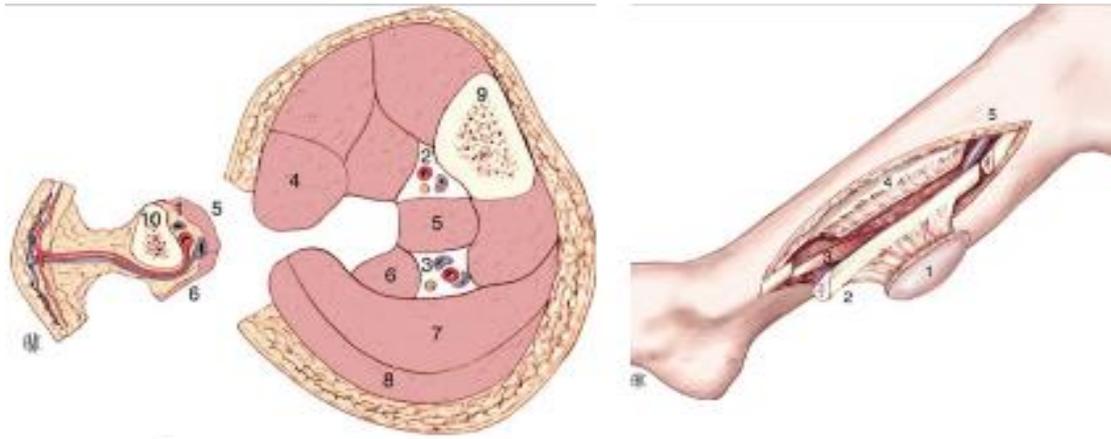
Le lambeau de fibula est décrit pour la première fois par Taylor en 1975 pour la reconstruction du membre inférieur. Puis il est transféré dans la région cervicofaciale pour la reconstruction mandibulaire par Hidalgo en 1989. La réparation de la mandibule est le domaine de la chirurgie reconstructrice cervicofaciale qui bénéficie le plus aujourd'hui de l'apport de ce lambeau. (5,13,14)

### **2.2.2.2. Composition**

La fibula est un os long et grêle constituant la partie latérale du squelette de la jambe. Elle est composée d'un corps, la diaphyse, et de deux extrémités, les épiphyses.

Le lambeau composite de fibula comprend (5):

- Une composante osseuse : il s'agit de tout ou une partie de la diaphyse ;
- Une palette cutanée : elle permet de réparer la perte de substance muqueuse ou cutanée associée au défaut osseux, elle assure une grande mobilité par rapport à l'os et facilite le repositionnement sur le site receveur ;
- Une composante musculaire : elle peut intéresser le muscle long fléchisseur propre du gros orteil, le chef latéral du soléaire ou les muscles péroniers ;
- Un pédicule vasculaire : il est composé de l'artère fibulaire et de ses deux veines satellites.



- 1: pédicule vasculaire péronier
- 2: pédicule tibial antérieur
- 3: pédicule tibial postérieur
- 4: muscles péroniers latéraux
- 5: muscle tibial postérieur
- 6: muscle long fléchisseur de l'hallux
- 7: muscle soléaire
- 8 : muscles jumeaux
- 9: tibia
- 10: péroné

- 1: palette cutanée du lambeau
- 2: péroné sectionné et tracté en dehors
- 3: muscle long fléchisseur de l'hallux
- 4: muscle tibial postérieur
- 5: pédicule vasculaire péronier

Figure 3: Vues supérieure et latérale du prélèvement d'un lambeau composite de fibula (5)

### 2.2.2.3. Dimensions et vascularisation

La vascularisation est double, médullaire et périostée. Puisque la réalisation des ostéotomies (sections osseuses chirurgicales) interrompt le contingent médullaire, la distribution en échelle des artères perforantes préserve la vitalité de chaque fragment après segmentation. Ces ostéotomies, généralement au nombre de deux, sont nécessaires à la reproduction du galbe de la région mentonnière.

La réalisation des anastomoses nécessite des vaisseaux de bonne qualité. Le pédicule mesure en général 8cm. Les vaisseaux sont suffisamment larges pour être anastomosés aux vaisseaux du cou en toute sécurité. (9)

La fibula peut fournir un segment osseux de 25 cm, solide, épais et bicortical. Cette structure dense offre une stabilité primaire élevée aux implants, s'il a été décidé d'en poser lors de la reconstruction. Il s'agit alors d'implants courts, du fait de la faible hauteur de l'os,

de 10 à 13mm. Il est cependant possible d'exploiter toute la hauteur du greffon en plaçant des implants bicorticaux. Des artifices ont aussi été proposés pour optimiser la hauteur osseuse tel que la superposition de deux segments de fibula dans la technique en double barre et la distraction verticale. (8,10,15)

#### **2.2.2.4. Les avantages du lambeau de péroné**

Ce lambeau apporte un os de qualité pour la reconstruction après mandibulectomie interruptrice. Le volume et la longueur osseuse disponible du greffon sont adaptés à de larges reconstructions. (2)

Le prélèvement du pédicule nourricier et la micro-anastomose permettent la conservation de la viabilité tissulaire, une meilleure résistance aux infections et aux traumatismes et une cicatrisation osseuse comparable à celle d'une fracture. (8)

Ce lambeau présente une bonne adaptation, une excellente fiabilité et une faible morbidité au niveau du site receveur. Il n'y a aucune séquelle fonctionnelle au site de prélèvement. En effet, la normalisation de la marche s'effectue progressivement sur les trois mois qui suivent l'opération. (16)

Ce type de lambeau permet une intervention simultanée à deux équipes puisqu'aucun changement de position per-opératoire n'est nécessaire et que le site donneur est éloigné de la région cervicofaciale. (5)

#### **2.2.2.5. Les inconvénients**

La faible largeur et le manque de souplesse de la palette cutanée n'autorisent la fermeture directe du site donneur que dans de rares cas. Cela est notamment insuffisant lors de grosses pertes de substances des parties molles. Il est alors nécessaire d'envisager une greffe de peau provenant généralement de la cuisse. (5)

Le prélèvement du péroné est contre-indiqué en cas d'artérite sévère des membres inférieurs du fait du risque d'ischémie après ligature de l'artère fibulaire. Une échographie Doppler des vaisseaux du cou et une angio-IRM des membres inférieurs sont donc indispensables afin de s'assurer de la perméabilité des vaisseaux. (2)

La conformation de ce lambeau nécessite la réalisation d'ostéotomies. Chaque fragment osseux intermédiaire doit mesurer au minimum deux centimètres de long afin de ne pas compromettre sa vascularisation.

C'est une intervention qui demeure coûteuse, longue et lourde aussi bien pour le patient que pour les chirurgiens. Elle doit être effectuée par une équipe expérimentée.

## 3. Le protocole opératoire

### 3.1. La pelvimandibulectomie interruptrice

#### 3.1.1. Définition

La pelvimandibulectomie antérieure est réalisée lorsqu'il existe un envahissement osseux visible radiologiquement pour les tumeurs du plancher buccal ou les tumeurs du rebord alvéolaire de la mandibule. L'importance du sacrifice osseux dépend des radiographies préopératoires et du contrôle peropératoire. (8)

Comme elle interrompt la continuité symphysaire, la création d'une brèche osseuse provoque un déséquilibre ostéo-maxillo-dentaire dont les conséquences ont été citées précédemment. Elle n'est pas viable sans reconstruction. (6)



*Figure 4 : Tumeur envahissant la mandibule, imposant une exérèse segmentaire en passant au large dans le plancher en dedans, la joue en dehors (8)*

#### 3.1.2. Les étapes

##### 3.1.2.1. Les étapes préliminaires

Au cours du bilan pré-opératoire, les chirurgiens évaluent l'étendue du défaut osseux mandibulaire ainsi que la longueur des fragments et le nombre d'ostéotomies nécessaires au modelage du lambeau. Cela est nécessaire pour calculer la longueur totale d'os à prélever. Ils auront systématiquement tendance à surdimensionner le prélèvement compte tenu de l'éventuelle progression tumorale au-delà des limites visibles sur les radios.

Le jour de l'opération, l'anesthésie générale est associée à une trachéotomie. Le patient est positionné en décubitus dorsal, avec un billot sous les épaules et la tête en rectitude. L'instrumentation chirurgicale est préparée.

##### 3.1.2.2. L'abord cervical

Les incisions partent de la pointe mastoïdienne à la région sous-mentale. Les deux incisions se rejoignent en formant un segment horizontal à mi-distance du menton et du relief du corps de l'os hyoïde.

La dissection se poursuit à la face profonde du muscle peaucier cervical jusqu'au rebord basilaire de la mandibule, décollant un lambeau cutané-peaucier. Cette voie d'abord

ménage les rameaux mandibulaires du nerf facial. Ce lambeau est mis sur pinces de Kocher et fixé vers le haut. C'est à ce moment qu'a lieu le curage des ganglions atteints.

### **3.1.2.3. La préparation des vaisseaux**

Les vaisseaux receveurs sont isolés et sélectionnés au cours de l'évidement ganglionnaire cervical. (14)

Les vaisseaux les plus utilisés pour réaliser les anastomoses avec les vaisseaux fibulaires sont :

- Les branches collatérales de l'artère carotide externe, en particulier l'artère thyroïdienne supérieure. C'est la branche la plus accessible et son diamètre est adéquat ;
- Les branches du tronc veineux thyrolinguofacial de Farabeuf.

### **3.1.2.4. L'abord de la région d'exérèse**

Il peut se faire par voie endobuccale. La lèvre inférieure est alors réclinée à l'aide de deux écarteurs de Farabeuf. Une incision muqueuse est réalisée à la face externe de la mandibule. Cette incision est tracée un peu au-dessous de la limite de la gencive attachée afin de préserver quelques millimètres de muqueuse pour la fermeture. Cette incision est en regard de l'extension tumorale qu'elle déborde de 1cm.

La rugination de la face externe de la symphyse sur 5mm rejoint celle réalisée en cervical. Le lambeau cutanéopeaucier est relevé vers le haut au-dessus du plan dentaire de façon à exposer la totalité de la mandibule.

Des modèles moulent l'arc mandibulaire.

### **3.1.2.5. Le temps hémorragique : Exérèse de la tumeur**

La muqueuse de la face interne de la mandibule est coupée au niveau de la zone de section osseuse. Une lame malléable est mise en place de la région cervicale jusque dans la cavité buccale. Elle se trouve à la face interne de la mandibule en regard de la section osseuse.

La région symphysaire est attirée en avant et en dehors, la pointe de la langue est tractée vers le haut.

Les sections osseuses verticales sont réalisées en avant des trous mentonniers à l'aide d'une scie oscillante. Le fragment est tracté vers le bas dans la région cervicale et l'ensemble du bloc tumoral resté solidaire de ce fragment osseux est libéré progressivement par la section des parties molles.

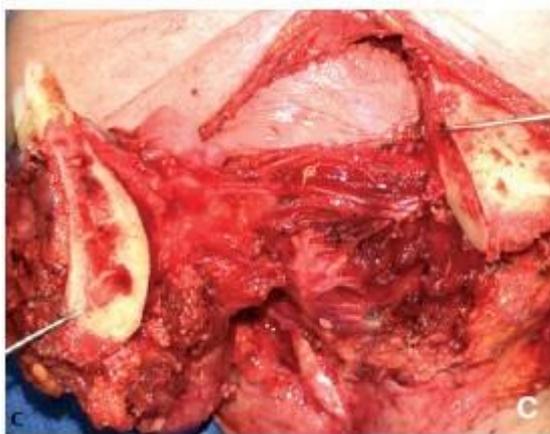


Figure 5 : Section osseuse segmentaire (8)

La section muqueuse est commencée le long de la langue en se tenant à distance de la tumeur. Cette section concerne les fibres des muscles envahis, le mylohyoïdien, et le ventre antérieur des digastriques. Elle est facilitée par la traction et la bascule en avant et en dehors du fragment osseux. Elle nécessite la ligature des vaisseaux touchés et l'électrocoagulation de tout point hémorragique.



Figure 6 : Pièce opératoire réséquée (8)

## 3.2. La réparation

La reconstruction s'effectue en plusieurs étapes (5) :

- Prélèvement de plusieurs tissus reliés à un même pédicule vasculaire. C'est le transfert libre ;
- Section du pédicule ;
- Revascularisation du transfert à distance sur les vaisseaux receveurs grâce à des anastomoses micro-chirurgicales = lambeau libre micro-anastomosé.

### 3.2.1. Prélèvement du lambeau

La technique de prélèvement utilisée aujourd'hui est celle décrite par Gilbert en 1979. Il est effectué sous garrot pneumatique. L'abord se fait par la face latérale du péroné, entre les muscles péroniens latéraux en avant et le soléaire en arrière.

Il débute par le repérage du septum intermusculaire de la loge externe de la jambe, situé sur la ligne unissant la tête du péroné à la malléole externe. La palette cutanée est dessinée. Elle est fusiforme et centrée sur le septum intermusculaire à la jonction tiers moyen/tiers inférieur, à l'endroit où siège le maximum de perforantes septocutanées ou musculocutanées.

L'incision débute à la partie antérieure de la palette cutanée et se prolonge sur la ligne du septum intermusculaire.

Les muscles péroniens latéraux sont refoulés en avant, afin de découvrir le septum intermusculaire qui les sépare du muscle soléaire. A ce stade, les perforantes septocutanées sont identifiées.

La dissection se poursuit à la partie antérieure du péroné, en refoulant la loge musculaire antérolatérale puis à la partie interne du péroné, permettant de découvrir le nerf péronier profond, le pédicule tibial antérieur et la membrane interosseuse (tibiapéroné).

Les muscles antéro-externes et postérieurs sont libérés du péroné, préservant une fine couche musculaire autour de l'os. Le pédicule vasculaire est découvert au niveau inférieur et sectionné entre deux ligatures. La dissection s'effectue de bas en haut, sectionnant le ligament inter-osseux, emportant le pédicule et son environnement musculaire.

Les sections osseuses proximales et distales sont effectuées à l'aide d'une scie électrique en préservant une longueur d'os de 7 cm en dessous de la tête fibulaire et de 7 cm au-dessus de la malléole externe. Cela maintient la stabilité articulaire du genou et de la cheville. Cela permet également de protéger le nerf péronnier commun qui contourne en haut la tête du péroné.

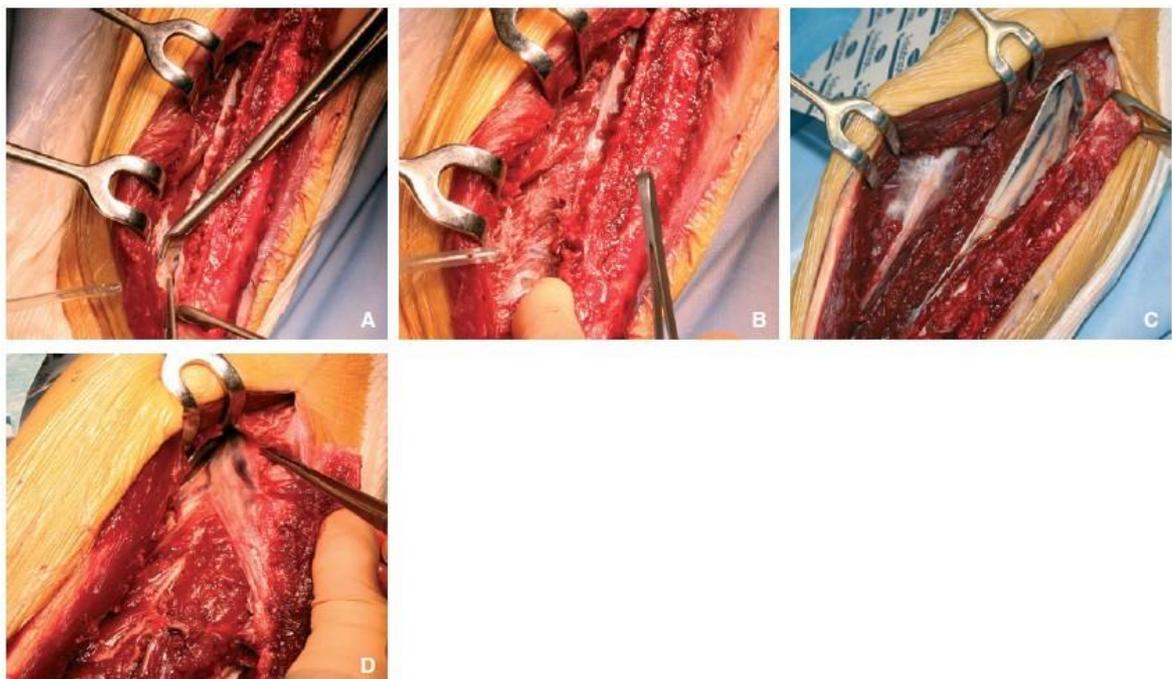


Figure 7: Prélèvement du lambeau de fibula (8)

Le début des ostéotomies fibulaires se fait à l'aide du modèle mandibulaire sur le site donneur avant la ligature du pédicule vasculaire. La conformation du lambeau débute à ce stade mais elle sera terminée après son autonomisation au niveau du site receveur.

L'extrémité supérieure du pédicule vasculaire est alors clampée puis sectionné, vaisseau par vaisseau. Les veines sont coupées avant l'artère afin de vérifier le bon retour veineux. Une fois le lambeau libéré de son site de prélèvement, le pédicule vasculaire est délicatement rincé au sérum hépariné, afin de vérifier l'hémostase sur le site.

La fermeture cutanée s'effectue de façon directe lorsqu'elle est possible sans tension excessive, après avoir mis un drain aspiratif drainant les différentes loges musculaires. Une greffe de peau mince, prélevée à la face interne de la cuisse, est utilisée si on suppose qu'il y aura tension sur la suture.



*Figure 8 : Aspect du lambeau en fin de dissection : péroné tracté en dehors, visualisation du pédicule vasculaire à la face interne de l'os (5)*

### **3.2.2. Mise en place du lambeau**

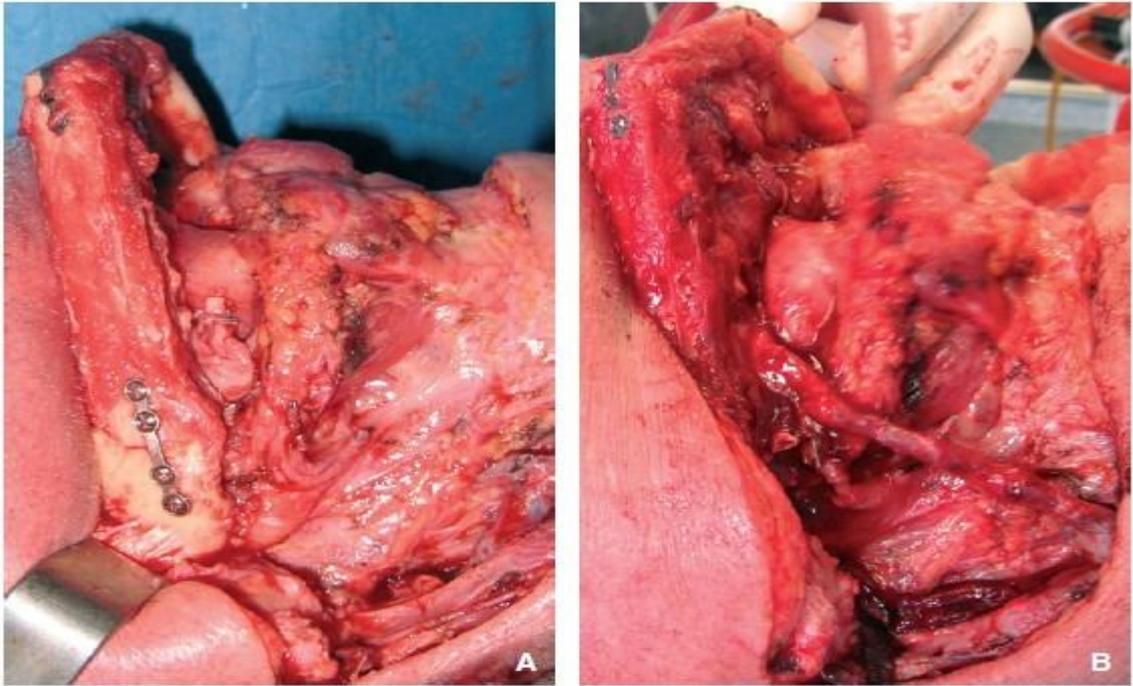
Le blocage inter-maxillaire est positionné. Il est maintenu pendant toute la durée des ostéosyntheses et enlevée en fin d'intervention.

La mise en place du lambeau libre sur le site receveur se fait avec une extrême prudence vis-à-vis du pédicule vasculaire afin d'éviter toute traction, torsion ou plaie vasculaire.

Lorsque la reconstruction est concomitante à la résection et que l'anatomie n'a que peu été modifiée par la pathologie, des repères peuvent guider la conformation fibulaire. Il s'agit notamment des arcs moulant l'arc mandibulaire ou même des plaques d'ostéosynthese mises en place avant à la résection.

Le greffon est modelé puis « ostéosynthésé » par des mini ou maxiplaques sur les moignons mandibulaires.

Le temps micro-chirurgical se termine par les anastomoses artérielles et veineuses entre les vaisseaux donneurs et receveurs.



*Figure 9 : Anastomoses (8)*

La palette cutanée du lambeau est suturée à la muqueuse de la mandibule restante. Cette fermeture s'effectue après un délai d'observation indispensable suite au déclampage, afin de vérifier l'absence de perméabilité au niveau des anastomoses.



