HAL open science

Apport de l'impression 3D dans la fabrication et la précision des guides chirurgicaux en implantologie : données actuelles et étude d'un cas clinique

Marc Benjoar

▶ To cite this version:

Marc Benjoar. Apport de l'impression 3D dans la fabrication et la précision des guides chirurgicaux en implantologie : données actuelles et étude d'un cas clinique. Sciences du Vivant [q-bio]. 2019. dumas-03298414

HAL Id: dumas-03298414

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03298414

Submitted on 23 Jul 2021

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

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

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

UNIVERSITÉ PARIS DIDEROT - PARIS 7

FACULTÉ DE CHIRURGIE DENTAIRE
5, Rue Garancière 75006 PARIS

2019

Thèse N°:
N° attribué par la bibliothèque :

THÈSE pour le DIPLÔME D'ETAT DE DOCTEUR

en CHIRURGIE DENTAIRE

présentée et soutenue publiquement le

par **BENJOAR Marc**

APPORT DE L'IMPRESSION 3D DANS LA FABRICATION ET LA PRÉCISION DES GUIDES CHIRURGICAUX EN IMPLANTOLOGIE : DONNÉES ACTUELLES ET ÉTUDE D'UN CAS CLINIQUE

Directeur de thèse : M. le Docteur Pierre WEIDMANN

J U R Y

Mme la Professeure Laurence JORDAN	Président
Mme la Docteure Vanessa BAAROUN	Assesseur
M. le Docteur Stéphan BAREK	Assesseur
M. le Professeur Yves BOUCHER	Assesseur
M. le Docteur Pierre FABREGAT	Assesseur
M. le Docteur Rufino FELIZARDO	Assesseur
M. le Docteur Pierre WEIDMANN	Assesseur

U N I V E R S I T É P A R I S D I D E R O T – P A R I S 7

Présidente de l'Université :	Mme la Professeure Christine CLERICI
Doyenne de l'U.F.R. d'Odontologie :	Mme la Professeure Ariane BERDAL
Directrice Générale des Services :	Madame Pascale SAINT-CYR

J U R Y

Mme la Professeure Laurence JORDAN	Présidente
Mme la Docteure Vanessa BAAROUN	Assesseur
M. le Docteur Stéphan BAREK	Assesseur
M. le Professeur Yves BOUCHER	Assesseur
M. le Docteur Pierre FABREGAT	Assesseur
M. le Docteur Rufino FELIZARDO	Assesseur
M. le Docteur Pierre WEIDMANN	Assesseur

Mme la Professeure Laurence JORDAN Docteur en Chirurgie Dentaire
Diplôme de Doctorat
Professeur des Universités - Praticien Hospitalier

Vous me faites le très grand honneur d'accepter la présidence de ma thèse. Je vous remercie très chaleureusement. Je me souviendrai longtemps de vos enseignements qui me servent et serviront dans ma pratique quotidienne. Sachez que vos enseignements m'ont beaucoup aidé et influencé dans ce travail. Veuillez trouver ici le témoignage de ma plus grande gratitude.

Mme la Docteure Vanessa BAAROUN Docteur en Chirurgie Dentaire
Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier

Je vous remercie de l'honneur que vous me faites en participant au jury de ma thèse. Soyez assuré de ma reconnaissance et de ma plus respectueuse considération.

M. le Docteur Stéphane BAREK Docteur en Chirurgie Dentaire
Diplôme de Doctorat
Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier

Je vous remercie de l'honneur que vous me faites en participant au jury de ma thèse. Soyez assuré de ma reconnaissance et de ma plus respectueuse considération.

M. le Professeur Yves BOUCHER Docteur en Chirurgie Dentaire
Diplôme de Doctorat
Professeur des Universités - Praticien Hospitalier

Je vous remercie de l'honneur que vous me faites en participant au jury de ma thèse. Soyez assuré de ma reconnaissance et de ma plus respectueuse considération.

M. le Docteur Pierre FABREGAT Docteur en Chirurgie Dentaire
Assistant Hospitalo-Universitaire

Je vous remercie de l'honneur que vous me faites en participant au jury de ma thèse. Soyez assuré de ma reconnaissance et de ma plus respectueuse considération.