*Figure 10 : Réparation d'une perte de substance symphysaire étendue aux deux branches horizontales. A gauche, vue peropératoire après mise en place du lambeau (deux ostéotomies ont été nécessaires à la conformation du greffon). A droite, aspect du greffon sur le panoramique dentaire réalisé à trois mois post-opératoires (5)*

En résumé, le lambeau de fibula constitue une méthode fiable de reconstruction mandibulaire mais des échecs lors de la chirurgie peuvent survenir : Les lambeaux osseux supportent en général moins bien l'ischémie que les autres lambeaux. C'est pour cela que les reconstructions osseuses sont associées à un taux d'échec plus important que les réparations n'intéressant que les tissus mous de la face et du cou. Les ostéotomies peuvent entraîner des zones de compression ou de blessure du pédicule vasculaire, ce qui perturbe la revascularisation du greffon. La durée opératoire supérieure à 11 heures peut également jouer un rôle péjoratif sur le taux de succès des lambeaux libres.

C'est principalement pour résoudre ces problèmes que les chirurgiens se sont intéressés à la possibilité de réaliser virtuellement des outils opératoires permettant de faciliter le geste chirurgical et de réduire au maximum les échecs chirurgicaux. C'est le développement permanent des techniques d'impression tridimensionnelle qui a permis la production de ces aides.

## 4. L'impression tridimensionnelle

### 4.1. Généralités

L'impression tridimensionnelle et la fabrication additive sont synonymes. La première expression désigne un terme utilisé dans le langage courant, contrairement à la seconde qui, elle, est réservée au monde de l'industrie.

Il s'agit d'une innovation technologique récente, dont les premières applications remontent aux années 1980. Elle désigne l'ensemble des procédés de création de pièces par ajout de matière. Ces techniques ont pour point commun de réaliser un objet par couches successives. L'objet prend forme au fur et à mesure de la solidification des couches. (17)

Cette fabrication consiste à la mise en forme d'un objet en empilant des couches successives. Elle diffère de l'usinage qui implique la mise en forme d'un objet par soustraction de matière. L'impression 3D permet la réalisation de formes plus complexes que l'usinage.

C'est un procédé à commande numérique. L'impression 3D est rendue possible grâce à une imprimante 3D reliée à un ordinateur. Elle est associée à un ensemble de logiciels informatiques, qui permettent de préparer le fichier 3D et de positionner la pièce dans l'imprimante. Le processeur de l'imprimante reçoit ensuite ces données et contrôle toute la phase d'impression. (17)

Le terme « computer-aided design/computer-aided manufacturing » (CAD/CAM) équivaut en français aux techniques de CFAO. On réalise à partir d'un modèle 3D un objet physique en assemblant les couches d'un même matériau. On dessine l'objet numérique grâce à un outil de conception assistée par ordinateur. Le fichier 3D obtenu est traité par un logiciel qui organise le découpage en tranches des différentes couches. Ce découpage est envoyé à l'imprimante qui consolide la matière jusqu'à obtenir la pièce finale. Ce traitement est appelé fabrication assistée par ordinateur. (18)

Elle est caractérisée par trois grands principes (19) :

- La liberté de conception : les pièces produites peuvent comporter des caractéristiques difficiles voire impossible à reproduire par un procédé de fabrication classique. Ces caractéristiques peuvent aussi bien concerner la géométrie de la pièce que le matériau la constituant, autorisant le développement des pièces multimatériaux. La fonctionnalité d'un produit peut ainsi être optimisée grâce à une structure conçue pour répondre à un cahier des charges donné. Son coût peut être réduit grâce à la suppression d'assemblages de pièces ;
- La flexibilité : ne nécessitant pas d'outillages spécifiques, la fabrication additive est parfaitement adaptée à la production en petite série. Cette flexibilité permet d'avoir une production qui élimine la nécessité de stock ;
- La personnalisation : l'impression 3D permet d'obtenir des produits parfaitement adaptés aux besoins du client sans surcoûts par rapport à une production en série.

La fabrication additive représente un enjeu industriel, économique et sociétal majeur. Elle constitue une révolution dans le domaine de la fabrication, en faisant développer de nouveaux savoir-faire et de nouvelles compétences. Basée sur des technologies innovantes, elle remet en cause les modèles de fabrication traditionnels. (18)

La diversité des procédés et des matériaux utilisés permet l'application de cette technologie dans de nombreux domaines, notamment l'automobile, les équipements industriels, l'aéronautique et le secteur médical dans lequel elle représente un marché concret et prometteur. (20)

## 4.2. Historique

Charles W. Hull, fondateur de la société 3D Systems dépose le brevet de la stéréolithographie en 1984. L'orientation initiale de ce procédé est purement industrielle. (21)

En 1987, la fabrication additive devient une réalité commerciale. De nombreuses autres méthodes d'impression 3D voient le jour. Il existe actuellement 6 principales technologies. Ce sont les plus répandues dans le monde industriel.

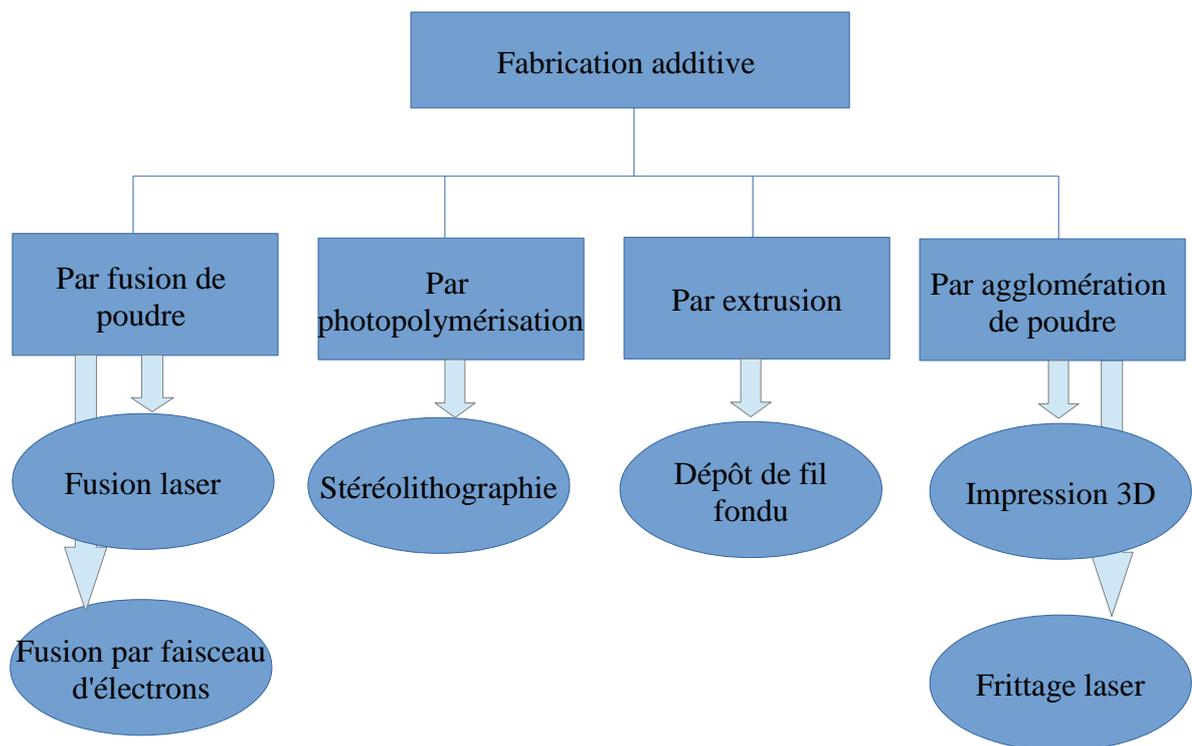


Figure 11 : Les méthodes de fabrication additive (18)

Jusqu'en 2005, l'usage de imprimantes est réservé à l'industrie. Les constructeurs mettent au point d'autres modèles, dans le but d'améliorer et de développer de nouveaux procédés. Les imprimantes 3D sont de plus en plus utilisées pour la production de petites séries, mais en restant toujours appliquées au domaine industriel.

La chute des brevets dans le domaine public, 20 ans après leur dépôt, a permis le développement de nombreuses compagnies proposant des services et/ou la vente d'imprimantes 3D aux particuliers.

Le faible coût des machines a permis à certains services de médecine de s'en équiper dans l'intention de développer de nouvelles prises en charge pour les patients. C'est ainsi qu'en 1999, la première prothèse imprimée en 3D est implantée sur un être humain. Cette étape constitue une avancée majeure en ouvrant de nouvelles perspectives à la médecine. La même équipe médicale reproduit un rein fonctionnel en 2002. Capable de filtrer le sang et de diluer l'urine, il est greffé sur des animaux et ouvre la voie à la création d'organes et de tissus à des buts médicaux. En 2010, la société Organovo parvient à créer, à l'aide d'une bio-imprimante 3D, le premier vaisseau sanguin fonctionnel.

L'apparition des machines grands publics et le couplage possible avec le scanner 3D ont favorisé la médiatisation de l'impression 3D. Cette technologie devrait contribuer à la troisième révolution industrielle, qui met en avant la fabrication individualisée par rapport à la production de masse.

## 4.3. Les procédés de fabrication additive

### 4.3.1. Les étapes

Les technologies de fabrication additive sont issues d'un ensemble de processus regroupés sous le terme de prototypage rapide. Ce dernier vise à réaliser des maquettes ou prototypes à partir de la modélisation CAO le plus rapidement possible afin de réduire le temps de conception des produits. (18)

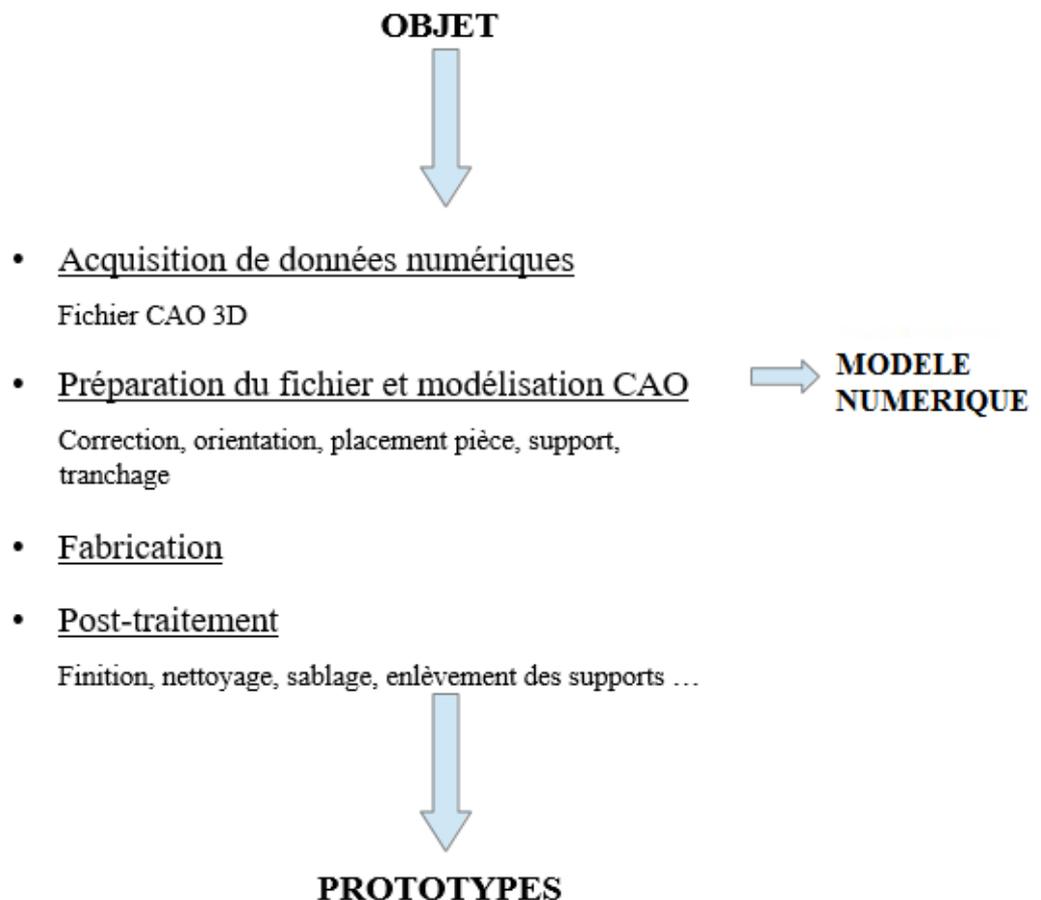


Figure 12 : Les étapes de fabrication additive (18)

Parmi les technologies les plus utilisées, nous détaillerons uniquement celles qui concernent le monde médical :

- Le dépôt de matière fondue ;
- La photopolymérisation en cuve ;
- L'impression 3D.

### 4.3.2. Le dépôt de matière fondue

Ce procédé est également appelé « dépôt de fil en fusion ».

L'extrusion de matière est le procédé le plus ancien de fabrication additive dans lequel le matériau est distribué de manière sélective par une buse ou un jet.

Il est peu onéreux et facile d'utilisation, ce qui explique qu'il soit le type de fabrication additive le plus répandu.

Tableau 1 : Les caractéristiques du dépôt de matière fondue (17,20)

Dénomination	FDM : fused deposition modeling
Procédé	Dépôt de filament fondu en couches successives très fines. Chauffé à haute température, le filament atteint son point de fusion. Les rouleaux de fil de polymères sont fondus et déposés par couche par une buse sur le plateau de l'imprimante 3D jusqu'à refroidissement et obtention de la pièce finale.
Matériaux	Thermoplastiques : Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS), polycarbonate ou élastomères Polymères conditionnés en rouleau de fil
Avantages	- Machines peu chères, développement dans le grand public - L'ABS est durable et résistant aux chocs
Inconvénients	- Ne convient que pour les petites pièces - Temps de fabrication très long - Aspect brut, non poli
Exemples	- Prototypage, maquette - Ce procédé est utilisé pour les imprimantes 3D personnelles.

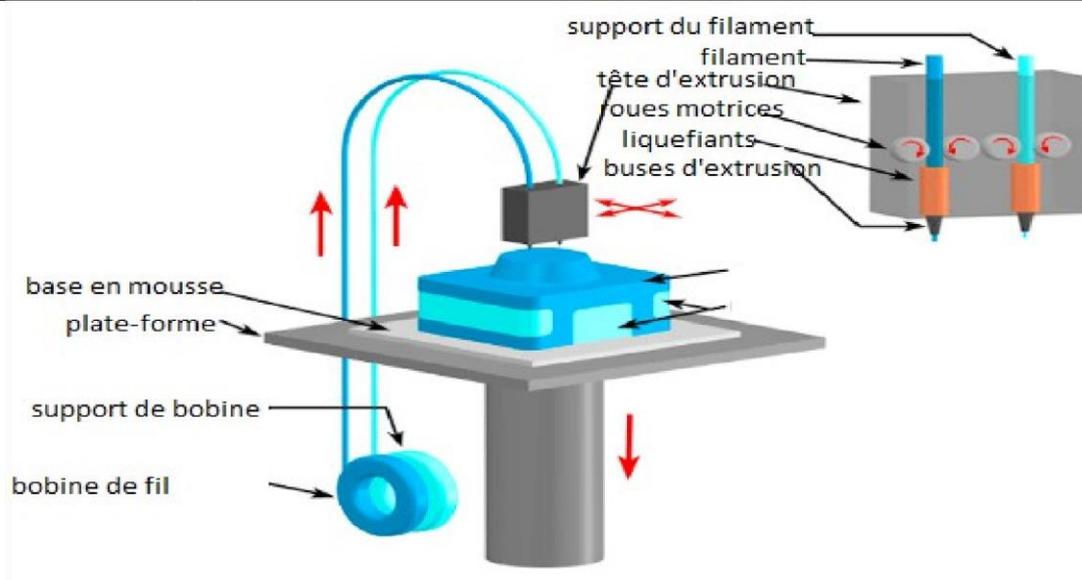


Figure 13 : Procédé par extrusion de matière (20)

### 4.3.3. La photopolymérisation en cuve

En 1986, la société de Charles Hull crée la première imprimante 3D qui permet la réalisation de pièces de prototypes dans le but de tester leur design avant de lancer leur production à grande échelle. Ce procédé consiste en un durcissement d'un polymère plongé dans une cuve par polymérisation activée de la lumière.

Tableau 2 : Les caractéristiques de la photopolymérisation (17,20)

Dénomination	SLA : stereolithograph apparatus
Procédé	Le faisceau laser balaie la surface de résine liquide en fonction du modèle 3D numérique transmis à l'imprimante. La première tranche de l'objet est dessinée par solidification des polymères exposés à la surface. La plateforme mobile descend ensuite pour que le laser puisse tracer la tranche suivante. Le procédé est répété jusqu'à obtention complète du modèle. Lors de la phase de finition a lieu l'enlèvement du support de maintien de la pièce sur le plateau. L'objet est ensuite rincé dans un solvant, puis placé dans un four ultra-violet pour terminer la polymérisation, le nettoyer entièrement et renforcer sa solidité.
Matériaux	Plastiques thermodurcissable (ABS) sous forme liquide, élastomères, résines époxyes ...
Avantages	Protocole parfaitement adapté à la réalisation de pièces demandant une reproduction fidèle des détails Dimension possible des pièces : plusieurs mètres La machine ne demande aucune surveillance particulière et peut fonctionner en autonomie sans aucun risque.
Inconvénients	Technologie coûteuse : les imprimantes SLA et les polymères utilisés sont parmi les plus chers du marché Les machines nécessitent des équipements adaptés. Un système de ventilation est obligatoire en raison des fumées toxiques qui s'échappent des polymères et des solvants Impression lente : temps moyen d'impression compris entre 6 et 12 heures
Applications	Toutes applications à base de résines

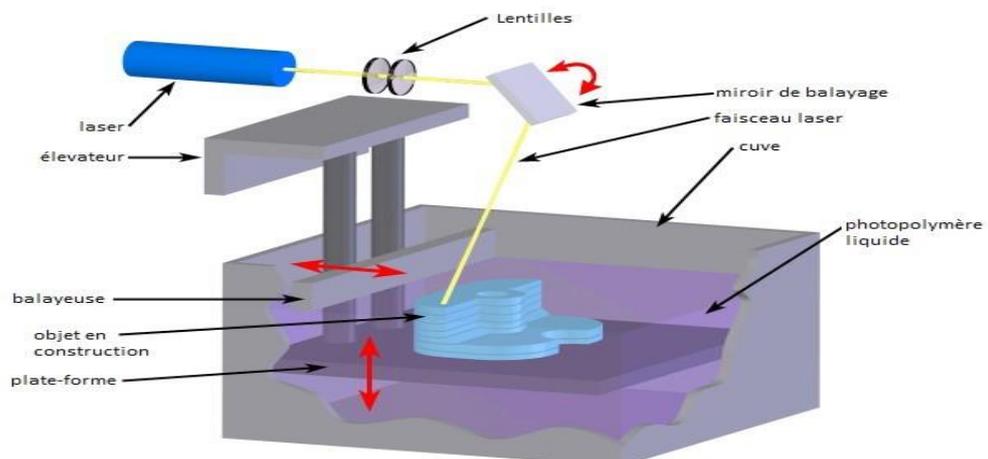


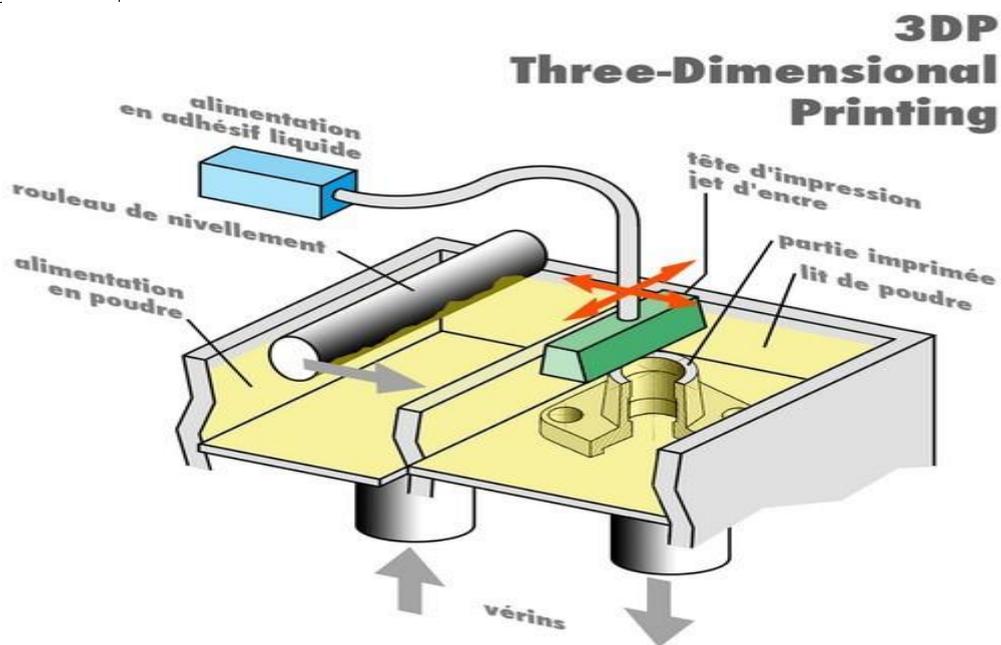
Figure 14 : Procédé de stéréolithographie (22)

#### 4.3.4. L'impression 3D

L'impression tridimensionnelle est utilisée est basée sur une méthode d'agglomération de poudre par collage.

Tableau 3 : Les caractéristiques de l'impression 3D

Dénomination	3DP : Three-dimensional Printing
Procédé	Étalement d'une fine couche de poudre de composite sur une plate-forme puis dépôt par la tête d'impression de petites gouttes de glues colorées. En combinant ces gouttes, on obtient la couleur désirée. La plate-forme s'abaisse au fur et à mesure que les couches de poudre sont collées jusqu'à obtenir l'objet final. Les finitions consistent à chauffer la pièce et aspirer l'excédent de poudre.
Matériaux	Métaux et tous matériaux sous forme de poudre fine
Avantages	- Rapidité - Possibilité d'une large gamme de couleurs
Inconvénients	Sans post traitement, les pièces sont plus fragiles et leur surface est plus rugueuse. Un prototype fonctionnel peut ne pas supporter les contraintes de fonctionnement normal.
Applications	Toutes applications ne nécessitant pas la résistance aux grandes contraintes mécanique
Exemple	Prototypes



Processus par dépôts successifs de poudre et de glue.  
Une tête d'impression dépose de minuscules gouttes de glue qui viennent encoller le matériau en poudre. La coloration est réalisée grâce à l'utilisation de glues teintées. Un traitement de finition est appliqué : la pièce imprimée est chauffée et la poudre excédentaire supprimée.

Figure 15 : La 3DP (23)

## 4.4. Les avantages et inconvénients de la fabrication additive

Tableau 4 : Tableau des avantages et des inconvénients de la fabrication additive

	Avantages	Inconvénients
Fabrication	<p>Impression rapide et production accélérée pour répondre à la demande des clients</p> <p>Réduction des délais de fabrication</p> <p>Amélioration de la qualité des machines</p> <p>Absence de sous-traitance</p>	<p>Faible productivité</p> <p>Finition obligatoire</p> <p>Reproductibilité des pièces difficile pour certaines technologies</p> <p>Coût élevé des machines industrielles</p>
Logiciel	<p>Amélioration de l'accessibilité et standardisation des formats logiciels de CAO</p> <p>Développement de nouveaux procédés d'impression</p>	<p>Maîtrise de nouveaux outils nécessitant une formation</p>
Matériaux	<p>Utilisation de matières première à caractère discret (poudre, gouttelette) permettant un contrôle fin de la matière</p> <p>Diversité croissante des matériaux utilisables</p> <p>Économie de matière (principe de construction couche par couche et recyclage des matériaux non transformés)</p>	<p>Prix élevé des poudres résines</p>
Résultats	<p>Conception innovante</p> <p>Optimisation de la fonctionnalité et personnalisation de la pièce</p> <p>Facilitation des séries limitées</p> <p>Obtention d'un niveau de complexité géométrique des pièces supérieures aux techniques d'usinages conventionnelles</p> <p>Mise en œuvre plus aisée de matériaux difficiles comme le titane</p> <p>Fabrication de pièces de petites tailles</p> <p>Introduction de nouvelles fonctionnalités sur une pièce en faisant varier les propriétés des matériaux (couleur, dureté)</p> <p>Possibilité de réaliser en monobloc des pièces multi-matières</p>	<p>Limitation de la taille des pièces fabriquées</p> <p>Imperfections de l'état de surface (rugosités)</p>

## **4.5. Les applications de l'impression 3D**

### **4.5.1. Généralités**

La fabrication additive connaît un véritable essor dans le domaine médical. Sachant que l'efficacité d'un traitement et son degré de personnalisation sont intrinsèquement reliés, la finalité du prototypage médical réside dans la fabrication directe de pièces fonctionnelles et opératoires.

Le prototypage présente de nombreux avantages : le partage d'informations, l'aide à l'intervention et à la pédagogie. Il est présent dans la quasi-totalité des disciplines médicales, sous différentes formes, et particulièrement utile et accessible dans les domaines chirurgicaux.

L'imagerie 3D anatomique est à l'origine de la majorité des applications cliniques. Celle-ci est un outil maîtrisé par les professionnels de santé. Cependant, c'est l'augmentation du nombre de machines à imprimer, la simplification de leur utilisation mais aussi le développement de logiciels performants de CAO qui ont permis l'accès à l'impression 3D dans les établissements de santé.

L'imagerie médicale a dû faire ces dernières années des progrès sur la qualité des images et sur la rapidité des examens. Les progrès informatiques se sont traduits par un gain de rapidité des processeurs. Les améliorations des systèmes informatiques ont rendu les images 3D plus réalistes mais ont également permis des analyses et des mesures de surface de volume. Le traitement des images et leur représentation en 3D permettent une représentation clinique plus proche de la réalité anatomique.

### **4.5.2. Applications en chirurgie générale**

#### **4.5.2.1. Les orthèses, prothèses externes et exosquelette**

Des prothèses externes élaborées sur-mesure à partir de données d'imagerie du patient peuvent être réalisées (prothèses de jambes, doigt, main ...). Cette technologie offre l'avantage de produire rapidement et à bas coût des prothèses adaptées à la morphologie du patient, lui apportant plus de confort. Des systèmes d'exosquelettes ont été développés par impression 3D.

Dernière performance de l'orthèse 3D, une main prothétique myoélectrique a été créée et fonctionne à partir de la récupération d'un courant électrique produit par la contraction musculaire du membre amputé grâce à des électrodes placées sur la peau. (20)



Figure 16 : Main prothétique myoélectrique (24) et exosquelette (20)

#### 4.5.2.2. La bioimpression

Les progrès technologiques de l'ingénierie tissulaire et l'avancée de la recherche ont fait de « l'impression du vivant » une réalité. Il est possible d'imprimer des cellules souches humaines ou d'autres constituants biologiques des tissus avec une résolution micrométrique qui permet de contrôler les processus d'assemblage cellulaire. Les recherches menées au niveau international concernent principalement la peau et le tissu osseux.

Ainsi, on pourra dans quelques années envisager la fabrication de tissus biologiques complexes vivants tels que des organes ou des parties d'organes.

La bioimpression consiste à accumuler des couches de matière successives. Les constituants se présentent sous la forme liquide ou pâteuse. La phase de scannage consiste à déterminer la forme de l'organe. La CAO permet de concevoir l'objet à imprimer. Cette préfiguration donne un amas de cellules, qui durant la phase de maturation, vont se lier entre elles et s'organiser. (20)

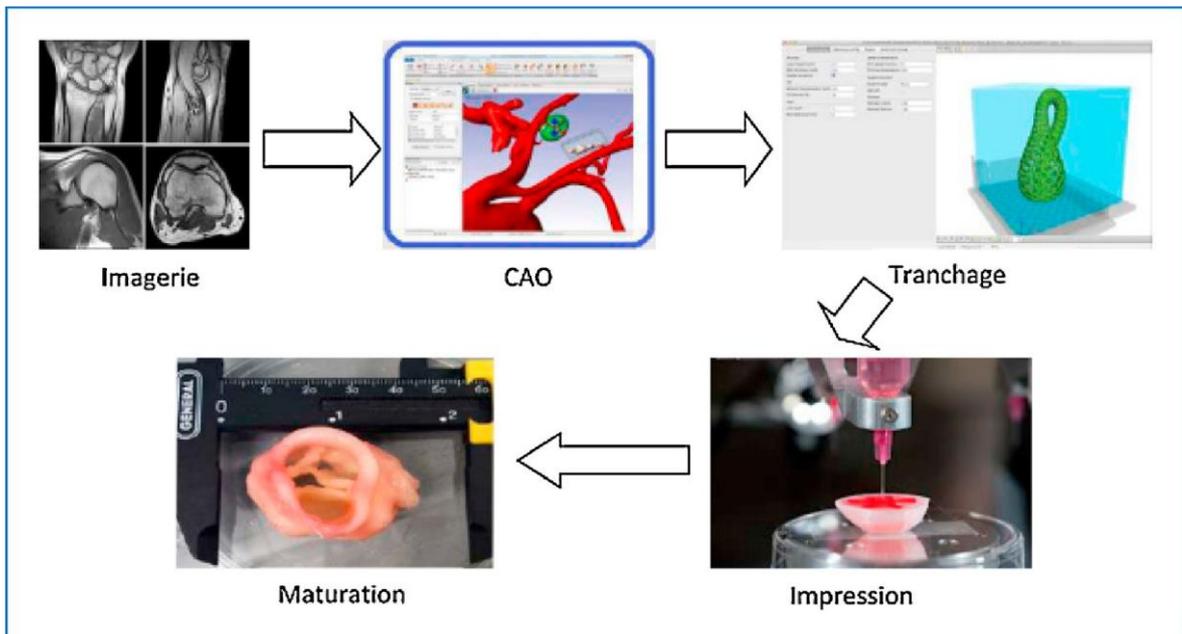


Figure 17 : Etapes du bioprinting (20)

L'avènement de cette technique constituerait une révolution pour toutes les affections nécessitant une greffe. Cette technologie pourrait répondre à de très nombreux besoins

médicaux en permettant de fabriquer à la demande des tissus humains. La bioimpression représente un espoir pour la médecine régénérative.

### **4.5.3. Applications en chirurgie maxillo-faciale**

#### **4.5.3.1. La modélisation 3D**

La modélisation virtuelle est utilisée pour rendre palpable en une forme physique les informations issues de l'imagerie. Il en ressort une représentation fidèle de ces données médicales. Il devient alors possible d'obtenir des copies exactes des structures osseuses faciales et crâniennes du patient. (25)

La visualisation précise de l'anatomie des patients à l'échelle réelle et des rapports topographiques entre les structures et les tissus, constitue une aide à la décision du plan de traitement et permet d'anticiper les difficultés opératoires. Les chirurgiens maxillo-faciaux ont été les premiers à avoir développé la modélisation numérique au service de leur art. (26)

Avec la récente popularisation des logiciels et l'arrivée sur le marché d'imprimantes à faible coût, les applications de l'impression se sont multipliées au sein des services de chirurgie orale. Elle intervient donc dans un cadre étiologique varié, aussi bien en chirurgie malformative, carcinologique et traumatologique avec des résultats fonctionnels et esthétiques qui s'annoncent excellents. (26)

#### **4.5.3.2. La formation des médecins et l'éducation des patients**

L'impression 3D représente l'avenir de l'enseignement et de la simulation chirurgicale. Depuis 2014, une start-up française propose des fantômes qui réagissent comme de vrais organes, reproduisant les caractéristiques biologiques et mécaniques des tissus. Cette société, Biomodex, développe des maquettes correspondant au corps du patient pour permettre au chirurgien de s'entraîner avant une opération délicate. (20)

L'utilisation de modèles 3D simulant la situation initiale avant traitement permet d'améliorer le niveau d'information fournie au patient, donc peut les aider à prendre leur décision sur le meilleur traitement à choisir. La communication entre les médecins en est également facilitée. (25)

Les prototypes sont obtenus par l'impression des modèles. Ils améliorent de manière significative le diagnostic de certaines maladies. Cela est rendu possible grâce à l'analyse des modifications anatomiques du patient dans le but de poser l'indication de traitement la plus adaptée.

#### **4.5.3.3. La création de matériel personnalisé**

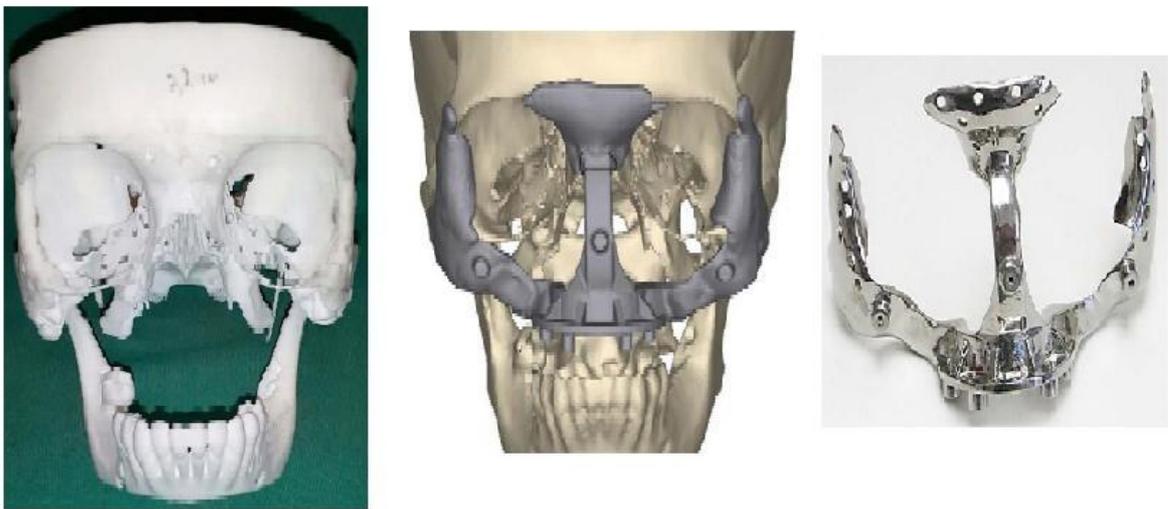
Ce matériel est dit patient-spécifique. Son utilisation pour la reconstruction de diverses structures oro-faciales a déjà été mis en œuvre dans des études scientifiques avec succès. (27–29)

- Les prothèses et implants non résorbable

La réalisation de prothèses sur-mesure, sur la base de l'image d'un scanner, est l'une des applications cliniques de l'impression 3D les plus répandues aujourd'hui. Dès 2011, une prothèse en titane de maxillaire a été implantée chez une femme de 83 ans ayant pour but d'étudier la reconstruction des tissus osseux. Depuis, de nombreuses autres prothèses ont été élaborées.

C'est notamment le cas de cette patiente qui, suite à la détection d'une tumeur atteignant le nerf trijumeau, a subi une maxillectomie, une rhinectomie (amputation du nez) et une résection de la lèvre supérieure. (30)

Dans ce cas, la fabrication d'un implant personnalisé en titane a permis la reconstruction du défaut étendu de l'étage moyen de la face.



*Figure 18 : Modèle anatomique objectivant la PDS liées à la résection tumorale ; conception en 3D de l'implant ; visualisation finale de l'implant. Il sera solidarisé aux zygomatiques à l'aide de 4 implants et sera recouvert par une épithèse faciale. (30)*

- Les implants résorbables (20)

Des sociétés ont développés des procédés de fabrication d'implants crâniens biocéramiques sur mesure permettant le remplacement des défauts osseux importants de la voûte crânienne garantissant la protection des structures anatomiques sous-jacentes.

En s'appuyant sur la stéréolithographie, l'entreprise 3D Ceram a développé un procédé exclusif de fabrication d'implants crâniens sur mesure en céramique hydroxyapatite. Le modèle numérique 3D du défaut osseux à reconstruire est obtenu à partir des données du scanner. Le chirurgien décide de la forme des zones poreuses pour favoriser l'intégration de la prothèse.

La prothèse est équipée de centaines de micro-trous en périphérie. En plus de leur faculté à se résorber lentement, permettant à l'os de se reconstituer progressivement, l'os est

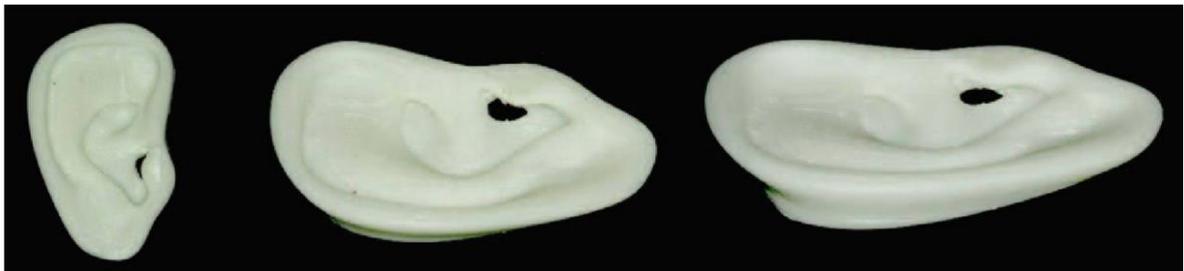
capable de coloniser l'implant grâce à ces porosités incluses dans la céramique. Cette société a ainsi participé au développement de la prothèse ostéo-conductrice.



*Figure 19 : Implants résorbables (20)*

- Les épithèses faciales

L'impression tridimensionnelle est majoritairement utilisée pour la reconstruction osseuse, mais elle peut aussi être bénéfique pour remplacer les tissus mous, par exemple lors d'une reconstruction de l'oreille par épithèse. (31)



*Figure 20 : Modèle d'une oreille reconstruite par effet symétrique avec l'oreille controlatérale (31)*

#### **4.5.3.4. Simulations préopératoires**

La chirurgie orthognathique guidée englobe la simulation informatique des ostéotomies et le contrôle de leur exécution chirurgicale. Cette chirurgie consiste à simuler le geste opératoire et à contrôler son exécution à l'aide de guides de coupe et de forage. Ceux-ci assurent une découpe osseuse précise. (32,33)

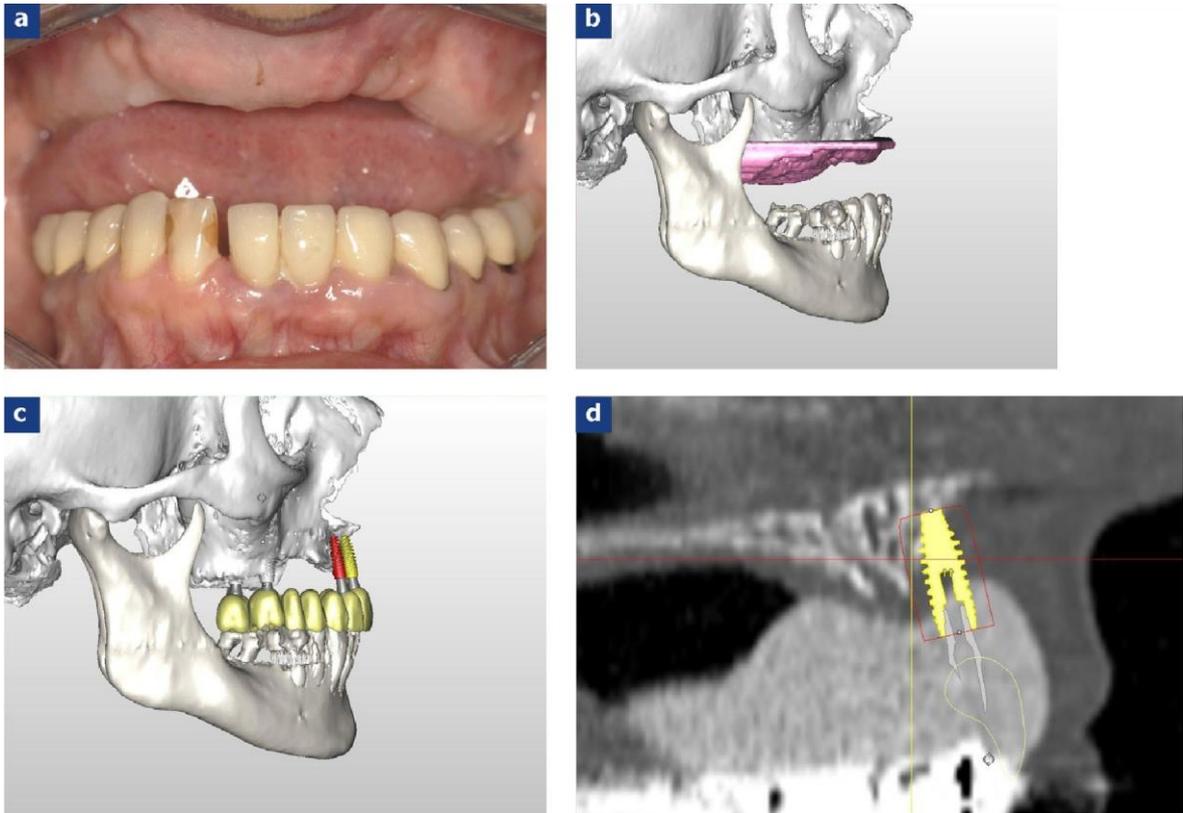


Figure 21 : Patiente présentant un édentement complet maxillaire associée à une atrophie formant un décalage des bases osseuses. (33)

*A : situation initiale*

*B : visualisation tridimensionnelle de l'atrophie maxillaire acquise*

*C et D : la simulation du bridge et des implants confirme la nécessité de déplacer le maxillaire supérieur (avancée, abaissement et bascule antérieure)*

Au même titre qu'en chirurgie orthognathique, la simulation et le contrôle de l'exécution chirurgicale des ostéotomies constituent la préoccupation principale des chirurgiens en cancérologie. *Nous reparlerons de cette spécificité dans le chapitre suivante.*

#### **4.5.3.5. Utilisation en repérage analogique per-opératoire**

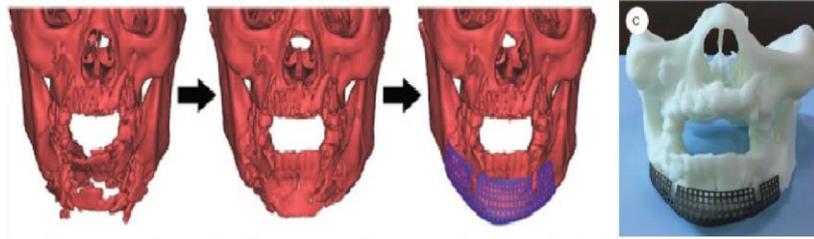
Il s'agit de l'utilisation la plus simple et la plus fréquente de l'impression 3D. Les modèles constituent une aide à la décision de la voie d'abord dans le cadre de la prise en charge d'une tumeur difficile d'accès, invasive ou disséminée. Ils peuvent être utilisés dans le cadre de la programmation d'une reconstruction sur un terrain complexe (postradique avec nécrose du fragment osseux...). On peut avoir recours à eux en implantologie conventionnelle (sinus lift) ou lors d'une pose d'implant pour stabiliser une épithèse d'oreille. (34)

#### **4.5.3.6. Les applications**

Nous allons à présent décrire quelques situations cliniques dans lesquelles la modélisation virtuelle et l'impression 3D ont joués un rôle déterminant dans la prise en charge des patients.