M. le Docteur Rufino FELIZARDO Docteur en Chirurgie Dentaire
Diplôme de Doctorat
Maître de Conférences des Universités - Praticien Hospitalier

Je vous remercie de l'honneur que vous me faites en participant au jury de ma thèse. Soyez assuré de ma reconnaissance et de ma plus respectueuse considération.

M. le Docteur Pierre WEIDMANN Docteur en Chirurgie Dentaire
Assistant Hospitalo-Universitaire

Je vous remercie de l'honneur que vous m'avez fait en dirigeant ce travail et en participant au jury de ma thèse, je vous en serai toujours très reconnaissant.
Veuillez croire en l'expression de mon plus grand respect et de ma profonde gratitude.

SOMMAIRE

INTRODUCTION **3**

I- CHIRURGIE GUIDEE EN IMPLANTOLOGIE : CONCEPTS ACTUELS ET PROCESSUS DE FABRICATION **4**

I-1- Chirurgie guidée **4**
I-1-1- Définition et évolution des concepts 4

I-2- Planification implantaire **4**
I-2-1- Protocole « traditionnel » de conception : transformation du guide radiologique en guide chirurgical à partir d'une cire de diagnostique conventionnelle 4
I-2-2- Acquisition des données pré-opératoires 6
I-2-3- Logiciel de planification implantaire 8
I-2-4- CFAO (conception et fabrication assistées par ordinateur) 10

I-3- Différents modes de conception et de fabrication des guides chirurgicaux **11**
I-3-1- Présentation d'un protocole numérique basique de conception et de fabrication d'un guide chirurgical au cabinet 11
I-3-2- Processus de planification en fonction de la situation clinique 15

I-4- Les différents types de guides chirurgicaux **15**
I-4-1- Les guides chirurgicaux selon les tissus de soutien 15
I-4-2- Guidage « pilote » versus « guidage total ou full guided » 17
I-4-3- Précision des systèmes de chirurgie guidée 18

II- IMPRESSION 3D : FABRICATION D'UN GUIDE **19**

II-1- Définition et principes communs **19**
II-1-1- Historique 19
II-1-2- Définition 19
II-1-3- Principe commun des différentes technologies d'impression 3D 20

II-2- Avantages de la fabrication additive en comparaison avec la méthode soustractive **21**

II-3- Technologies d'impression 3D **21**
II-3-1- L'impression 3D par photopolymérisation 22
II-3-2- L'impression 3D par liage de poudre 25
II-3-3- L'impression par dépôt de matière fondue 27
II-3-4- La bio-impression 29
II-3-5- Les matériaux d'impression 29

II-4- Types d'imprimantes 3D **34**
II-4-1- Imprimantes de bureau 34
II-4-2- Imprimantes professionnelles 34
II-4-3- imprimantes industrielles 35

II-5- Technologies d'impressions 3D utilisées en implantologie et applications 35

III- ANALYSE DE LA LITTERATURE 37

III-1- Stratégie de recherche.....37

III-2- Sélection des articles 37

III-3- Répartition des articles sélectionnés.....39

III-4- Analyse des publications.....40
III-4-1-Précision chirurgicale/ reproductibilité entre planification numérique et position de l'implant.....40
III-4-2-Stabilité du guide 53
III-4-3-Transfert d'informations entre laboratoire et cabinet 54

III-5- Synthèse de la revue de littérature 56
III-5-1-Les intérêts de la chirurgie guidée 56
III-5-2-Apports et intérêts de l'impression 3D en chirurgie implantaire guidée 58
III-5-3-Inconvénients de la chirurgie guidée et de l'impression 3D 61

IV- PRÉSENTATION D'UN CAS CLINIQUE 63

V- CONCLUSION 69

Introduction

La chirurgie guidée a révolutionné l'implantologie orale. L'utilisation de guides chirurgicaux découlant d'une planification implantaire sur logiciel informatique permet de réaliser une pose d'implants fidèle au « projet prothétique numérique ». La planification pré-opératoire de la pose d'implants a par ailleurs permis de diminuer le temps de l'intervention ainsi que les suites post-opératoires. (Happe et al., 2018).

De nos jours, l'impression 3D est la technologie majoritairement employée dans la conception de ces guides chirurgicaux. Plusieurs systèmes d'impressions 3D et d'imprimantes existent sur le marché.

Nous étudierons dans un premier temps l'évolution des concepts et des protocoles de chirurgie implantaire guidée, puis nous présenterons les différentes technologies et applications de l'impression 3D en implantologie.