#### 4.5.3.6.1. Les traumatismes de la face

Dans le cas d'un patient présentant une fracture mandibulaire étendue d'un ramus à l'autre, la chirurgie virtuelle a permis aux chirurgiens de simuler une réduction préopératoire en manipulant virtuellement les fragments osseux broyés. (35)



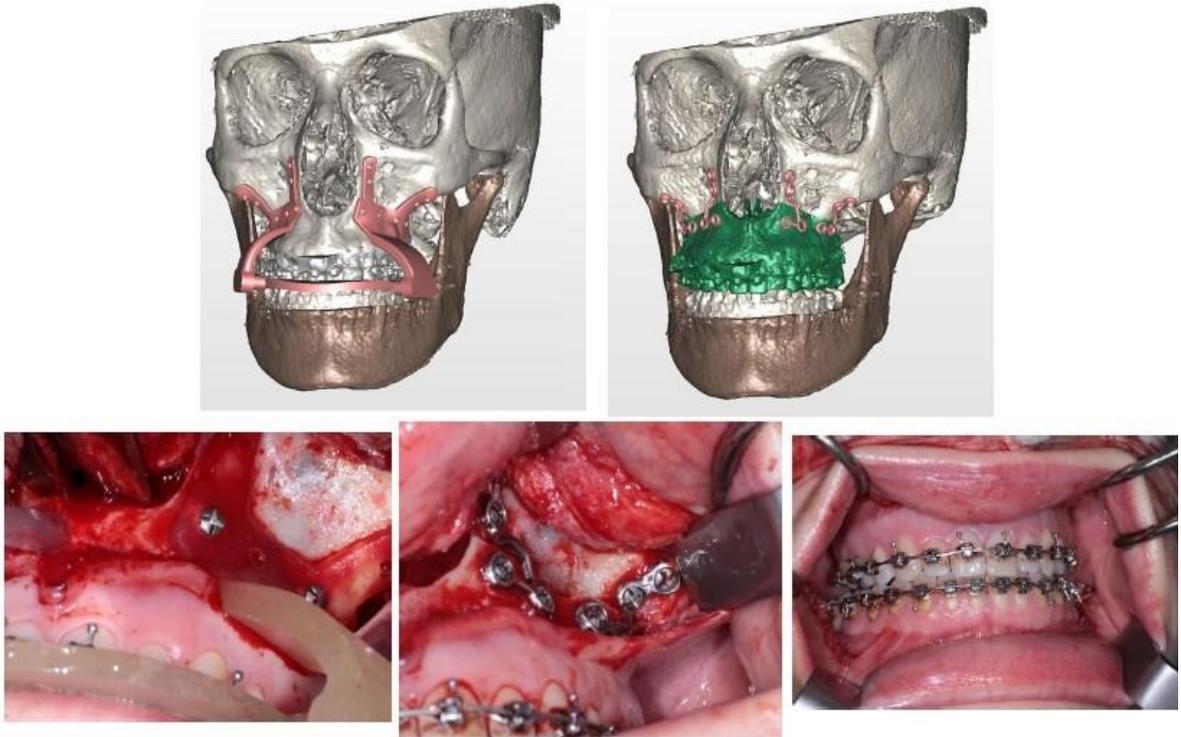
*Figure 22 : : Processus de réduction virtuelle et de conception du plateau constitué d'un maillage en titane, impression et positionnement sur le modèle chirurgical (35)*

#### 4.5.3.6.2. Les anomalies squelettiques de la face

L'ostéotomie de LeFort I a pour objectif de restaurer des rapports normaux entre les deux mâchoires.

D'après l'étude de Mazzoni, l'impression des dispositifs chirurgicaux personnalisés (guides de coupe et plaques de fixation en titane) pour le repositionnement du maxillaire supérieure est une méthode prometteuse pour la reproduction précise de l'anatomie osseuse et d'une occlusion satisfaisante sans utilisation d'attelle chirurgicales. (36)

Dans ce cas clinique, la création de fichiers stéréolithographiques a permis de concevoir et de fabriquer des mini-plaques en L de titane similaires à celles utilisées classiquement dans les ostéotomies de Le Fort I. Ces miniplaques assurent la stabilisation des pièces osseuses conformément à la planification exigée par le chirurgien. (37)



*Figure 23 : De gauche à droite et de haut en bas : Guide de forage et d'ostéotomie soutenu par l'arcade dentaire supérieure ; Plaques d'ostéosynthèse ; Guide supporté par la denture pendant l'opération ; Forage et ostéosynthèse ; Occlusion obtenue à la fin de la procédure (37)*

La distraction ostéogénique a été introduite en chirurgie buccale pour la correction des malformations faciales chez les enfants. Elle comprend maintenant un large éventail d'applications cliniques telles que l'expansion palatine, la correction des anomalies faciales congénitales, les fentes ... (38)

Le logiciel informatique indique le site de l'ostéotomie et calcule la distance de la distraction et la position du distracteur.



*Figure 24 : Simulation de la résection d'un améloblastome mandibulaire droit et reconstruction à l'aide d'une distraction segmentaire, planifiée en utilisant un modèle tridimensionnel. (38)*

#### 4.5.3.6.3. Les pathologies de l'articulation temporo-mandibulaire

L'ostéochondrome est une tumeur bénigne rare du condyle mandibulaire. Après la résection de la tumeur, la reconstruction consiste à modeler un greffon osseux pédiculé local attaché au muscle ptérygoïdien médial inséré dans la fosse glénoïde. Si la position et la hauteur du condyle reconstruit ne sont pas exacts, le patient peut souffrir en postopératoire des troubles articulaires ou occlusaux sévères. (39)

Le logiciel planifie l'ostéotomie et la position exacte de la greffe osseuse pédiculée.

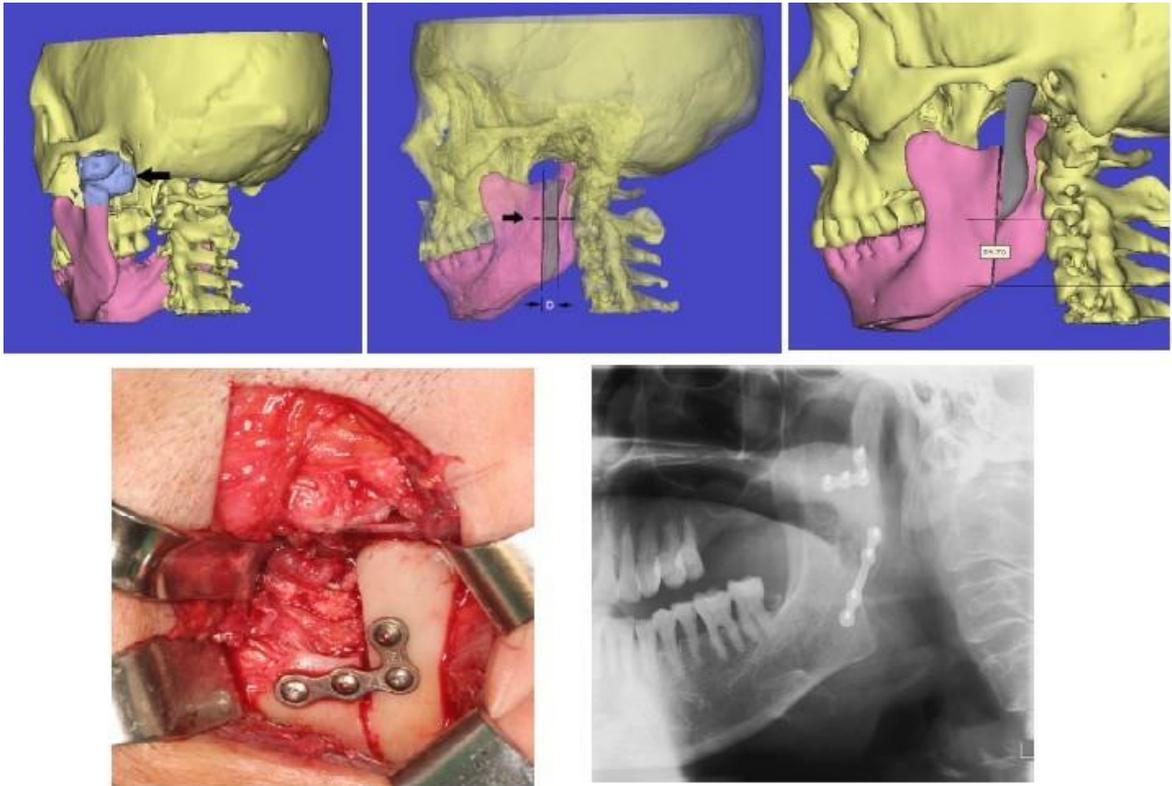


Figure 25 : De gauche à droite et de haut en bas :

*Modélisation du scanner d'une patiente atteinte d'un ostéochondrome du condyle mandibulaire gauche ;*

*Modèle tridimensionnel réalisé de manière semi-transparente afin de ne pas nuire aux structures profondes (canal mandibulaire et nerf alvéolaire inférieur) pendant l'ostéotomie verticale de la branche montante ;*

*La greffe osseuse est placée dans la fosse glénoïde ;*

*Technique opératoire ;*

*Panoramique de contrôle. (39)*

#### 4.5.3.6.4. La chirurgie esthétique de la face

L'utilisation de modèles de visages 3D pré et post-opératoire des patients adressés en chirurgie plastique permet d'améliorer le niveau d'information, l'aide à la décision des patients, la planification pré-opératoire, dans l'objectif d'avoir un meilleur résultat final. (40)



Figure 26 : Visages imprimés en 3D (20)

#### 4.5.4. Les applications en chirurgie dentaire

##### 4.5.4.1. La prothèse fixée

La stéréolithographie est déjà largement utilisée en prothèse fixée. Elle a pour but de fabriquer des modèles de travail, des maquettes d'armature de couronnes et de bridges. (41)

La fabrication additive permet une économie de matière et propose un produit fini plus abouti nécessitant moins de travaux de surfaçage et de polissage.

La société « Kreos dental » a créé une chaîne complète de fabrication numérique de prothèses dentaires.

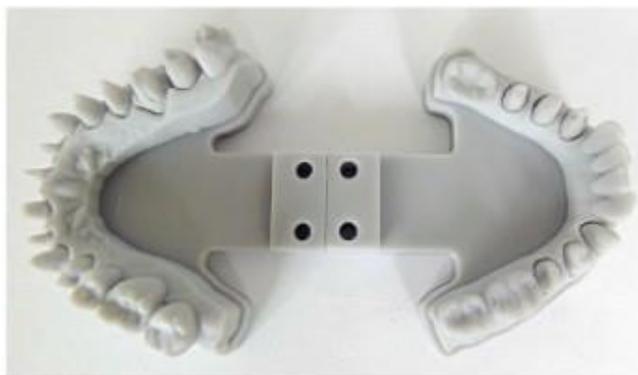
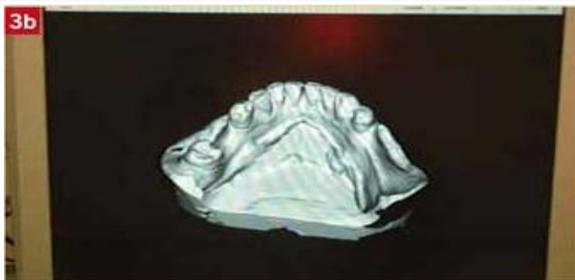
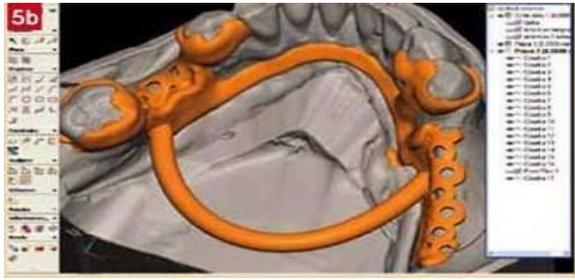


Figure 27 : modèle de travail stéréolithographique (41)

#### 4.5.4.2. La prothèse amovible

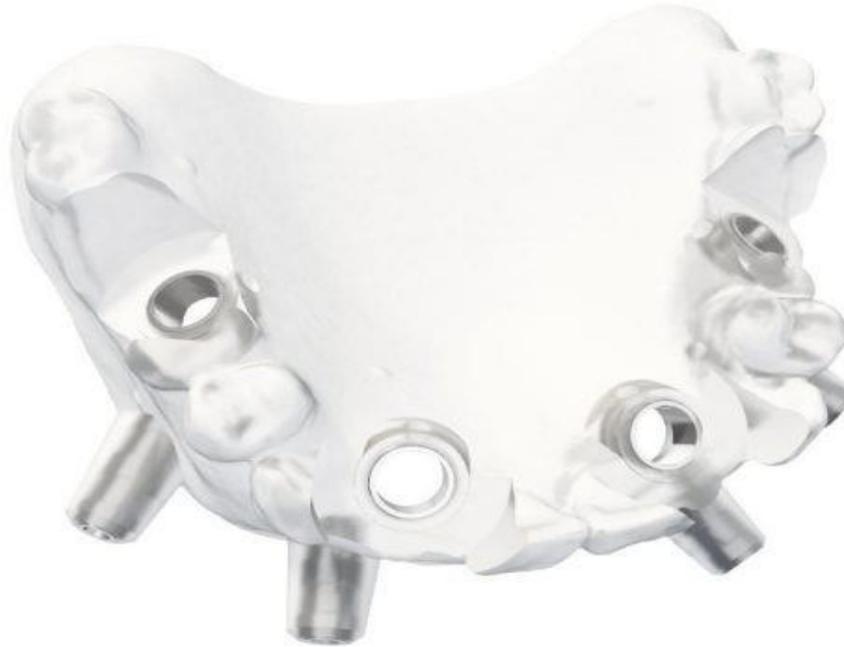
La fabrication des châssis métallique des stellites représente l'utilisation principale de l'impression 3D dans ce domaine. (42)

Tableau 5 : La CFAO appliquée à la prothèse amovible à châssis métallique

<b>Conception assistée par ordinateur</b>	
Numérisation du moulage des arcades dentaires par le scanner	 A 3D scan of a dental arch model, showing the teeth and surrounding tissue in a light blue color. The image is labeled '3b' in the top left corner.
Modélisation du châssis à l'écran sur le modèle de travail virtuel	 A 3D model of a metal framework (châssis) overlaid on a virtual dental arch model. The framework is shown in orange and blue. The image is labeled '5b' in the top left corner.
<b>Fabrication assistée par ordinateur</b>	
Réalisation de la maquette calcinable du châssis par une imprimante 3D	 A 3D printed metal framework (châssis) on a dental arch model. The framework is shown in blue and yellow. The image is labeled '6c' in the top left corner.

#### 4.5.4.3. La chirurgie implantaire

Le développement d'examens performants tel que le Cone Beam Computed Tomography (CBCT) a permis la visualisation précise de l'anatomie de la cavité orale du patient. Le logiciel dédié à la chirurgie guidée par CFAO le plus répandu est NobelGuide (laboratoire NobelBiocare). Les guides chirurgicaux sont conçus pour faciliter l'orientation et la réalisation des forages osseux, permettant un placement correct de l'implant. (43,44)



*Figure 28 : Le guide chirurgical personnalisé assure un forage et une insertion guidés de l'implant basés sur le plan de traitement établi (45)*

En résumé, l'impression 3D est donc utilisée en traumatologie, en orthopédie et en oncologie orale. Elle joue aussi un rôle important dans :

- La correction des anomalies congénitales, des dysmorphoses et des malformations de la face (prognathie, rétrognathie, bécance antérieure...);
- La chirurgie reconstructrice de la face par greffes osseuses et lambeaux ou au moyen d'épithèses (de type prothèse faciale ou prothèse maxillo-faciale).

Nous allons maintenant aborder le thème de l'impression 3D au service de la reconstruction mandibulaire.

## 5. Les reconstructions mandibulaires assistées par l'impression 3D

### 5.1. Préambule

La reconstruction des mâchoires par lambeau micro-anastomosé de fibula est devenue une procédure courante pour l'ensemble des équipes de chirurgie maxillo-faciale. Mais la conformation du lambeau à la perte de substance mandibulaire s'avère être un acte long et compliqué. La difficulté principale réside dans la reproduction d'une géométrie complexe et la restauration de multiples éléments manquants à partir d'un os rectiligne. De plus, toute imprécision dans le modelage de la fibula peut altérer le résultat morphologique de la réparation. Cela peut engendrer une projection symphysaire excessive, des rapports d'arcade défavorables et une malposition des condyles. Cette imprécision peut aussi entraîner une dysfonction mandibulaire et nuire à la réhabilitation prothétique. (46,47)

Lorsque la tumeur a détruit les tissus mous et durs de façon importante, l'utilisation de repères peropératoires n'est pas possible. Des procédés basés sur l'imagerie ont été proposés pour répondre à cette problématique. Ces techniques de CFAO permettent la planification de la reconstruction des mâchoires et le transfert de cette planification au bloc opératoire, au moyen d'outils physiques facilitant la chirurgie (47,48)

Les différentes étapes de l'intervention sont simulées sur les modèles tridimensionnels virtuels créés à partir de l'imagerie du patient. Ce type de chirurgie ne se base donc plus uniquement sur l'approximation manuelle peropératoire, qui peut faire partie intégrante de l'intervention notamment lors de l'exérèse et lors de l'adaptation du lambeau au site receveur. (26)

Les chirurgiens bénéficient de plaques d'ostéosynthèse et de guides de coupe surmesure, fabriqués par prototypage rapide. Ces derniers concernent autant les ostéotomies mandibulaires que celles du péroné. Ces outils améliorent les gestes techniques tel que la conformation et la fixation du lambeau, le maintien des moignons et les ostéosyntheses. (46)

Cette procédure est constituée d'une succession de phases dont le respect des modalités d'exécution de chacune est fondamental (33):

- La phase clinique et radiographique : bilan pré-thérapeutique
- La phase numérique : planification et CAO
- La phase industrielle : impression 3D
- La phase chirurgicale : l'opération proprement dite

*Le schéma suivant résume les étapes de la planification préopératoire tridimensionnelle.*

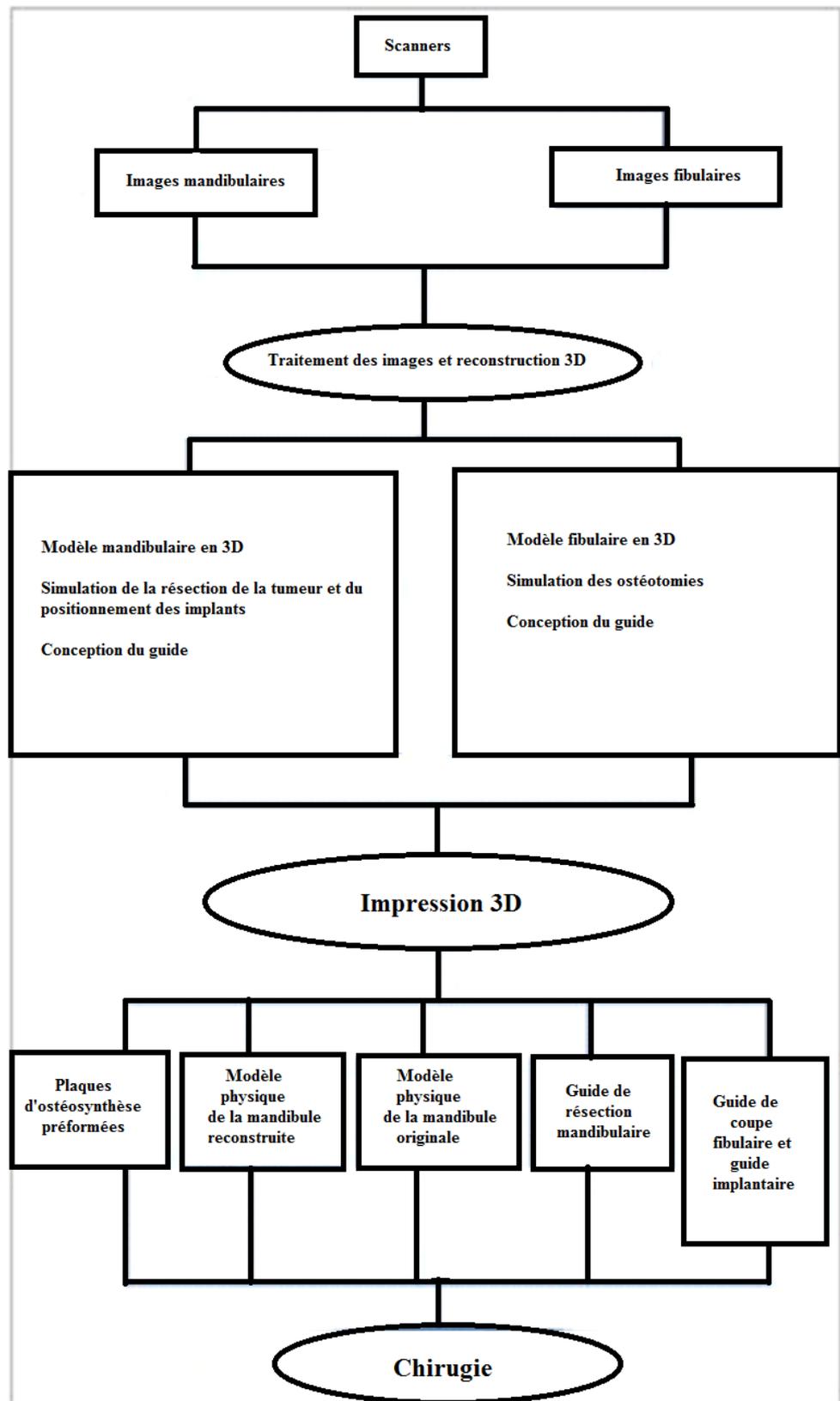


Figure 29 : Les étapes de la planification pré-opératoire (49)

## **5.2. La planification pré-opératoire**

### **5.2.1. Les logiciels**

Parmi les articles étudiés, la plupart des auteurs ont utilisés le logiciel Surgicase CMF®, créée par la société Materialize. (47,48,50,51)

Ce laboratoire de recherche développe, depuis 1990, le potentiel de l'impression 3D médicale, grâce à une gamme de solutions logicielles, d'ingénierie et de services d'impression 3D, qui forment ensemble le trépied de cette nouvelle industrie. Elle est ainsi devenue le précurseur des services en impression 3D et propose un panel de logiciels, spécifiques à chaque discipline chirurgicale.