L'objectif de cette thèse sera d'analyser la littérature existante à ce jour afin d'évaluer l'efficacité et la fiabilité des différents systèmes d'impression 3D en chirurgie implantaire guidée et à fortiori, de tenter de déterminer si un système d'impression prévaut sur les autres.

Enfin, un cas clinique de chirurgie guidée sera présenté.

I- Chirurgie guidée en implantologie : concepts actuels et processus de fabrication

I-1-Chirurgie guidée

I-1-1- Définition et évolution des concepts

Les implants dentaires sont utilisés comme « racines dentaires artificielles » permettant de soutenir une suprastructure prothétique, de la couronne unitaire aux prothèses complètes fixes et amovibles.

Le positionnement tridimensionnel d'un implant est la condition préalable à un résultat esthétique et biologique optimal (Tahmaseb et al. 2014). La mise en place d'un implant doit être guidée par la prothèse tout en tenant compte des contraintes anatomiques présentes.

La chirurgie guidée a pour objectif de répondre à cette règle.

Le principe de cette technique repose sur l'utilisation d'un guide chirurgical cherchant à reproduire cliniquement la position « virtuelle » de l'implant choisie au préalable.

Deux étapes sont nécessaires avant la fabrication du guide : la collecte de données du patient, puis la planification implantaire.

I-2-Planification implantaire

La planification implantaire a pour objectif « d'assembler » différentes données : les données radiographiques et les données « cliniques » matérialisées par les modèles d'étude.

L'association de ces données permet de réaliser une pose d'implant virtuelle qui servira de base à la conception de guides chirurgicaux.

Il existe deux méthodes de planification, une dite « artisanale » à partir d'une cire de diagnostique réalisée au laboratoire, et une virtuelle totalement conçue sur support informatique.

I-2-1- Protocole « traditionnel » de conception : transformation du guide radiologique en guide chirurgical à partir d'une cire de diagnostique conventionnelle

Ce protocole débute par la réalisation d'un wax-up préfigurant le futur projet prothétique à partir duquel un guide radiologique contenant des repères radio-opaques est élaboré (Brothier et Soenen 2017). L'intégration esthétique et fonctionnelle du guide est validée sur le patient. Puis, un examen tomodensitométrique est réalisé avec le guide radiologique en bouche.

Cet examen permet d'obtenir un positionnement spatial exact de la référence prothétique au sein de l'arcade dentaire. Les structures radio-opaques servent d'interface avec le logiciel de planification.

L'analyse des coupes de scanner est un préalable à la validation de la faisabilité du traitement implantaire. Elle permet d'indiquer l'éventuel recours à des aménagements osseux. La superposition de l'axe prothétique idéal et du volume osseux permet de choisir le diamètre, la longueur, l'axe et le niveau d'enfouissement de l'implant.

Le guide radiologique est renvoyé au laboratoire pour être transformé en guide chirurgical, une encoche axiale ménage l'espace nécessaire au passage des forets. Il s'agit ici d'une étape « grossière » du processus de fabrication qui peut être sujette à des erreurs, bien que mise en œuvre par des prothésistes expérimentés (Happe et al. 2018).

Figure 1 : Protocole traditionnel de production d'un guide chirurgical

I-2-2- Acquisition des données pré-opératoires

La planification implantaire nécessite une visualisation précise de la structure osseuse en trois dimensions (Ganz 2015). La tomographie à faisceau conique (Cone Beam Computed Tomography ou CBCT) constitue l'examen radiographique 3D de choix en implantologie.

I-2-2-1- Acquisition des images CBCT (Cone Beam Computed Tomography)

Les données d'acquisition du CBCT sont au format DICOM ou Digital Imaging and Communications in Medicine. Le standard DICOM a été créé en 1985 par l'American College of Radiology (ACR) et la National Electric Manufacturers Association (NEMA) dans le but de standardiser les données échangées entre les machines des différents constructeurs de matériels radiologiques. En effet, le suivi médical des patients, surtout en cas de pathologie lourde, nécessite souvent le transfert d'informations d'un établissement de santé à un autre. Ce format est utilisé par l'ensemble des logiciels de planification en implantologie orale (Bidgood et Horii 1992).