Surgicase est un logiciel de traitement d'images, facile à utiliser, avec fonction de visualisation 3D pour planifier les opérations chirurgicales dans la région cranio-maxillofaciale. Les images des scanners peuvent être visualisées interactivement et segmentées pour donner un rendu 3D des objets anatomiques.

Ce logiciel a la capacité de manipuler dans les trois dimensions de l'espace les représentations du massif facial et effectuer les reconstructions virtuelles des parties manquantes ou anormales. Il peut aussi être utilisé pour simuler/évaluer le placement d'un implant et les options de traitement chirurgical implantaire. Une importante banque d'implants de multiples dimensions est disponible dans ce logiciel.

C'est donc un système qui permet aux cliniciens de rationaliser et de simplifier la planification et la commande de guides et d'implants spécifiques. Il extériorise les aspects techniques de l'impression 3D en les confiant aux spécialistes de Materialize.

### **5.2.2. Acquisition des données numériques**

Le fichier numérique est obtenu à partir d'un examen radiologique tridimensionnel. Les chirurgiens se servent principalement du scanner réalisé lors du bilan pré-opératoire, mais les images provenant d'IRM ou de cone beam peuvent également être exploitables. Il n'y a pas besoin d'examen irradiant supplémentaire.

En chirurgie maxillofaciale, la plupart des scanners sont réalisés en coupe millimétriques. Plus l'épaisseur des coupes est petite, plus les reconstructions volumiques seront précises et les structures osseuses et dentaires détaillées.

Pour le modèle fibulaire, des coupes millimétriques sont obtenues à partir de l'angioscanner des membres inférieurs.

Ces coupes de scanner sont regroupées au sein d'un fichier dont le format DICOM est le seul à permettre actuellement la diffusion d'images médicales

### 5.2.3. Segmentation

Le fichier de coupes est importé dans le logiciel Surgicase qui va tout d'abord réaliser la reconstruction virtuelle volumique et surfacique tridimensionnelle des structures anatomiques puis segmenter ces images.

La segmentation permet de définir et d'isoler la zone anatomique d'intérêt. Les chirurgiens obtiennent les modèles tridimensionnels correspondant à l'ensemble maxillofacial et à la fibula. La position du pédicule vasculaire par rapport à celle-ci est objectivée pour faciliter les manipulations du modèle.

Les zones d'intérêt sont individualisées et nettoyées des artefacts radiologiques.

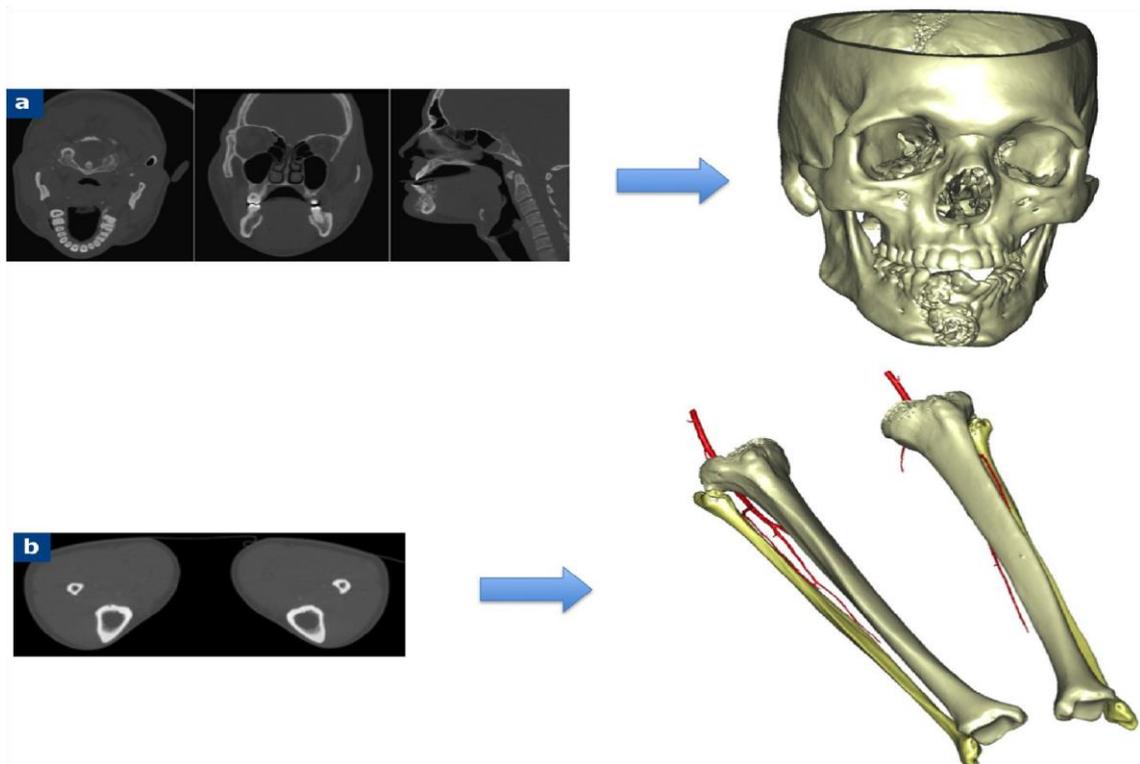
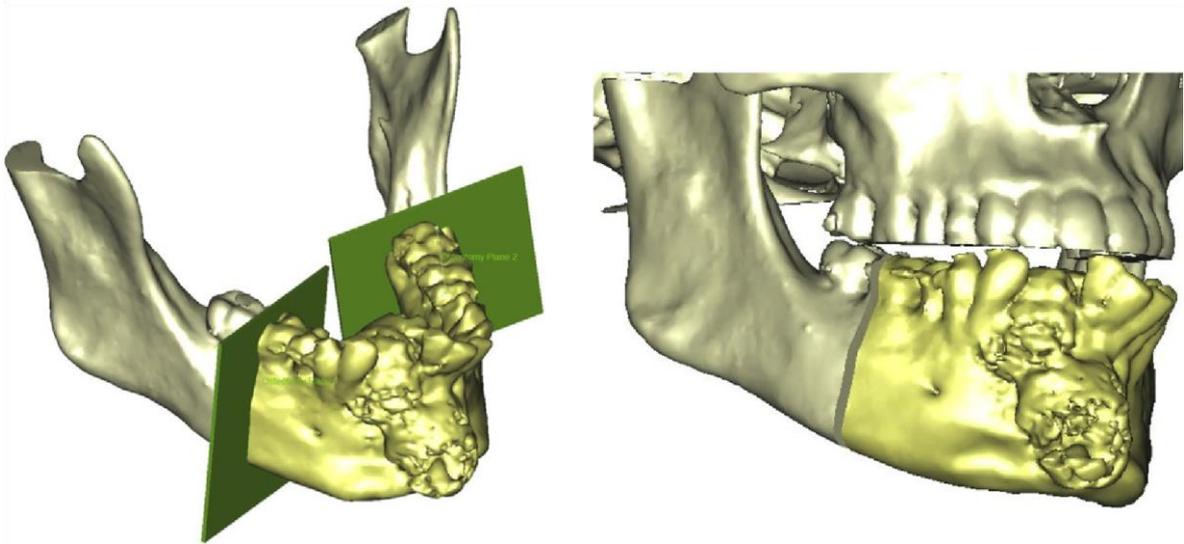


Figure 30 : Modèles tridimensionnels du massif craniofacial et de la fibula (les axes vasculaires sont matérialisés) (47)

### 5.2.4. Planification de la résection mandibulaire

Elle se fait en plusieurs étapes :

Grâce aux fonctions « rogner » et « ciseaux », le logiciel isole l'os mandibulaire du reste du squelette de la face. Cela permet de visualiser en 3D la lyse osseuse créée par la tumeur. Cette opération est appelée le contourage.



*Figure 31 : Planification de la résection (47)*

En tenant compte du bilan clinique et radiologique préopératoire, le segment mandibulaire à réséquer est déterminé. Des plans de coupe sont ainsi tracés afin de réaliser virtuellement la résection osseuse.

Ces plans de coupe dépendent de trois paramètres (34) :

- Une marge osseuse minimale est nécessaire en fonction de l'étendue de l'atteinte carcinologique. Il est recommandé de garder une marge de sécurité de 1 centimètre à chaque extrémité du lambeau, utile en cas d'évolutivité tumorale et donc d'exérèse mandibulaire supplémentaire ;
- Chaque segment fibulaire nécessaire à la reconstruction devra mesurer 2 centimètres sur sa plus petite longueur pour diminuer le risque d'insuffisance de vascularisation périostée ;
- L'adéquation entre les dimensions des segments fibulaires et la conformation tridimensionnelle de la mandibule devront permettre la meilleure congruence possible.

Les observations peropératoires concernant le nombre de fragments de fibula et le niveau des ostéotomies devront correspondre à cette planification pré-opératoire.

Le segment correspondant à la résection est ensuite séparé du reste de la mandibule. De cette manière, le logiciel a réalisé virtuellement la mandibulectomie interromptrice en respectant les limites de la tumeur.

*Cas particulier du mirroring :*

Il est utilisé en cas de reconstruction secondaire de la mandibule, la réparation n'ayant pas pu avoir lieu lors de la chirurgie. Cette technique permet de rétablir la symétrie

mandibulaire selon l'axe sagittal médian avant l'étape d'impression du modèle. Elle est particulièrement utile chez des patients présentant une amputation terminale de la mandibule, incluant le condyle.

À partir des données du scanner, les éléments restants de la mandibule sont segmentés. Ils sont ensuite repositionnés virtuellement par rotation autour du condyle, en vérifiant dans les trois plans de coupe le bon centrage du condyle dans la cavité glénoïde. Un plan sagittal de symétrie du massif facial est déterminé.

La portion manquante est reconstruite par réflexion de la mandibule restante selon ce plan de symétrie. La planification de la conformation fibulaire est faite de la même manière qu'en reconstruction primaire : la trajectoire de la conformation est alignée sur la reconstruction mandibulaire virtuelle obtenue à partir de l'image réfléchie.

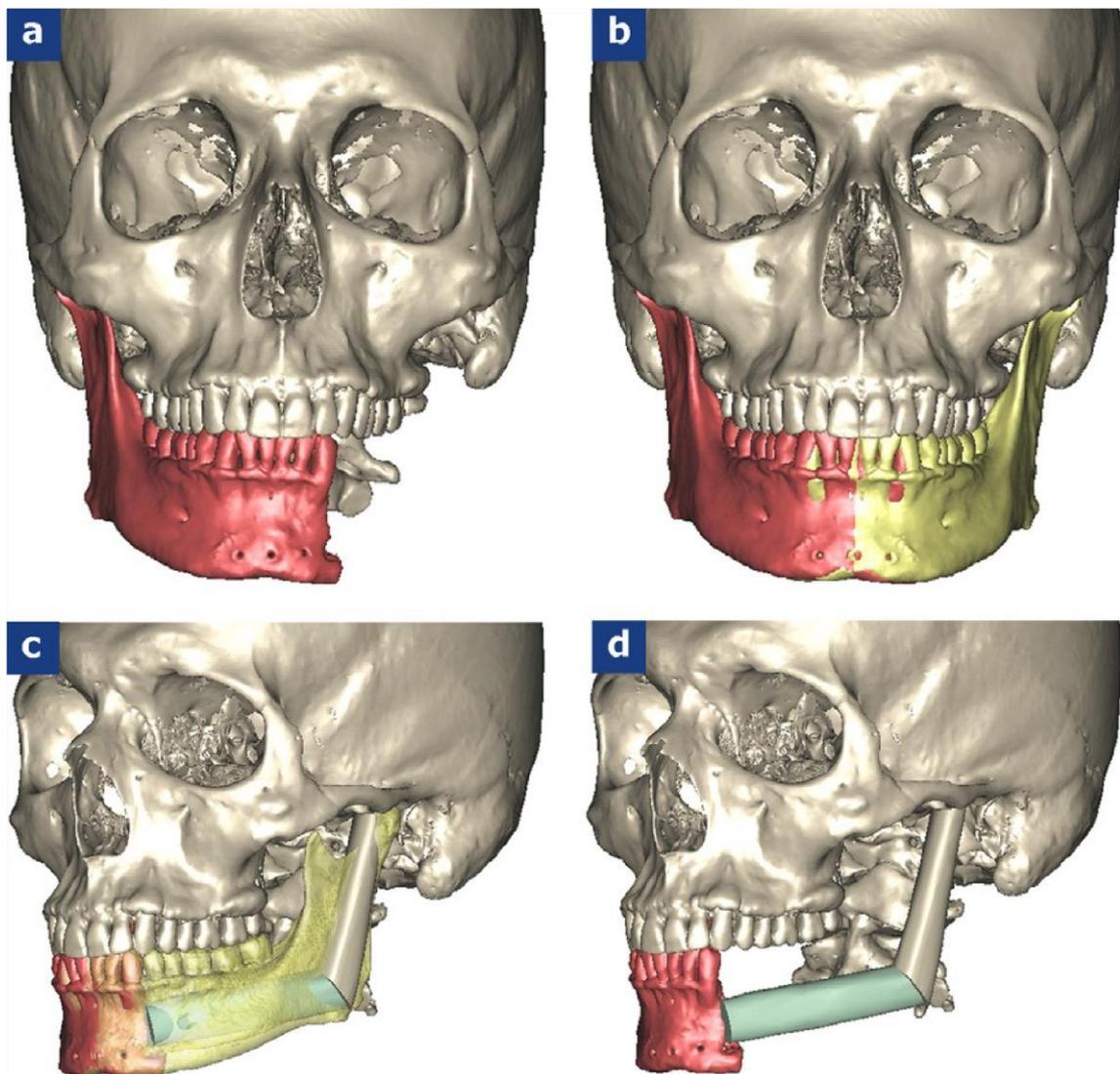


Figure 32 : Le mirroring (47)

A : situation initiale

B : modélisation de l'hémimandibule manquante par effet de symétrie

C et D : planification de la conformation fibulaire

## **5.2.5. Planification implantaire**

### **5.2.5.1. Rappel sur les intérêts de l'implantation primaire**

La pose d'implants dentaires et d'une prothèse implanto-portée représentent le but ultime de la reconstruction après résection interruptrice de la mandibule. Plusieurs types de prothèses implanto-portées sont envisageables :

- La prothèse amovible et notamment la Prothèse Amovible Complète Supra-Implantaire (PACSI) ;
- La prothèse fixée : bridge scellé sur des piliers implantaires ou prothèse transvissée (pilotis).

Le lambeau de fibula est le transplant micro-anastomosé le plus propice à la pose d'implants car il possède sa propre vascularisation, une résorption osseuse similaire à celle d'une mandibule saine, un bon volume mais surtout un os bicorticalisé offrant un ancrage de l'implant très satisfaisant.

Le moment de mise en place des implants est dépendant de la radiothérapie. L'implantation primaire, ou immédiate signifie que les implants sont mis lors de la reconstruction, directement dans le lambeau osseux. Cette méthode a été décrite par Urken en 1998 pour être une procédure sûre. L'ostéointégration des implants débute donc avant la radiothérapie, ils ne sont alors pas soumis aux risques de nécrose ou de rejet. (10,52)

La mise en charge des implants est sujette à débat. Certains auteurs attendent jusqu'à 6 mois avant la phase de réalisation prothétique. D'autres prônent une réhabilitation dentaire immédiate. Cette procédure nommée par Levine « jaw in a day » (« mâchoire en un jour ») est pratiquée principalement chez des patients présentant des tumeurs ayant un faible risque de récurrence. Cette technique exige une stabilité primaire des implants et une adaptation parfaite de la prothèse. Elle requiert une étroite collaboration entre l'équipe chirurgicale, le chirurgien-dentiste et le prothésiste. (53,54)

### **5.2.5.2. Avantages et limites**

L'implantation immédiate fournit un support prothétique satisfaisant et assure l'ancrage stable de la prothèse. Ainsi, elle permet une réhabilitation fonctionnelle et esthétique de la dentition. De plus, la diminution du nombre de procédures chirurgicales accélère le protocole classique de prise en charge implantaire.

L'ostéointégration est généralement suffisante avant que les effets de la radiothérapie post-opératoire ne deviennent délétères, perturbant la cicatrisation osseuse et compromettant le succès de l'implantation. Malgré le fait que le lambeau fibulaire ait une tolérance élevée, cela permet d'éviter les risques inhérents à la radiothérapie postopératoire. (11)

Pour les auteurs qui y sont favorables, la prothèse immédiate sert de contention, réduit la quantité de matériaux d'ostéosynthèse nécessaires et améliore la stabilité du greffon en limitant les micromouvements. De plus, elle sert de conformateur pour le lambeau, améliorant ainsi le positionnement des tissus mous. (53,55)

Cette prothèse favorise une réadaptation rapide des patients et une reprise rapide d'une vie socio-professionnelle. Elle améliore les capacités de mastication et donc le confort alimentaire du patient. (52)

Cependant, l'implantation immédiate peut générer des problèmes complexes :

- Plusieurs études ont montré de très bons taux d'ostéointégration des implants dentaires dans le lambeau de fibula. Pourtant, certains d'entre eux n'ont pas pu être exploités du fait d'un mauvais positionnement dans le greffon.
- Il est aussi nécessaire de préciser que l'implantation pendant la reconstruction chirurgicale augmente le temps opératoire de l'intervention et peut multiplier de surcroît le risque d'ischémie du greffon. (56)

C'est pour ces raisons que les chirurgiens se sont penchés sur une méthode de planification qui permettrait de poser les implants dans une position fonctionnelle dans le greffon fibulaire.

### **5.2.5.3. Les caractéristiques de la planification implantaire**

La prévisibilité de la conformation obtenue grâce aux guides de coupe permet de prévoir d'emblée la réhabilitation dentaire sur implants avec fiabilité. Si l'indication de réhabilitation concomitante est retenue, le projet prothétique devient le point de départ de la planification pré-opératoire. (47)

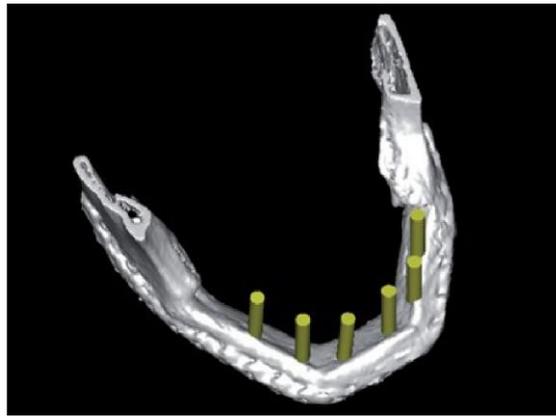
Il est possible d'intégrer un guide chirurgical implantaire aux guides d'ostéotomie fibulaire et donc d'associer directement un projet implantaire à la reconstruction.

On détermine la position exacte des implants dentaires sur le lambeau grâce à la modélisation 3D des mâchoires. Sur l'écran, ils sont placés là où la qualité radiologique de l'os est optimale, en ajustant avec précision leur axe, leur longueur et leur largeur. Ils sont aussi placés dans une position fonctionnelle par rapport à l'arcade dentaire antagoniste. Le guide a pour but de conduire la main de l'opérateur pour insérer les implants selon un axe idéal. (57)

En facilitant la mise en place des implants, la chirurgie guidée améliore la fiabilité et la précision des traitements implantaires. Dans le cadre d'une réhabilitation maxillofaciale, le but est d'avoir des implants dans une position et une angulation satisfaisante pour une mise en charge fonctionnelle finale. (58)

Cet acte nécessite une parfaite communication et coopération entre les différents acteurs de la reconstruction (chirurgien maxillo-facial, chirurgien-dentiste, prothésiste, ingénieurs de modélisation). (53)

La chirurgie guidée permet aussi de planifier et fabriquer une prothèse immédiate pouvant être placée en postopératoire



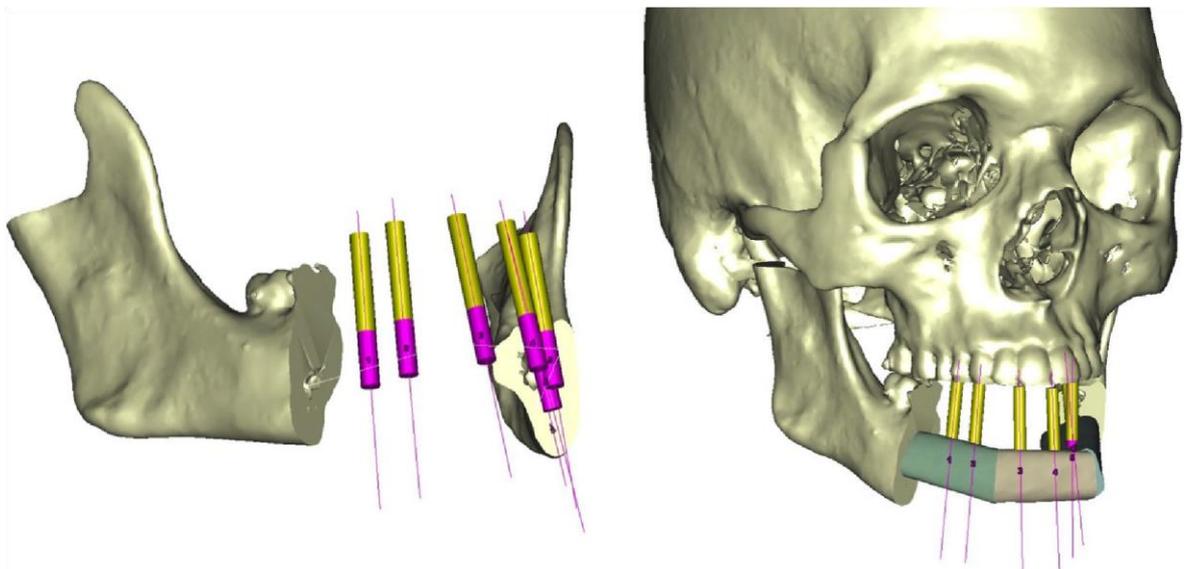
*Figure 33 : emplacement virtuel des implants en choisissant les positions les plus favorables en terme de qualité osseuse (58)*

#### **5.2.5.4. Positionnement virtuel des implants dentaires**

La planification des implants est simplifiée par la position de la mandibule en occlusion lors du scanner.

À partir de la bibliothèque d'implants présente dans le logiciel, il est possible de choisir le diamètre, la longueur et l'axe des implants conformément à la situation actuelle. Les implants virtuels sont positionnés « dans le vide » en lieu et place de la portion mandibulaire retirée. Ils sont implantés uniquement en fonction des repères occlusaux antagonistes. (47)

Cette configuration nécessite des piliers implantaires longs. La rigidité de la fibula et l'ancrage bicortical des implants pallient la répartition défavorable des contraintes mécaniques s'exerçant sur l'os greffé.

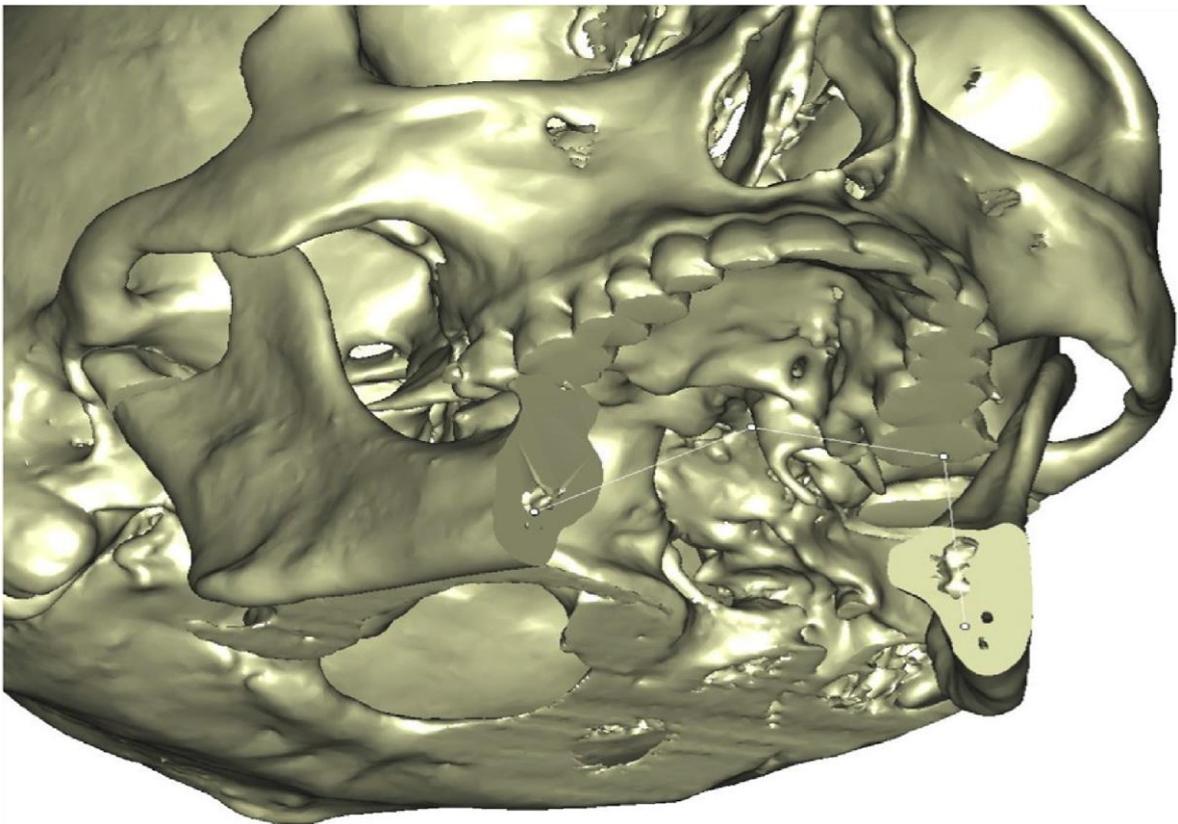


*Figure 34 : Planification du positionnement des implants et planification de la reconstruction à partir du positionnement des implants en fonction de l'arcade dentaire antagoniste (47)*

## 5.2.6. Conception du modèle de reconstruction et conformation de la fibula

→ Tracé et calcul de la trajectoire de reconstruction

Une trajectoire en ligne brisée est tracée pour figurer la conformation fibulaire souhaitée, d'une extrémité de la résection à l'autre. Le dessin de cette trajectoire peut s'appuyer sur les contours de la pièce osseuse réséquée qui peut être superposée à tout moment, en transparence, et qui est représentée sur les vues axiales, sagittales et frontales. Cela a pour objectif de reproduire les contours mandibulaires initiaux.



*Figure 35 : Tracé de la trajectoire de reconstruction (47)*

Le logiciel calcule automatiquement les angles de coupe et les résections cunéiformes à réaliser dans la fibula pour obtenir cette conformation.

Il détermine :

- La longueur totale d'os fibulaire nécessaire à la reconstruction ;
- Le nombre et la longueur de chaque fragment osseux nécessaire ;
- Le niveau et les angles d'ostéotomies fibulaires afin d'obtenir une congruence optimale entre les segments osseux.

Un modèle virtuel de reconstruction mandibulaire correspondant à la trajectoire indiquée est réalisé.

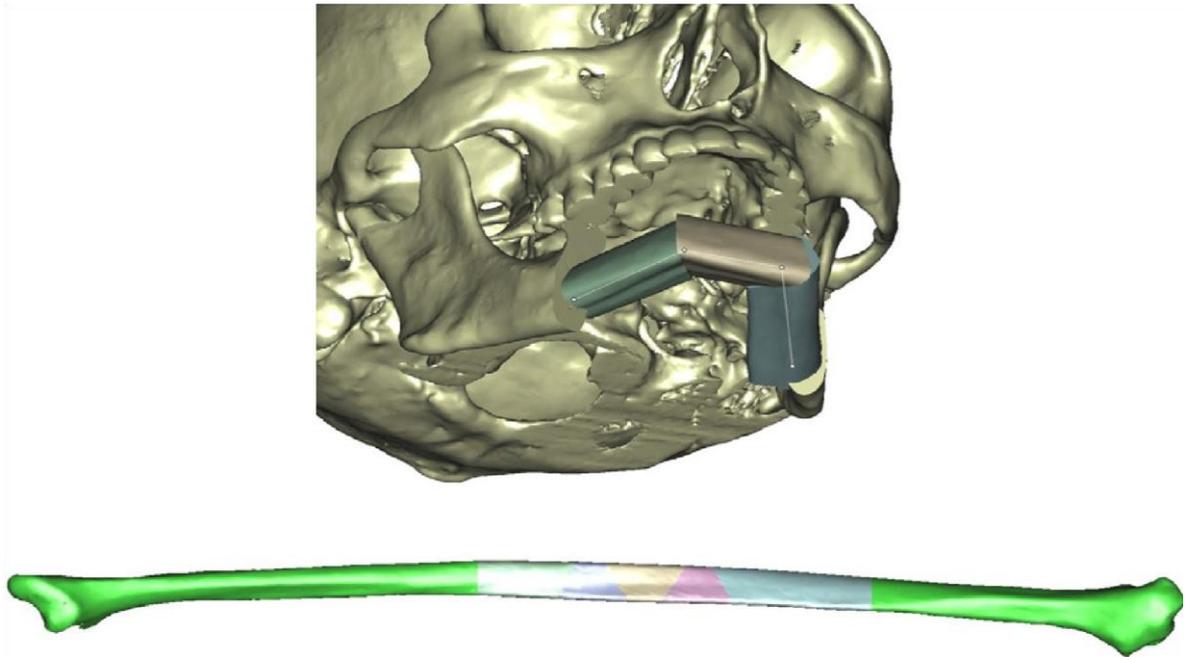


Figure 36 : Calcul de la reconstruction obtenue à partir de la trajectoire indiquée (47)

- Réalisation des ostéotomies sur le péroné, transfert du segment dans la région mandibulaire et ajustage aux contours de la perte de substance

Le modèle de reconstruction est ajusté en déplaçant les segments fibulaires en translation et en rotation autour de son axe central, ce qui permet de positionner correctement le pédicule vasculaire.

La trajectoire de la conformation fibulaire doit rejoindre les extrémités de la résection mandibulaire en passant par les implants. Ces ajustements de segments doivent assurer une bonne répartition du volume osseux autour des implants. Lors de cette étape, la planification implantaire peut être modifiée en fonction de la planification osseuse afin de faciliter leur placement et d'éviter la proximité immédiate des ostéotomies. Il faut respecter 3mm de distance au minimum entre les ostéotomies et les implants.

La position relative des segments fibulaires peut être modifiée afin d'ajuster la taille des résections cunéiformes, si l'on souhaite limiter au maximum la résection osseuse ou, au contraire, prévenir toute traction sur le périoste et/ou le pédicule en cas d'angulation importante entre les segments.

Chaque modification apportée à la modélisation de la conformation entraîne donc un nouveau calcul en temps réel des dimensions et des angles de coupe fibulaires.

- Transformation du format DICOM en fichier au format «.stl»

Ce format est directement exploitable par les logiciels de CAO. Il sera transféré, lu et interprété par l'imprimante. Issu de la technologie de stéréolithographie, il constitue le standard pour les échanges d'informations entre les programmes de conception et les équipements de fabrication additive. C'est donc le format final que le fichier doit avoir car il est le seul accepté actuellement par toutes les imprimantes 3D.

Le fichier DICOM est édité en fichier «.stl». Le logiciel de CAO permet la suppression des artefacts et la régularisation du maillage avant impression de la maquette mandibulaire.

### 5.3. L'impression 3D

Une téléconférence peut avoir lieu entre un ingénieur biomédical et l'équipe de chirurgie pour permettre d'échanger sur les modalités de fabrication des outils.

Le laboratoire OBL (Châtillon, France) se base sur les tracés de la modélisation et confectionne les guides de coupe adaptés à l'exérèse mandibulaire et à la conformation du lambeau. Ces guides sont ensuite fabriqués en polyamide par prototypage rapide avant d'être livrés à l'hôpital. Ils ne sont pas stérilisés.

Un modèle tridimensionnel de la mandibule reconstruite en polyamide et des plaques d'ostéosynthèse en titane sont également produits par le laboratoire.



Figure 37 : Guide de coupe fibulaire et modèle de la reconstruction (47)

#### ➔ Prémodelage des plaques d'ostéosynthèse

Les plaques d'ostéosynthèse sont directement conformées sur le modèle de la reconstruction mandibulaire. Ces plaques permettent la conformation et la fixation du lambeau à la mandibule restante. (21)

#### ➔ Stérilisation des outils chirurgicaux

Avant d'être utilisées au bloc opératoire, les pièces imprimées sont lavées aux ultrasons et stérilisées au Sterrad R (irradiation UV + plasma H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Elles sont ensuite identifiées et conservées sous sachet stérile. (59)

La stérilisation peut se faire de trois autres façons :

- À la vapeur d'eau (autoclave) à 134°C ;
- À l'oxyde d'éthylène
- Par une irradiation gamm

## **5.4. La technique chirurgicale**

### **5.4.1. Prélèvement du lambeau**

#### **5.4.1.1. Mise en place du guide**

La technique de prélèvement du lambeau reste la même que lors de la chirurgie classique. Aucune modification n'est nécessaire. Il faut sectionner les insertions musculaires au plus proche de l'os pour éviter l'interposition de tissus mous entre l'intrados du guide et la surface d'appui osseux correspondante.

Ce guide est à support osseux. Il prend appui sur la face antéro-latérale et sur la crête antérieure. Le pédicule reste à distance de la zone d'appui du guide. Le positionnement du guide est plus précis tant que la fibula est entière. Le guide est fixé et stabilisé par des vis placées dans des trous prévus à cet effet.

L'emplacement approximatif et décalé du guide sur la diaphyse par rapport à la planification n'a qu'une faible incidence sur le résultat final de la conformation, car le positionnement des résections cunéiformes et l'orientation des angles de coupe restent globalement identiques.

#### **5.4.1.2. Pose des implants au site de prélèvement selon le guide**

Les implants peuvent être posés dans l'os fibulaire de deux manières :

- par abord buccal en fin d'intervention quand la reconstruction osseuse est achevée
- directement au site de prélèvement en gardant le lambeau pédiculé

Si on choisit cette deuxième option, le premier temps de la conformation fibulaire débute donc par le forage osseux et le placement des implants dentaires.

Le forage osseux est facilité par la possibilité de stabiliser l'os en le maintenant par ses extrémités. Le premier forage est effectué à l'aide d'un foret pilote. Le forage à un diamètre plus large et le taraudage des implants sont effectués sous vision directe sans le guide de forage. Le chirurgien fore dans le sens du premier forêt. (57)

Ici, 9 implants ont été posés, répartis sur l'ensemble des segments fibulaires.



Figure 38 : Pose des implants dentaires avant de réaliser les ostéotomies et la conformation (47)

#### 5.4.1.3. Ostéotomies fibulaires et conformation du lambeau en arc mandibulaire

Les ostéotomies sont réalisées selon le guide avec une scie réciproque ou à l'ostéotome piézo-électrique à lame longue. Ce dernier instrument permet aux chirurgiens de s'appuyer sur les fentes du guide qui indiquent l'orientation du plan de section.

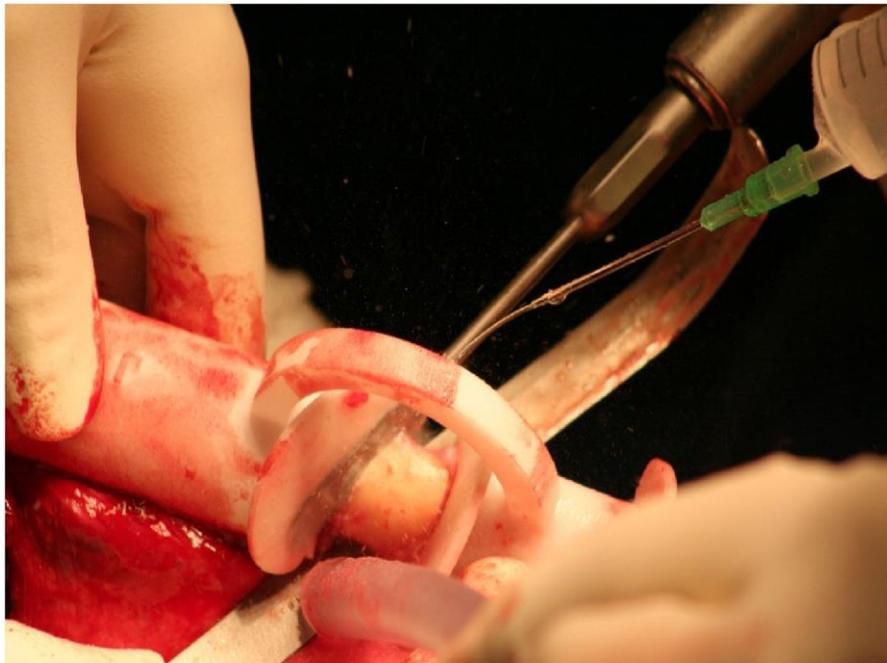


Figure 39 : Réalisation des ostéotomies selon le guide (47)

Les ostéotomies proximale et distale sont réalisées en premier. La protection du pédicule vasculaire est assurée par une lame malléable glissée dans le plan sous-périosté au ras de la berge du guide.

Les ostéotomies intermédiaires sont ensuite réalisées de la même manière et permettent d'effectuer les résections cunéiformes pour obtenir la concordance entre les deux moignons.

Une fois le guide déposé, la conformation est obtenue en affrontant les extrémités de chaque segment. Les plaques d'ostéosynthèse reliant les segments de fibula sont mises en place.

#### **5.4.2. Exérèse de la tumeur**

Parallèlement à la chirurgie pratiquée à la jambe, la seconde équipe maintient la continuité osseuse avant de réaliser la résection interruptrice mandibulaire. Elle est permise grâce à des procédés de stabilisation, tels que les broches de Kirschner, une plaque de pontage, le blocage maxillo-mandibulaire ou l'ostéosynthèse du ramus au corps du zygoma.

Ensuite, les guides de résection sont positionnés de part et d'autre de la tumeur et stabilisés par des vis de positionnement. De la même façon qu'à la fibula, les ostéotomies sont réalisées en suivant le plan de coupe matérialisé par les fentes du guide.

#### **5.4.3. Fixation du lambeau au site receveur**

Le lambeau conformé et autonomisé est positionné au site receveur en fonction des repères anatomiques, occlusaux et du modèle stéréolithographique de la reconstruction. Après fixation du lambeau de fibula par ostéosynthèse, Les vaisseaux sont anastomosés afin de positionner au mieux le pédicule vasculaire et d'éviter tout problème de longueur entre les vaisseaux donneurs et receveurs.

Le temps d'ischémie est donc réduit au temps de positionnement et d'ostéosynthèse de la reconstruction préformée, auquel s'ajoute la durée des anastomoses vasculaires.



*Figure 40: Ostéosynthèse de la fibula sur le moignon mandibulaire (57)*

#### **5.4.4. Le positionnement de la reconstruction**

La technique des guides de coupe permet de reproduire avec une précision satisfaisante la conformation fibulaire planifiée. En revanche, le positionnement de la reconstruction préformée au site receveur est moins fidèle et peut modifier la précision du résultat, indépendamment de la précision de la conformation.

Plusieurs solutions spécifiques existent pour assurer une bonne prévisibilité du positionnement. Nous insisterons dans ce paragraphe sur les deux principales aides au positionnement de la reconstruction.

#### **5.4.4.1. Les plaques d'ostéosynthèse prémodélées**

La conformation de la ou des plaques d'ostéosynthèse sur le modèle de la mandibule avant stérilisation permet de guider le positionnement de la reconstruction et de réduire la durée opératoire en simplifiant le temps d'ostéosynthèse.

La précision du positionnement des plaques elles-mêmes sur les segments mandibulaires et fibulaires reste toutefois dépendante de l'opérateur. La précision obtenue peut être suffisante en cas de reconstruction osseuse seule mais ne permet pas de garantir un positionnement optimal dans le cas d'implantation immédiate.

Ce procédé peut être contraint par la disponibilité restreinte du modèle entre la livraison et sa stérilisation, notamment dans les courts délais imposés en reconstruction primaire carcinologique.

#### **5.4.4.2. La fixation d'une prothèse provisoire immédiate**

La mise en fonction immédiate des implants avec prothèse en occlusion est probablement la meilleure garantie du bon positionnement de la reconstruction.

Le procédé prothétique composite hors bouche garantit le positionnement fonctionnel de la reconstruction. Le placement de la reconstruction osseuse est dépendant des rapports occlusaux imposés par le blocage maxillo-mandibulaire réalisé entre la prothèse solidarisée à la reconstruction et l'arcade antagoniste.

La planification est réalisée comme pour la reconstruction avec implantation immédiate. La prévision de la résection est reproduite sur les moulages dentaires et un montage prothétique provisoire est réalisé.