L'avènement de la tomodensitométrie tridimensionnelle (TDM) et des appareils de tomodensitométrie à faisceau conique à faibles doses de nouvelle génération, combinés à un logiciel interactif de planification, permet aux cliniciens d'apprécier véritablement la réalité anatomique de chaque patient. Chaque image peut fournir des informations importantes non déformées et utilisées à la fois dans le cadre du diagnostic mais aussi lors de la planification.

En général, l'ensemble des données tridimensionnelles se compose de 4 vues de base : la vue axiale, la vue en coupe, la vue panoramique reconstruite et le volume reconstruit en trois dimensions. Son succès croissant est vraisemblablement dû à son format compact, l'émission de doses raisonnables, son faible coût et sa facilité d'utilisation en cabinet.

Initialement, l'objectif principal du CBCT était double à savoir contourner les limites des appareils de tomodensitométrie conventionnels et réduire l'exposition des patients aux radiations. Le balayage CBCT utilise un faisceau de rayons X de forme conique, qui est dirigé vers le patient tandis qu'un détecteur plat bidimensionnel est utilisé pour capturer le faisceau restant. Le procédé consiste à faire tourner le détecteur et la source de rayons X autour de la tête du patient afin d'obtenir des images 2D successives. Elles sont ensuite converties en images 3D à l'aide d'un logiciel (Machado 2015).

En résumé, les avantages du CBCT sont multiples :

- diversité des images et finesse : une seule acquisition pour obtenir les coupes frontales ; sagittales, coronaires obliques ainsi que la vue 3D ;
- les clichés obtenus sont au ratio de 1:1 ;
- technologie "à faible dose" qui donne une bonne qualité d'image avec une exposition aux rayonnements plus faible qu'un examen par scanner.

I-2-2-2- Scanners de surfaces

Les données d'acquisition des scanners de surfaces sont en grande majorité au format STL. Il s'agit d'un nuage de points reliés entre eux créant un maillage et générant un modèle numérique. C'est ce même format de fichier 3D qui va être employé au sein du logiciel qui communique avec l'imprimante 3D.

I-2-2-2-1- Numérisation des modèles et des empreintes conventionnelles

Aujourd'hui, la numérisation 3D des modèles en plâtre est la pratique la plus courante. Ce procédé est le point d'entrée dans le processus numérique de conception et de fabrication assistée par ordinateur. Un modèle en plâtre est réalisé à partir d'une empreinte en silicone qui sera fixé sur la plate-forme d'un scanner extra-oral pour un balayage (Ting-Shu et Jian 2015).

Les fabricants de scanners offrent désormais la possibilité de numériser les empreintes sans avoir à les mouler au plâtre.
Le scanner d'empreinte dentaire a été créé pour permettre aux dentistes non équipés d'un scanner intra-oral d'accéder directement à la CFAO sans avoir à modifier leur protocole d'empreinte. La prise en main est intuitive à tel point qu'une formation allégée suffit et ne requiert pas de manipulation particulière. La numérisation est en effet entièrement automatisée. Un matériau d'empreinte scannable imprégné de dioxyde de titane est requis.
La rapidité et la facilité du transfert des données numériques au laboratoire permettent de réduire les délais de réception du dispositif sur mesure avec une très faible perte sur le plan qualitatif. Les empreintes ont un cycle de vie qui commence au moment où elles sont prises. La numérisation des empreintes permet de s'affranchir de la plupart des erreurs liées aux changements volumétriques des matériaux d'empreinte et de l'expansion du plâtre dentaire (Richert et al. 2017).

I-2-2-3- Scanners intra-oraux

Désormais les scanners intra-oraux et la technologie CAO/FAO simplifient la planification implantaire, les informations délivrées au patient et la communication avec les laboratoires.

Le principal avantage de l'empreinte optique par rapport à la prise d'empreinte conventionnelle est la réduction du stress et de l'inconfort du patient (Gjelvold et al. 2016). De nombreux patients souffrent d'anxiété et d'un réflexe nauséeux.

Elle facilite les procédures cliniques pour le dentiste, en particulier pour les empreintes complexes (chez les patients présentant des contre-dépouilles et/ou en implantologie orale, lorsque plusieurs implants sont présents).

Si les avantages de l'empreinte numérique sont considérables, plusieurs obstacles et lacunes subsistent : la courbe d'apprentissage, les coûts d'achat et de gestion sont des facteurs à prendre en compte avant de s'équiper d'un scanner intra-oral (Mangano et al. 2017).