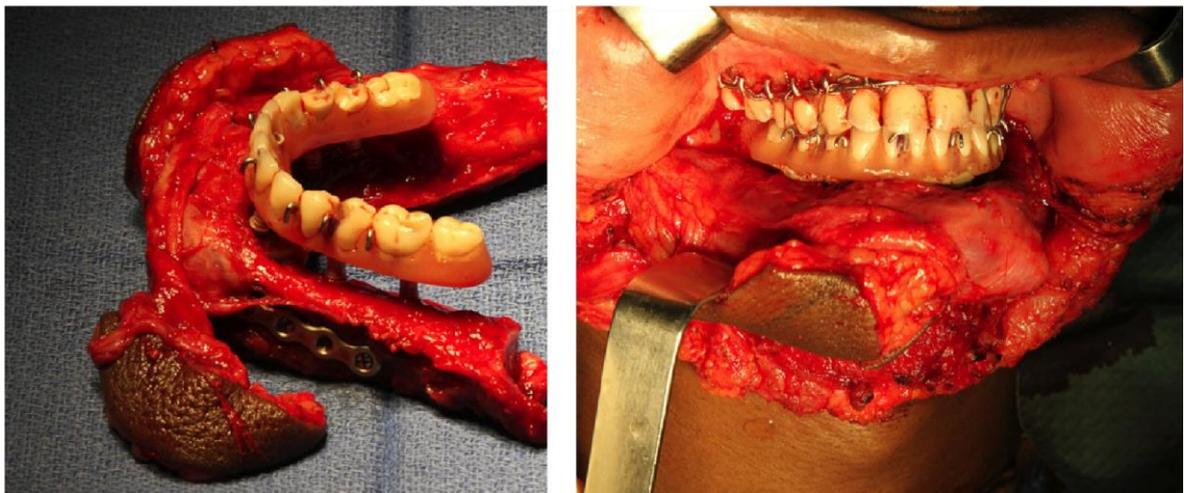
Le modèle de reconstruction sur lequel figurent les émergences implantaires, est transmis au laboratoire de prothèse qui adapte le montage prothétique à la reconstruction. De larges puits sont forés dans la prothèse en regard des émergences implantaires.



*Figure 41 : Adaptation du montage prothétique au modèle. Le bridge peut être déposé (par dévissage) pour ménager le passage des tissus mous. (47)*

Lors de l'intervention, les piliers prothétiques sont trançonnés sur les implants et la prothèse est solidarisée aux piliers par de la résine autopolymérisable stérile.

L'illustration suivante montre une prothèse complète facilement positionnée au site receveur par un blocage maxillo-mandibulaire (ici des arcs de dautrey). On réalise ensuite les anastomoses, puis l'ostéosynthèse selon le même principe qu'en chirurgie orthognathique ou traumatologique.



*Figure 42 : Solidarisation de la prothèse aux piliers prothétiques et positionnement de la reconstruction composite par un blocage maxillo-mandibulaire avant de réaliser les anastomoses et l'ostéosynthèse (47)*



*Figure 43 : Résultats exo et endobuccal à un an (la prothèse définitive a remplacé en bouche la prothèse provisoire immédiate) (47)*

## **6. Analyse d'études**

### **6.1. Les bénéfices de l'impression 3D**

#### **6.1.1. L'économie du temps opératoire**

La réduction du temps opératoire est un objectif concret et commun à toutes les spécialités chirurgicales. Elle permet de diminuer le taux de complications liées à l'anesthésie générale, et joue un rôle dans le contrôle des dépenses de santé par la diminution du temps d'occupation des salles opératoires.

Par comparaison à la chirurgie conventionnelle, les gains de temps obtenus sont variables en fonction des études : de 35 minutes pour Culié quel que soit le type de pertes de substance mandibulaire (antérieure, latérale ou terminale), 102 minutes pour Hanasono, à presque 2h pour l'équipe de Liu (46,60,61)

Cette économie de temps opératoire permet de réduire non seulement la fatigue des chirurgiens mais aussi les erreurs commises au bloc et les complications (infections du site chirurgical et pertes sanguines) qui sont normalement associées à un temps chirurgical accru. (62)

Selon Saad, l'économie du temps dans la salle d'opération devrait également participer à la baisse du coût global de ce type de chirurgie. (63)

#### **6.1.2. L'ischémie du lambeau**

Seruya a mis en évidence sur une série de dix reconstructions mandibulaires assistées par ordinateur une diminution significative de la durée d'ischémie du lambeau passant de 170 minutes à 120 minutes. (64)

Pour Culié, la durée d'ischémie moyenne du lambeau est réduite de moitié pour le groupe qui a bénéficié de la planification préopératoire. Ce gain semble d'autant plus important que la reconstruction est complexe. En effet, la différence de temps est particulièrement significative pour les pertes de substances comprenant la symphyse mandibulaire réputées plus difficile à réparer. (46)

Cette réduction du temps d'ischémie du lambeau s'explique par deux éléments :

- L'utilisation des outils sur-mesure accélèrent le geste chirurgical
- La conformation est effectuée intégralement au site donneur alors que le lambeau est encore perfusé

Le temps d'ischémie étant un facteur pronostic majeur pour la survie du lambeau libre. La modélisation et l'impression participent, en ce sens à l'amélioration du taux de succès des lambeaux libres. Cela impacte favorablement les suites opératoires.

Par exemple, l'étude menée par Anthony a montré un taux de survie du lambeau de 100%. Pour Albert, la vitalité du lambeau est excellente chez les patients auxquels une surveillance post-opératoire a été effectuée. (65,66)

En revanche, Culié n'a pas mis en évidence de conséquences positives de la modélisation sur les suites opératoires suivantes : la durée avant retrait de la trachéotomie, la durée de l'alimentation entérale et la durée totale de l'hospitalisation. (46)

### 6.1.3. Le coût de l'ensemble du procédé

Le coût de la planification et de l'impression est non négligeable. Toutefois, la démocratisation des techniques de prototypage permettra rapidement une baisse des prix. (26)

Ces coûts peuvent être répartis en plusieurs catégories (34) :

- Les coûts de l'imprimante, son entretien et les consommables. La fiabilité des imprimantes actuelles rend rare les échecs d'impression mais ceux-ci restent à prendre en compte à minima ;
- Le coût des logiciels et des formations ;
- Le coût du temps de conception des modèles et des aides opératoires.

Il n'est pas pertinent de prendre en compte le coût des examens complémentaires car ces imageries font partie de la démarche diagnostique standard et ne sont jamais demandées spécifiquement dans un but de modélisation.

### 6.1.4. La précision de l'impression 3D

De nombreuses études ont tentés d'évaluer la précision de la conception assistée par ordinateur pour les reconstructions mandibulaires.

→ Étude d'Albert et al. (65)

Objectif de la recherche : comparaison entre la pièce tumorale réséquée et le modèle physique de reconstruction.

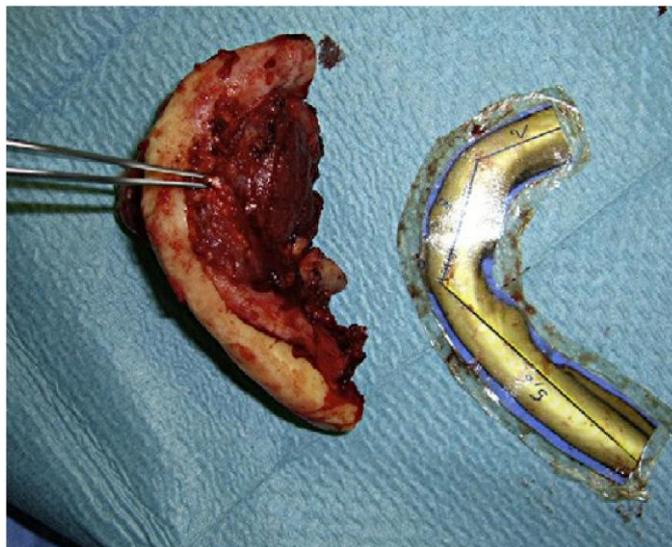


Figure 44 : Comparaison entre la pièce opératoire d'exérèse et le modèle préopératoire (65)

Résultats : lors de l'intervention, il n'a pas été constaté de différence entre le fragment d'os mandibulaire réséqué et le modèle préopératoire. Celui-ci a donc permis la prévision du nombre de fragments et du niveau des ostéotomies fibulaires. L'exérèse osseuse et la prévision préopératoire sont identiques, selon Albert, dans 70% des cas.

Toutefois, l'exérèse peut être plus importante que celle prévue lors de la planification. Ceci s'explique par des impératifs carcinologiques ou des contraintes locales (notamment dentaires). Comme on a pu le voir, la mise en place du lambeau ne pose cependant pas de problèmes car une marge osseuse de sécurité de 1cm est préservée dans la partie proximale et distale de l'os fibulaire. Les réajustements sont minimes et les marges de sécurité recommandées sont considérées comme largement suffisantes.

#### → Étude de Roser (48)

Il a évalué l'exactitude de la reconstruction par superposition des résultats chirurgicaux à la planification virtuelle préopératoire.

Il en a dégagé quelques constatations.

- Ostéotomies mandibulaires

Les marges sont généralement positives pendant la résection mandibulaire. Toutefois, la progression tumorale n'étant pas rare, le chirurgien peut souhaiter avoir un guide de coupe supplémentaire, en cas de nécessité de résection plus large, pour avoir des marges de résection saines.

- Ostéotomies fibulaire

Si les angles de l'ostéotomie sont trop aigus, des anomalies entre la reconstruction prévue et celle réalisée peuvent se produire. Il faut veiller à maintenir une adéquation dans la taille et dans l'angulation de chaque segment.

- Plaques d'ostéosynthèse

Bien que la position de la plaque ne soit pas exclusivement à l'origine du succès de la reconstruction osseuse, cela doit être un reflet de la position de l'os prélevé. La précision de flexion de la plaque de reconstruction est un facteur qui aura une influence notable sur son contact avec le péroné et la mandibule native.

### **6.1.5. La réhabilitation dentaire immédiate**

L'étude menée par Avraham et son équipe sur 52 patients a montré que la moitié ont obtenu une dentition fonctionnelle. Parmi eux, 14 patients ont eu un implant au cours de la reconstruction et 5 patients ont eu une réhabilitation prothétique immédiate supra-implantaire. En utilisant cette technique, les auteurs ont atteint des taux sans précédent de réadaptation dentaire entraînant la réduction du temps opératoire et l'élimination d'une seconde opération chirurgicale pour la pose d'implants. (67)

Avraham a aussi étudié l'intérêt des ostéotomies à double barre pour augmenter la quantité osseuse au site receveur. Le segment osseux à double barre permet de reconstruire une plus grande hauteur d'os. Parmi les 54 reconstructions micro-anastomosées de l'étude, 16 lambeaux ont été façonnés avec un segment à double barre. Ce procédé de réparation particulier vise à optimiser l'ostéointégration des implants et les résultats esthétiques.

L'auteur a constaté que le placement immédiat des implants dentaires dans le lambeau de fibula n'augmentait pas le taux de complications. Les cinq patients ayant reçu immédiatement un implant ont par la suite été irradiés par radiothérapie. Un seul patient a eu une complication au site receveur, il s'agissait d'une ostéoradionécrose par exposition du matériel d'ostéosynthèse.

## **6.2. Réglementation**

L'impression 3D est de plus en plus utilisée dans les établissements de santé dans le but de fabriquer des dispositifs médicaux (DM). Ils ont pour but de diagnostiquer, de prévenir ou de traiter une pathologie chez un patient.

Les prototypes et les modèles anatomiques ne sont pas des DM et aucune loi spécifique ne s'applique à eux. Les guides de coupe et les plaques d'ostéosynthèse sont considérés comme des DM.

La fabrication et la mise sur le marché des DM sont réglementées. Pour devenir fabricant de DM en France, un établissement de santé doit respecter un cahier des charges précis et les exigences de la directive 93/42/CEE. Les DM sur-mesure réalisés par impression 3D doivent de plus respecter l'annexe VIII de cette directive. (68)

Ceci nécessite :

- La rédaction d'une déclaration de conformité ;
- Le respect des exigences essentielles (règles permettant de prouver qu'un dispositif est conforme à ce que l'on attend et qu'il n'est pas dangereux pour le patient) ;
- La qualification des procédés ;
- Le contrôle de la biocompatibilité des matériaux.

## **6.3. Synthèse**

### **6.3.1. Avantages**

#### **6.3.1.1. L'impression 3D**

C'est une technologie fiable et économique selon Ernoult. Elle peut être utilisée pour tous les étages du massif facial et pour toutes les pertes de substances mandibulaires. Elle permet la restitution quasi ad-integrum des structures réséquées par la chirurgie. (69)

Lorsque la technique est réalisée à l'hôpital, le temps d'impression varie selon les critères de qualité souhaités (de quelques heures à 24h). Cette étape est souvent réalisée pendant la nuit ce qui n'occasionne pas de délais d'attente et permet même son utilisation dans un contexte d'« urgence différée ».

#### **6.3.1.2. La planification chirurgicale**

Elle semble avoir un impact positif sur la reconstruction des grands défauts mandibulaires par l'apport d'une précision difficile à obtenir par le placement manuel de la greffe, même entre les mains de chirurgiens expérimentés. Cela a permis d'éliminer le besoin de mesures intraopératoires et a permis d'avoir des segments fibulaires avec une excellente apposition et une réplique fidèle de la planification. Anthony considère que c'est une excellente alternative à l'ostéotomie à main levée conventionnelle et que l'investissement supplémentaire est compensé par l'efficacité opératoire. (48,66)

La communication améliorée entre les deux équipes de chirurgiens est l'un des avantages les plus importants apportés par cette technique. Grâce à la conférence web préopératoire, l'emplacement et la taille du défaut sont coordonnés avec les exigences osseuses de la reconstruction. La synergie entre les deux équipes chirurgicales permet une stratégie chirurgicale synchronisée avec une amélioration de l'efficacité opératoire.

#### **6.3.1.3. Le modèle 3D**

Il offre une vision de la structure osseuse et limite au maximum, lors de l'intervention, le risque de léser les régions périphériques à la zone opérée.

L'impression des biomodèles a amélioré l'exactitude des informations cliniques nécessaires à la planification préopératoire, créant une meilleure approche de l'opération.

Cela a valorisé la compréhension des relations spatiales et structurelles. (20)

La présence d'une imprimante 3D au sein du service ORL permet de maîtriser les délais d'obtention de ces modèles 3D ainsi que l'ensemble du processus aboutissant à leur création.

La chirurgie guidée permet la restauration optimale de la symétrie faciale et des fonctions du patient, en assurant une efficacité augmentée lors des chirurgies complexes du massif facial. La minimisation du temps opératoire passe par le gain de temps et de confort pour le chirurgien pendant la phase opératoire. Cela justifie le temps passé avant l'intervention.

#### **6.3.1.4. Les aides chirurgicales numérisées**

Les guides de coupe diminuent l'invasion chirurgicale tout en augmentant la précision de l'intervention. (69)

Ces guides permettent de concevoir des ostéotomies plus complexes en tenon-mortaise ou en marche d'escalier pour améliorer la congruence des segments osseux entre eux. (59)

D'après Schepers, ils améliorent les procédures chirurgicales, amènent un confort pour l'opérateur par la disponibilité d'une meilleure vue de l'anatomie fibulaire. (57)

La prise en compte des structures nobles, comme les structures nerveuses et les organes dentaires est réfléchi dès la planification. En suivant les guides, le chirurgien diminue le risque de léser ces structures.

De cette précision découle les résultats esthétiques de la reconstruction. Les reliefs osseux sont respectés (projection du menton et du front, des angles mandibulaires, respect de la convexité des pommettes...).

### **6.3.2. Inconvénients**

La planification ne concerne aujourd'hui que les tissus durs et laisse de côté la gestion des tissus mous. Le chirurgien devra prendre en compte la position de la palette cutanée concernant le lambeau libre composite en fonction de la PDS non osseuse. (26)

Un intervalle de 15 à 21 jours peut être nécessaire entre l'envoi des données au laboratoire et l'obtention du matériel à stériliser. Il n'est pas raisonnable de retarder la date de l'intervention chirurgicale pour permettre l'utilisation de la modélisation et il faut donc une coordination entre l'équipe chirurgicale et le laboratoire qui produit le matériel. Dans cet intervalle, la tumeur est susceptible de progresser et donc de remettre en cause les emplacements des ostéotomies mandibulaires définis à priori. Pour pallier à cela, la conformation du lambeau n'est débutée qu'après un bilan minutieux de la tumeur sur le site d'exérèse, cela permet d'adapter le geste en peropératoire en cas de progression tumorale.

Le coût non négligeable de la technique reste un frein à son utilisation : environ 2500 à 3000€ sont nécessaires pour la conception et la réalisation de l'ensemble des guides de coupe et des plaques d'ostéosynthèse. Il n'y a actuellement aucune prise en charge par la sécurité sociale de cette technique dont le coût reste à la charge des établissements de santé. (46)

## 7. Conclusion

Le développement de la CFAO appliquée à la chirurgie maxillo-faciale permet aux patients de bénéficier de solutions innovantes et personnalisées et aux chirurgiens de se diriger vers une médecine de précision. Cette avancée s'intègre dans le cadre d'une prise en charge multidisciplinaire globale et individualisée du patient.

Cela constitue l'un des piliers essentiels de la stratégie thérapeutique moderne des patients atteints de cancers de la cavité orale.

La fiabilité de cette nouvelle technologie est conditionnée par le respect du protocole tout au long de la procédure depuis les acquisitions scanner jusqu'à l'exécution des ostéotomies et la conformation du lambeau. La prévisibilité des résultats, c'est-à-dire la précision de positionnement du greffon représente l'intérêt principal de ce nouveau type de chirurgie assistée par ordinateur. La diminution de la durée de l'intervention et de l'hospitalisation, l'amélioration des suites opératoires et du confort du chirurgien contribuent à développer ce procédé.

La planification virtuelle et la modélisation pourraient donc devenir la méthode de référence pour les reconstructions mandibulaires. La maîtrise de ces processus permettra à l'avenir d'appliquer des prises en charge standardisées et reproductibles à chaque patient atteint d'une pathologie orale dont la prise en charge reste complexe.

Toutefois, les avantages de cette technique à long terme sur les résultats fonctionnels et esthétiques restent à évaluer. Des études permettront d'analyser son intérêt réel sur le plan médical et économique, surtout depuis qu'elle est directement pratiquée à l'hôpital.

## Références bibliographiques

1. Vigarios E, Pradines M, Fusaro S, Toulouse E, Pomar P. Réhabilitation prothétique des pertes de substance mandibulaires d'origine carcinologique. EMC - Stomatol 22-066-B-51 2007. 22 déc 2016;
2. Kolb F, Julieron M. Chirurgie réparatrice en cancérologie ORL : principales méthodes et indications. Cancer/Radiothérapie. févr 2005;9(1):16-30.
3. Paoli J-R, Lopez R, Jalbert F, Boutault F. Reconstruction chirurgicale des pertes de substances mandibulaires acquises. EMC - Médecine Buccale. 2016;[28-510-V-10].
4. Bozec A, Céruse P. La chirurgie oncologique cervicofaciale aujourd'hui et demain. Oncologie. mai 2015;17(5-6):220-4.
5. Bozec A, Mahdyoun P, Poissonnet G, Dassonville O. Chirurgie reconstructive cervicofaciale par lambeaux libres. EMC - Tech Chir - Tête Cou [Internet]. 2008 [cité 23 juin 2017];[46-555]. Disponible sur: <http://www.em-premium.com.doc-distant.univ-lille2.fr/article/195776/resultatrecherche/2>
6. Association dentaire française. Commission des dispositifs médicaux. Le chirurgien-dentiste face au cancer: du diagnostic précoce du cancer buccal à la prise en charge du patient cancéreux. Paris: Association dentaire Française; 2008.
7. ANDY GUMP The Mel Birnkrant Collection [Internet]. [cité 16 juill 2017]. Disponible sur: <http://melbirnkrant.com/collection/page18.html>
8. Jégoux F, Breton AL, Henry J-S. Chirurgie des cancers de la cavité buccale : exérèse et réparation. EMC - Tech Chir - Tête Cou [Internet]. 2015 [cité 1 juill 2017];[63046]. Disponible sur: <http://www.em-premium.com.doc-distant.univ-lille2.fr/article/964962/resultatrecherche/7>
9. Braga-Silva J, Jaeger MRO, Favalli PPS. Reconstruction mandibulaire : les lambeaux microchirurgicaux de crête iliaque et péroné. Ann Chir Plast Esthét. févr 2005;50(1):49-55.
10. Bodard A-G, Gourmet R. Réhabilitation sur implants après reconstruction mandibulaire par greffon de fibula microanastomosé : une série de 10 cas. Mdecine Buccale Chir Buccale. 2005;11(4):215-215.
11. Poissonnet G, Benezery K, Peyrade F, Bozec A, Bensadoun R-J, Marcy PY, et al. Cancers ORL: les grands principes thérapeutiques. Presse Médicale. nov 2007;36(11):1634-42.
12. Albert S, Guedon C. Chirurgie reconstructrice par lambeaux micro-anastomosés en cancérologie cervico-faciale. Lett Cancerol. 2011;10(2):116-9.
13. Taylor GI, Miller GD, Ham FJ. The free vascularized bone graft. A clinical extension of microvascular techniques. Plast Reconstr Surg. mai 1975;55(5):533-44.
14. Hidalgo DA. Fibula free flap: a new method of mandible reconstruction. Plast Reconstr Surg. juill 1989;84(1):71-9.

15. Kramer F-J, Dempf R, Bremer B. Efficacy of dental implants placed into fibula-free flaps for orofacial reconstruction: Efficacy of dental implants in fibula-free flaps. *Clin Oral Implants Res.* 14 juill 2004;16(1):80-8.
16. Bartaire E, Mouawad F, Mallet Y, Milet P, El Bedoui S, Ton Van J, et al. évaluation morphologique des reconstructions chirurgicales mandibulaires par lambeau libre de fibula et de la gêne fonctionnelle sur le site donneur : à propos de 23 patients. *Ann Franaises Oto-Rhino-Laryngol Pathol Cervico-Faciale.* oct 2012;129(5):274-81.
17. Berchon M. L'impression 3D. Paris: Eyrolles; 2014.
18. eduscol.education.fr. L'impression 3D, état des lieux et perspectives [Internet]. [cité 6 juill 2017]. Disponible sur: [http://www.centre.directe.gouv.fr/IMG/pdf/L\\_impression\\_3D\\_etat\\_des\\_lieux\\_et\\_perspectives\\_-\\_DIRECCTE\\_Centre\\_en\\_partenariat\\_avec\\_CCI\\_Centre\\_-\\_10\\_decembre\\_2014-2.pdf](http://www.centre.directe.gouv.fr/IMG/pdf/L_impression_3D_etat_des_lieux_et_perspectives_-_DIRECCTE_Centre_en_partenariat_avec_CCI_Centre_-_10_decembre_2014-2.pdf)
19. Ponche R. Méthodologie de conception pour la fabrication additive, application à la projection de poudres [These de doctorat]. Ecole centrale Nantes; 2013.
20. Bourgeois L, Delode J, Benhagoug A, Schwob L, Ambadiang E, Ory MJ. état de l'art en techniques opératoires. Retour sur le congrès Arab Health édition 2016. *IRBM News.* juin 2016;37(3):77-122.
21. Hull C. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. US Patent 4575330. March 11, 1986 [Internet]. [cité 18 août 2017]. Disponible sur: <http://www.google.com/patents/US4575330>
22. Kim GB, Lee S, Kim H, Yang DH, Kim Y-H, Kyung YS, et al. Three-Dimensional Printing: Basic Principles and Applications in Medicine and Radiology. *Korean J Radiol.* 2016;17(2):182.
23. rocbor.net. La Productique et sa Culture, L'agglomération de poudre par collage (3DP) [Internet]. [cité 19 août 2017]. Disponible sur: <http://www.rocbor.net/Product/Ressources/NouvellesTechnologies/StereolithographieAndCo/Processus/3DP.htm>
24. pcp.touchbionics.com. i-limb ultra revolution images [Internet]. [cité 25 août 2017]. Disponible sur: <http://pcp.touchbionics.com/downloads/images/i-limb-ultra-revolution-images/>
25. Gerstle TL, Ibrahim AMS, Kim PS, Lee BT, Lin SJ. A Plastic Surgery Application in Evolution: Three-Dimensional Printing. *Plast Reconstr Surg.* févr 2014;133(2):446-51.
26. Hoarau R. Planification 3D en chirurgie maxillo-faciale. *Rev Med Suisse.* 2014;10:1829-33.
27. Yusa K, Yamanochi H, Takagi A, Iino M. Three-Dimensional Printing Model as a Tool to Assist in Surgery for Large Mandibular Tumour: a Case Report. *J Oral Maxillofac Res.* juin 2017;8(2):e4.
28. Bachelet JT, Jouan R, Prade V, Francisco C, Jaby P, Gleizal A. Place of 3D printing in facial epithesis. *J Stomatol Oral Maxillofac Surg* [Internet]. juin 2017 [cité 2 sept

2017]; Disponible sur:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2468785517301027>

29. Li B, Wei H, Zeng F, Li J, Xia JJ, Wang X. Application of A Novel Three-dimensional Printing Genioplasty Template System and Its Clinical Validation: A Control Study. *Sci Rep.* 14 juill 2017;7(1):5431.
30. Fernandes N, van den Heever J, Hoogendijk C, Botha S, Booysen G, Els J. Reconstruction of an Extensive Midfacial Defect Using Additive Manufacturing Techniques: Midfacial Defect Reconstruction via Additive Manufacturing. *J Prosthodont.* oct 2016;25(7):589-94.
31. Yadav S, Narayan AI, Choudhry A, Balakrishnan D. CAD/CAM-Assisted Auricular Prosthesis Fabrication for a Quick, Precise, and More Retentive Outcome: A Clinical Report: CAD/CAM-Assisted Auricular Prosthesis. *J Prosthodont [Internet].* janv 2017 [cité 25 août 2017]; Disponible sur: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jopr.12589/epdf>
32. Philippe B. chirurgie orthognatique guidée, présentation d'un nouveau type d'assistance dans la prise en charge des dysmorphoses dento-maxillaires-faciales. *L'Orthodontiste.* 2015;4(4):36-45.
33. Philippe B. Chirurgie maxillofaciale guidée : simulation et chirurgie assistée par guides stéréolithographiques et miniplaques titane préfabriquées. *Rev Stomatol Chir Maxillo-Faciale Chir Orale.* sept 2013;114(4):228-46.
34. Druelle C. Apport de l'impression 3D en chirurgie maxillo-faciale : épidémiologie de l'utilisation en autonome d'une imprimante à bas coût sur 52 cas [Thèse d'exercice]. Lille 2; 2017.
35. Ma J, Ma L, Wang Z, Zhu X, Wang W. The use of 3D-printed titanium mesh tray in treating complex comminuted mandibular fractures: A case report. *Medicine (Baltimore).* juill 2017;96(27):e7250.
36. Mazzoni S, Bianchi A, Schiariti G, Badiali G, Marchetti C. Computer-aided design and computer-aided manufacturing cutting guides and customized titanium plates are useful in upper maxilla waferless repositioning. *J Oral Maxillofac Surg.* avr 2015;73(4):701-7.
37. Kraeima J, Jansma J, Schepers RH. Splintless surgery: does patient-specific CAD-CAM osteosynthesis improve accuracy of Le Fort I osteotomy? *Br J Oral Maxillofac Surg.* déc 2016;54(10):1085-9.
38. Shah S, O'Connor R, Watson J, Srinivasan D, Sidebottom A. Use of three-dimensional printing to assess transport vectors in mandibular distraction osteogenesis. *Br J Oral Maxillofac Surg.* janv 2017;55(1):74-6.
39. Yang X, Hu J, Zhu S, Liang X, Li J, Luo E. Computer-assisted surgical planning and simulation for condylar reconstruction in patients with osteochondroma. *Br J Oral Maxillofac Surg.* avr 2011;49(3):203-8.
40. Chuang J, Barnes C, Wong B. Overview of Facial Plastic Surgery and Current Developments. *Surg J N Y N.* mars 2016;2(1):e17-28.

41. Martin M. Apport de la stéréolithographie en chirurgie dentaire : techniques et applications [Thèse d'exercice]. Lille 2; 2015.
42. Taddei C, Etienne O, Baixe S, Kress P. CFAO et prothèse amovible partielle métallique [Internet]. Le Fil Dentaire. 2013 [cité 25 août 2017]. Disponible sur: <https://www.lefildentaire.com/articles/clinique/esthetique/cfao-et-prothese-amovible-partielle-metallique/>
43. 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 [Internet]. juill 2017 [cité 26 août 2017]; Disponible sur: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2468785517301192>
44. Pettersson A, Kero T, Söderberg R, Näsström K. Accuracy of virtually planned and CAD/CAM-guided implant surgery on plastic models. J Prosthet Dent. déc 2014;112(6):1472-8.
45. nobelbiocare.com. NobelGuide – la précision numérique pour toutes les indications [Internet]. [cité 12 sept 2017]. Disponible sur: <https://www.nobelbiocare.com/fr/fr/home/products-and-solutions/treatment-concepts/guided-surgery.html>
46. Culié D, Dassonville O, Poissonnet G, Riss J-C, Fernandez J, Bozec A. Modélisation tridimensionnelle préopératoire avec guide de coupes dans la reconstruction mandibulaire par lambeau libre de fibula : à propos d'une série de 29 cas. Ann Fr Oto-Rhino-Laryngol Pathol Cervico-Faciale. juin 2016;133(3):156-9.
47. Schouman T, Bertolus C, Chaîne C, Ceccaldi J, Goudot P. Chirurgie assistée par dispositifs sur-mesure : reconstruction par lambeau libre de fibula. Rev Stomatol Chir Maxillo-Faciale Chir Orale. févr 2014;115(1):28-36.
48. Roser SM, Ramachandra S, Blair H, Grist W, Carlson GW, Christensen AM, et al. The Accuracy of Virtual Surgical Planning in Free Fibula Mandibular Reconstruction: Comparison of Planned and Final Results. J Oral Maxillofac Surg. nov 2010;68(11):2824-32.
49. Liu X, Gui L, Mao C, Peng X, Yu G. Applying computer techniques in maxillofacial reconstruction using a fibula flap: a messenger and an evaluation method. J Craniofac Surg. mars 2009;20(2):372-7.
50. Leiggener C, Messo E, Thor A, Zeilhofer H-F, Hirsch J-M. A selective laser sintering guide for transferring a virtual plan to real time surgery in composite mandibular reconstruction with free fibula osseous flaps. Int J Oral Maxillofac Surg. févr 2009;38(2):187-92.
51. 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. juin 2017;118(3):197-202.
52. Urken ML, Buchbinder D, Costantino PD, Sinha U, Okay D, Lawson W, et al. Oromandibular reconstruction using microvascular composite flaps: report of 210 cases. Arch Otolaryngol Head Neck Surg. janv 1998;124(1):46-55.

53. Levine JP, Bae JS, Soares M, Brecht LE, Saadeh PB, Ceradini DJ, et al. Jaw in a Day: Total Maxillofacial Reconstruction Using Digital Technology. *Plast Reconstr Surg.* juin 2013;131(6):1386-91.
54. Qaisi M, Kolodney H, Swedenburg G, Chandran R, Caloss R. Fibula Jaw in a Day: State of the Art in Maxillofacial Reconstruction. *J Oral Maxillofac Surg.* juin 2016;74(6):1284.e1-1284.e15.
55. Odin G, Balaguer T, Savoldelli C, Scortecchi G. Immediate Functional Loading of an Implant-Supported Fixed Prosthesis at the Time of Ablative Surgery and Mandibular Reconstruction for Squamous Cell Carcinoma. *J Oral Implantol.* juin 2010;36(3):225-30.
56. El Kohen A, Benjelloun A, Benchekroun L, Lazrak A, Jazouli N, Kzadri M. Les reconstructions mandibulaires : évolution des techniques opératoires à propos de 22 cas. *Rev Stomatol Chir Maxillofac.* déc 2004;105(6):347-53.
57. Schepers RH, Raghoobar GM, Vissink A, Stenekes MW, Kraeima J, Roodenburg JL, et 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 Cranio-Maxillofac Surg.* juin 2015;43(5):649-57.
58. Cebrian-Carretero J, Guinales-Diaz de Cevallos J, Sobrino J, Yu T, Burgueno-Garcia M. Predictable dental rehabilitation in maxillomandibular reconstruction with free flaps. The role of implant guided surgery. *Med Oral Patol Oral Cirugia Bucal.* 2014;e605-11.
59. Rem K, Bosc R, De Kermadec H, Hersant B, Meningaud J-P. Ostéotomies fibulaires et mandibulaires en marche d'escalier. Comment réaliser ses propres guides de coupe pour les reconstructions maxillofaciales ? *Ann Chir Plast Esthétique* [Internet]. avr 2017 [cité 20 juin 2017]; Disponible sur: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0294126017300444>
60. Hanasono MM, Skoracki RJ. Computer-assisted design and rapid prototype modeling in microvascular mandible reconstruction. *The Laryngoscope.* mars 2013;123(3):597-604.
61. Liu Y, Xu L, Zhu H, Liu SS-Y. Technical procedures for template-guided surgery for mandibular reconstruction based on digital design and manufacturing. *Biomed Eng OnLine.* 2014;13(1):63.
62. Chang S-Y, Huang J-J, Tsao C-K, Nguyen A, Mittakanti K, Lin C-Y, et al. Does Ischemia Time Affect the Outcome of Free Fibula Flaps for Head and Neck Reconstruction? A Review of 116 Cases: *Plast Reconstr Surg.* déc 2010;126(6):1988-95.
63. Saad A, Winters R, Wise MW, Dupin CL, St.Hilaire H. Virtual Surgical Planning in Complex Composite Maxillofacial Reconstruction: *Plast Reconstr Surg.* sept 2013;132(3):626-33.
64. Seruya M, Fisher M, Rodriguez ED. Computer-Assisted versus Conventional Free Fibula Flap Technique for Craniofacial Reconstruction: An Outcomes Comparison. *Plast Reconstr Surg.* nov 2013;132(5):1219-28.

65. Albert S, Cristofari J-P, Cox A, Bensimon J-L, Guedon C, Barry B. Reconstruction mandibulaire par lambeau microanastomosé de fibula. Modélisation radiologique préopératoire par le logiciel Osirix®. *Ann Chir Plast Esthét.* déc 2011;56(6):494-503.
66. Antony AK, Chen WF, Kolokythas A, Weimer KA, Cohen MN. Use of Virtual Surgery and Stereolithography-Guided Osteotomy for Mandibular Reconstruction with the Free Fibula: *Plast Reconstr Surg.* nov 2011;128(5):1080-4.
67. Avraham T, Franco P, Brecht LE, Ceradini DJ, Saadeh PB, Hirsch DL, et al. Functional Outcomes of Virtually Planned Free Fibula Flap Reconstruction of the Mandible: *Plast Reconstr Surg.* oct 2014;134(4):628e-634e.
68. Montmartin M, Meyer C, Euvrard E, Pazart L, Weber E, Benassarou M. L'impression 3D à l'hôpital: quelle réglementation en France ? *Rev Stomatol Chir Maxillo-Faciale Chir Orale.* nov 2015;116(5):302-7.
69. Ernoult C, Bouletreau P, Meyer C, Aubry S, Breton P, Bachelet J-T. Reconstruction assistée par l'impression 3D en chirurgie maxillofaciale. *Rev Stomatol Chir Maxillo-Faciale Chir Orale.* avr 2015;116(2):95-102.

# Table des illustrations

Figure 1 : Classification de Cariou (3).....	18
Figure 2 : Séquelle d'interruption de la symphyse mandibulaire. Déformation de "Andy Gump" par réduction de l'étage inférieur de la face (2). Illustration de la BD (7). ....	19
Figure 3: Vues supérieure et latérale du prélèvement d'un lambeau composite de fibula (5) .....	23
Figure 4 : Tumeur envahissant la mandibule, imposant une exérèse segmentaire en passant au large dans le plancher en dedans, la joue en dehors (8).....	25
Figure 5 : Section osseuse segmentaire (8).....	27
Figure 6 : Pièce opératoire réséquée (8).....	27
Figure 7: Prélèvement du lambeau de fibula (8).....	28
Figure 8 : Aspect du lambeau en fin de dissection : péroné tracté en dehors, visualisation du pédicule vasculaire à la face interne de l'os (5).....	29
Figure 9 : Anastomoses (8).....	30
Figure 10 : Réparation d'une perte de substance symphysaire étendue aux deux branches horizontales. A gauche, vue peropératoire après mise en place du lambeau (deux ostéotomies ont été nécessaires à la conformation du greffon). A droite, aspect du greffon sur le panoramique dentaire réalisé à trois mois post-opératoires (5) .....	30
Figure 11 : Les méthodes de fabrication additive (18) .....	33
Figure 12 : Les étapes de fabrication additive (18).....	35
Figure 13 : Procédé par extrusion de matière (20).....	36
Figure 14 : Procédé de stéréolithographie (22).....	37
Figure 15 : La 3DP (23) .....	38
Figure 16 : Main prothétique myoélectrique (24) et exosquelette (20) .....	41
Figure 17 : Etapes du bioprinting (20) .....	41
Figure 18 : Modèle anatomique objectivant la PDS liées à la résection tumorale ; conception en 3D de l'implant ; visualisation finale de l'implant. Il sera solidarisé aux zygomatiques à l'aide de 4 implants et sera recouvert par une épithèse faciale. (30) .....	43
Figure 19 : Implants résorbables (20) .....	44
Figure 20 : Modèle d'une oreille reconstruite par effet symétrique avec l'oreille controlatérale (31).....	44
Figure 21 : Patient présentant un édentement complet maxillaire associée à une atrophie formant un décalage des bases osseuses. (33) .....	45
Figure 22 : : Processus de réduction virtuelle et de conception du plateau constitué d'un maillage en titane, impression et positionnement sur le modèle chirurgical (35).....	46
Figure 23 : De gauche à droite et de haut en bas : Guide de forage et d'ostéotomie soutenu par l'arcade dentaire supérieure ; Plaques d'ostéosynthèse ; Guide supporté par la denture pendant l'opération ; Forage et ostéosynthèse ; Occlusion obtenue à la fin de la procédure (37).....	47

Figure 24 : Simulation de la résection d'un améloblastome mandibulaire droit et reconstruction à l'aide d'une distraction segmentaire, planifiée en utilisant un modèle tridimensionnel. (38).....	47
Figure 25 : De gauche à droite et de haut en bas : .....	48
Figure 26 : Visages imprimés en 3D (20) .....	49
Figure 27 : modèle de travail stéréolithographique (41).....	49
Figure 28 : Le guide chirurgical personnalisé assure un forage et une insertion guidés de l'implant basés sur le plan de traitement établi (45).....	51
Figure 29 : Les étapes de la planification pré-opératoire (49) .....	53
Figure 30 : Modèles tridimensionnels du massif craniofacial et de la fibula (les axes vasculaires sont matérialisés) (47) .....	55
Figure 31 : Planification de la résection (47) .....	56
Figure 32 : Le mirroring (47) .....	57
Figure 33 : emplacement virtuel des implants en choisissant les positions les plus favorables en terme de qualité osseuse (58) .....	60
Figure 34 : Planification du positionnement des implants et planification de la reconstruction à partir du positionnement des implants en fonction de l'arcade dentaire antagoniste (47).....	60
Figure 35 : Tracé de la trajectoire de reconstruction (47).....	61
Figure 36 : Calcul de la reconstruction obtenue à partir de la trajectoire indiquée (47).....	62
Figure 37 : Guide de coupe fibulaire et modèle de la reconstruction (47).....	63
Figure 38 : Pose des implants dentaires avant de réaliser les ostéotomies et la conformation (47).....	65
Figure 39 : Réalisation des ostéotomies selon le guide (47).....	65
Figure 40: Ostéosynthèse de la fibula sur le moignon mandibulaire (57) .....	66
Figure 41 : Adaptation du montage prothétique au modèle. Le bridge peut être déposé (par dévissage) pour ménager le passage des tissus mous. (47).....	68
Figure 42 : Solidarisation de la prothèse aux piliers prothétiques et positionnement de la reconstruction composite par un blocage maxillo-mandibulaire avant de réaliser les anastomoses et l'ostéosynthèse (47).....	68
Figure 43 : Résultats exo et endobuccal à un an (la prothèse définitive a remplacé en bouche la prothèse provisoire immédiate) (47) .....	69
Figure 44 : Comparaison entre la pièce opératoire d'exérèse et le modèle préopératoire (65).....	71

## Table des tableaux

Tableau 1 : Les caractéristiques du dépôt de matière fondue (17,20).....	36
Tableau 2 : Les caractéristiques de la photopolymérisation (17,20).....	37
Tableau 3 : Les caractéristiques de l'impression 3D .....	38
Tableau 4 : Tableau des avantages et des inconvénients de la fabrication additive .....	39
Tableau 5 : La CFAO appliquée à la prothèse amovible à châssis métallique .....	50

**Th. D. : Chir. Dent. : Lille 2 : Année 2017 – N°:**

**Intérêts de la chirurgie assistée par ordinateur appliquée à la reconstruction mandibulaire par lambeau libre de fibula micro-anastomosé**

**HERNU Sophie**

f. 86 ; ill. 49 ; réf. 69

**Domaines** : Chirurgie maxillo-faciale

**Mots clés Rameau**: Chirurgie – Informatique ; CFAO, Systèmes de ; Mandibule - Chirurgie ; Fibula ; Lambeau (chirurgie) ; Chirurgie – Techniques ; Impression 3D

**Mots clés FMeSH**: Chirurgie assistée par ordinateur ; Reconstruction mandibulaire ; Conception assistée par ordinateur ; Fibula ; Procédures de chirurgie reconstructrice ; Impression tridimensionnelle

**Résumé de la thèse :**

L'impression tridimensionnelle s'est récemment développée au service de la santé et plus particulièrement de la chirurgie maxillo-faciale. Grâce à la planification pré-opératoire, elle permet la fabrication d'aides chirurgicales sur-mesure dans le but d'assister le chirurgien lors de ses opérations. Dans le cadre d'un cancer touchant la mandibule, elle veille à optimiser la résection de la tumeur et le modelage du lambeau de fibula à la perte de substance mandibulaire par le biais de guides de coupe et de plaques d'ostéosynthèse préformées.

**JURY** :

**Président :** Monsieur le Professeur Guillaume PENEL

**Assesseurs :** Monsieur le Docteur Laurent NAWROCKI

Monsieur le Docteur Jean-Marie LANGLOIS

**Madame le Docteur Sarah LHOMME**