Certains systèmes nécessitent une couche de poudre pulvérisée sur les surfaces dentaires, et l'épaisseur inhomogène de la poudre peut légèrement transfigurer le contour de la dent.

Les principaux systèmes d'empreintes numériques intra-oraux actuellement disponibles sur le marché sont CEREC®, C.O.S. Lava®, iTero®, E4D® et TRIOS®. Leurs caractéristiques diffèrent tant sur leur fonctionnement intrinsèque que sur d'autres aspects tels que la source de lumière, la nécessité ou non d'une pulvérisation de poudre, le processus opératoire ou le format des fichiers de sortie (Ting-Shu et Jian 2015).

I-2-3- Logiciel de planification implantaire

Le logiciel de planification implantaire offre la possibilité d'évaluer le volume osseux des patients par le biais de la radiologie tridimensionnelle. Le praticien peut exploiter les images au format DICOM pour effectuer des mesures millimétrées du volume osseux et repérer les éventuelles contraintes anatomiques (mandibule : nerf alvéolaire inférieur ; maxillaire : les sinus maxillaires). Grâce à ces logiciels, la conception de guides chirurgicaux et celle de la future prothèse sont rendues possibles par un mécanisme de superposition des fichiers DICOM et STL.

Ces logiciels offrent la faculté au praticien d'anticiper le positionnement de l'implant dans les 3 plans de l'espace en accord avec la future prothèse et les tissus environnants. Il existe plusieurs versions de logiciels, des plus simples aux plus sophistiqués. La plupart de ces logiciels sont à

ce jour payants. Toutefois, de nouveaux logiciels à la fois disponibles en accès libre et très performants tels que Blue Skye Plan® commencent à voir le jour.

Une liste exhaustive des logiciels de planification d''implants actuellement disponibles serait trop longue à réaliser. Toutefois, certains sont fréquemment cités dans la presse spécialisée :

- Invivo® ;
- Simplant ®;
- OnDemand3D® ;
- Blue Sky Plan®;
- 3Shape Implant Studio®;
- CoDiagnostix®
- SMOP® .

En plus de supprimer les approximations induites par la lecture des examens radiologiques en deux dimensions, ces logiciels ont un impact non négligeable sur l'ergonomie de travail du praticien. Enfin, ces logiciels peuvent se révéler d'importants outils pédagogiques afin de rassurer le patient.

Plusieurs facteurs différencient ces logiciels, résumés dans le tableau qui suit :

bibliothèque d'implants	Certains logiciels bénéficient de la présence d'un large éventail de marques d'implants tandis que d'autres ne disposent que d'une bibliothèque limitée.
Coût	Certains logiciels sont gratuits, d'autre payants pouvant aller jusqu'à quelques milliers d'euros (Kowalski 2014). La nature comptable détermine s'il est prudent de développer le système en interne ou de faire appel à un fournisseur.
Collaboration	La collaboration est la caractéristique du logiciel qui détermine sa capacité à développer la communication entre les différents canaux et intervenants (Kowalski 2014). Une version spécifique du logiciel peut favoriser le partage de l'information entre les collaborateurs des cabinets dentaires, alors que d'autres pourraient ne pas offrir cette fonctionnalité. L'existence d'outils de communication avancés avec le fabricant, le service support et les patients est à prendre en compte au moment de l'acquisition du logiciel.
Sophistication	La sophistication fait référence au niveau de développement présenté par un système. Certains logiciels ne présentent que très peu d'outils et s'arrêtent à la simulation préimplantaire sans proposer, par exemple, la conception des guides chirurgicaux ou des restaurations. D'autres logiciels proposent des fonctionnalités avancées telles que l'assistance dans le protocole de réduction osseuse, la chirurgie guidée, l'avulsion virtuelle en vue d'une implantation immédiate ou encore l'indication de greffe.

Tableau 1 : Facteurs influençant le choix du logiciel de planification

I-2-4- CFAO (conception et fabrication assistées par ordinateur)

Le développement d'outils « numériques » permet aujourd'hui de réaliser l'ensemble des étapes sur un support informatique. On parle de flux numérique (*digital workflow*) et de conception et fabrication assistées par ordinateur (CAO/FAO) pour évoquer la digitalisation de l'ensemble dont la finalité est la restauration prothétique supra-implantaire.

Les systèmes de CFAO (conception et fabrication assistées par ordinateur) sont composés de trois parties principales :

- une unité d'acquisition de données qui collecte les informations de la région d'intérêt ensuite converties en empreintes virtuelles (une empreinte optique est alors créée directement ou indirectement ;
- un logiciel permettant de concevoir des restaurations virtuelles elles-mêmes ancrées dans des empreintes virtuelles .Il permet de régler tous les paramètres de fraisage et d'impression;
- un dispositif de fraisage informatisé pour fabriquer la restauration à partir de blocs solides du matériaux ou une imprimante 3D pour une fabrication additive.

Les deux premières parties du système sont utilisées pour la phase CAO, la troisième se charge de la phase FAO.

La prise d'empreinte optique est le premier maillon de la chaîne CFAO, qu'elle soit destinée à la CFAO directe (CAO et FAO réalisées au cabinet) ou à l'expédition, via Internet au laboratoire.

Les systèmes CAO/FAO peuvent être divisés en deux types en fonction de la capacité de partage des données numériques :

- Les systèmes fermés offrent toutes les procédures CAO/FAO, y compris l'acquisition de données, la conception virtuelle et la fabrication de restaurations. Toutes les étapes sont intégrées dans un système unique. Il n'y a pas d'interchangeabilité entre les différents systèmes.
- Les systèmes ouverts permettent l'adoption des données numériques par d'autres logiciels de CAO et de FAO (Jablow 2010).

I-3- Différents modes de conception et de fabrication des guides chirurgicaux

I-3-1- Présentation d'un protocole numérique basique de conception et de fabrication d'un guide chirurgical au cabinet

Le développement du numérique permet aujourd'hui de réaliser l'ensemble de ces étapes sur support informatique sans faire appel aux techniques artisanales traditionnelles.
Ces logiciels permettent la réalisation d'un guide chirurgical entièrement numérisé (Whitley et al. 2017).
Le protocole se déroule en plusieurs étapes :

- Lecture du fichier DICOM issu du CBCT réalisé préalablement sur le patient sans guide radiologique. Les structure anatomiques peuvent être étudiées selon les 3 dimensions ;
- Détermination des structures vitales telles que le trajet du nerf dentaire inférieur ou bien les sinus maxillaires.
- Importation du fichier STL issu de l'empreinte optique ou du scannage des modèles. Le DICOM ainsi que le fichier STL vont être juxtaposés :
    - Cinq points de référence identiques sur le fichier DICOM et sur le fichier STL doivent être sélectionnés. Plus il y a de points, plus la superposition sera précise.
    - L'alignement se fait automatiquement mais il est possible toutefois de le réajuster manuellement si nécessaire pour plus de précision.

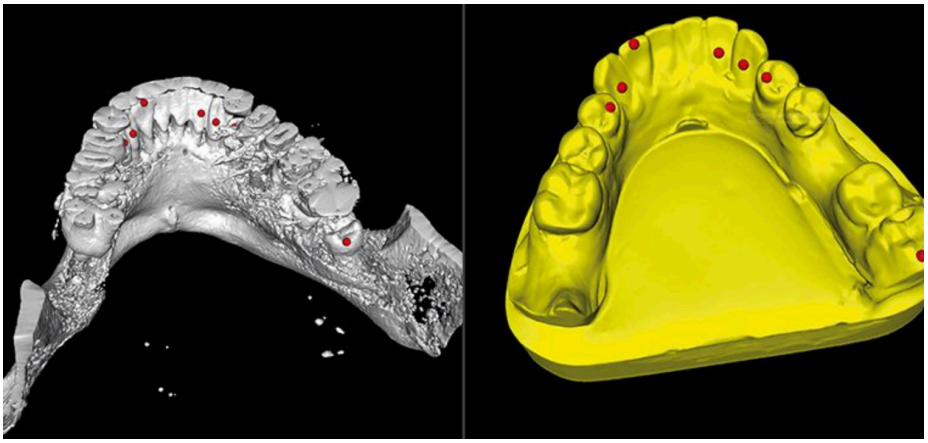

Photo 1 : Superposition des données DICOM et STL
(d'après Brothier et Soenen 2017)

- Positionnement et ajustement de la future prothèse : il s'agit ici de créer un wax-up numérique qui guidera la position de l'implant.
- Accès à la bibliothèque implantaire : soit personnalisée en rentrant manuellement les caractéristiques de l'implant soit en fonction de la marque de l'implant. Une représentation 3D de l'implant apparait avec le tube de guidage qui contiendra la douille de forage.
- Orientation et déplacement de la couronne et de l'implant. L'ajustement est réalisé en fonction de l'espace prothétique, du niveau osseux et des structures anatomiques.

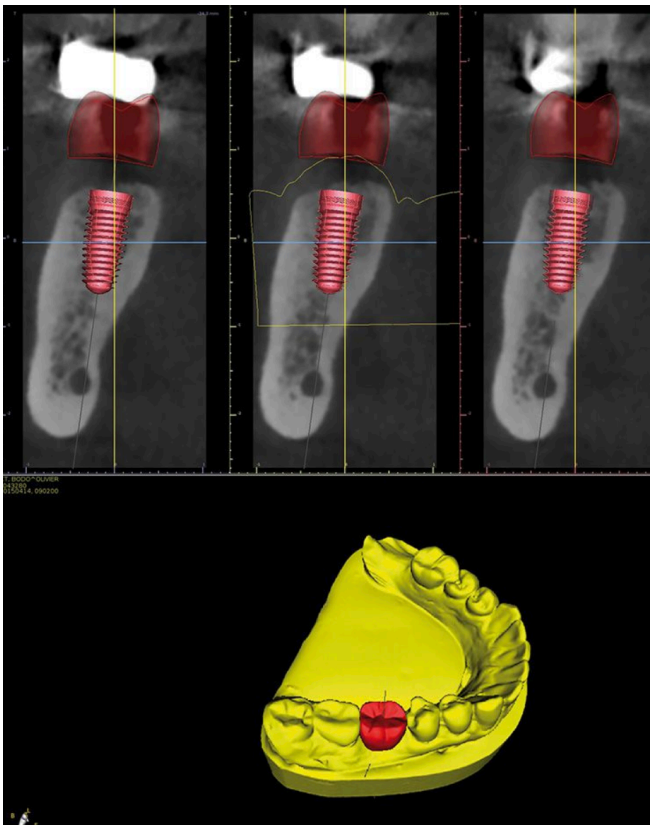

Photo 2 : Wax-up numérique et choix de la position de l'implant (d'après Brothier et Soenen 2017)

Conception du guide chirurgical :

- Délimitation de la partie inférieure du guide correspondant à la surface d'appui de celui-ci
- Exportation du guide au format STL vers le logiciel capable de modéliser la plateforme de l'imprimante et les supports de fabrication pour soutenir la pièce lors de l'impression 3D. Ce logiciel communique directement avec l'imprimante 3D et il permet le choix du matériau utilisé par l'imprimante (Photo 3).
- Lancement de l'impression :
    - Directement au cabinet si le praticien dispose d'une imprimante 3D de bureau
    - En laboratoire
- Post-traitement du guide après impression. (Photos 3, 4 et 5)

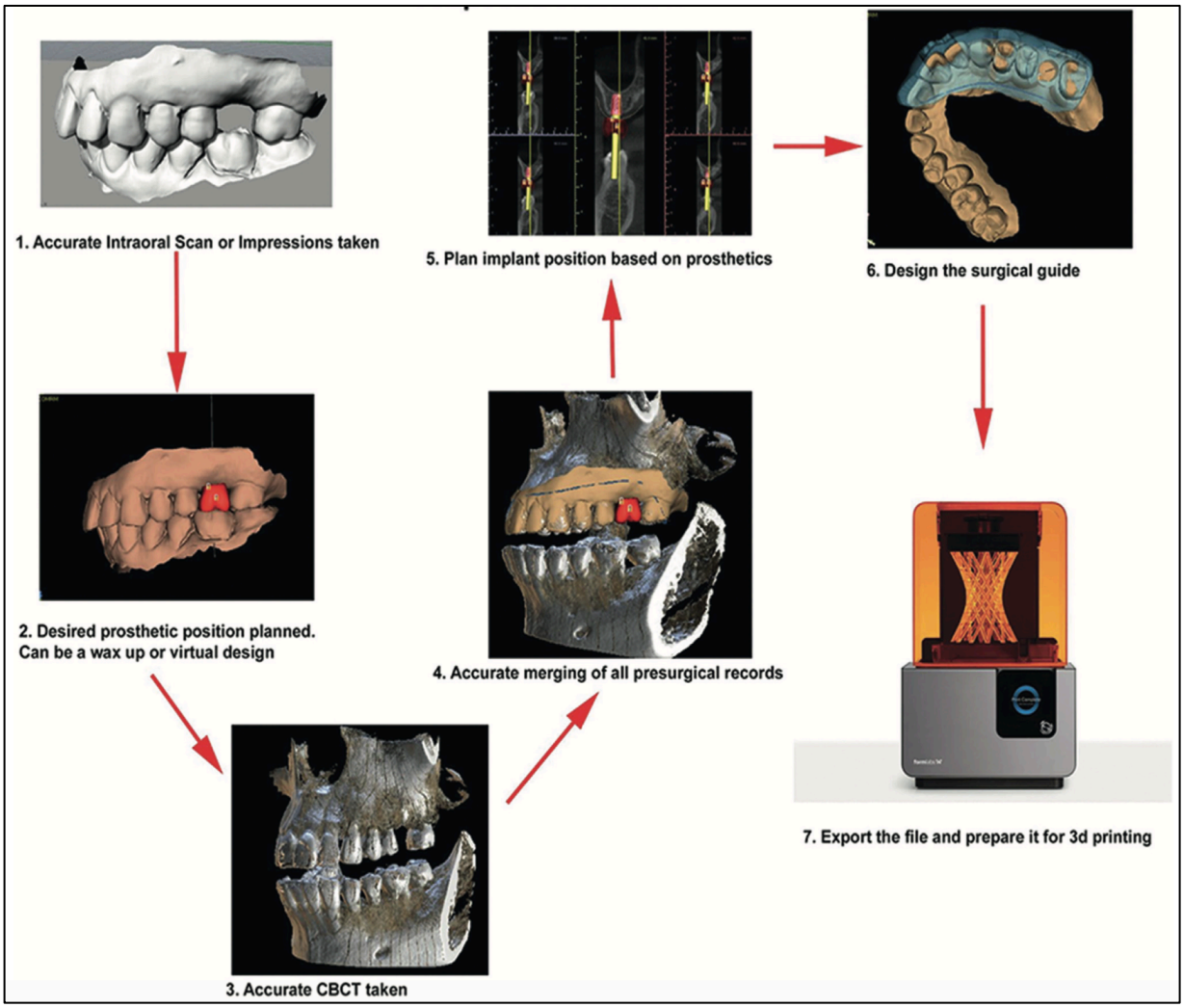

Figure 2 : Résumé du flux de travail proposé par le logiciel Blue Sky Plan pour la planification et la fabrication d'un guide stéréolithographique à appui dentaire (d'après Whitley et al. 2017)

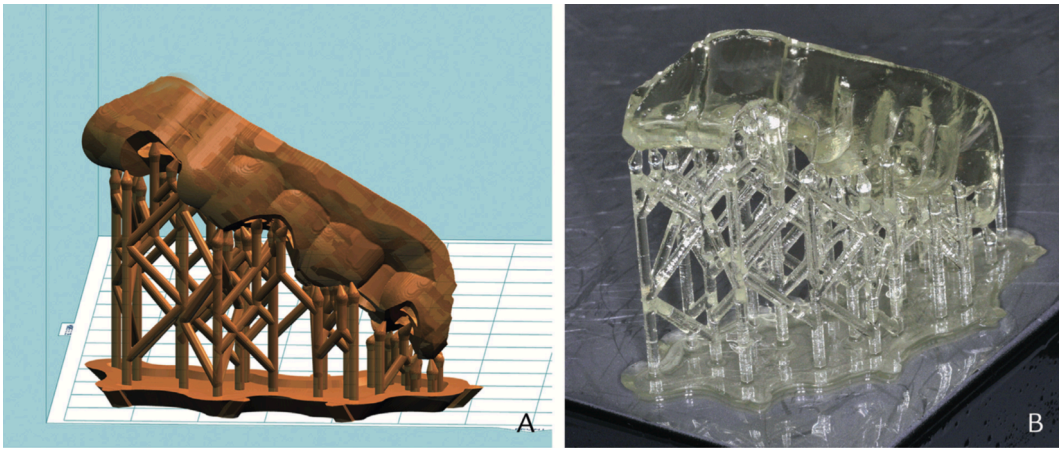

Photo 3 : A, orientation du fichier de conception du guide sur la plateforme de l'imprimante et préparation des supports pour l'impression. B, guide imprimé (d'après Whitley et al. 2017)

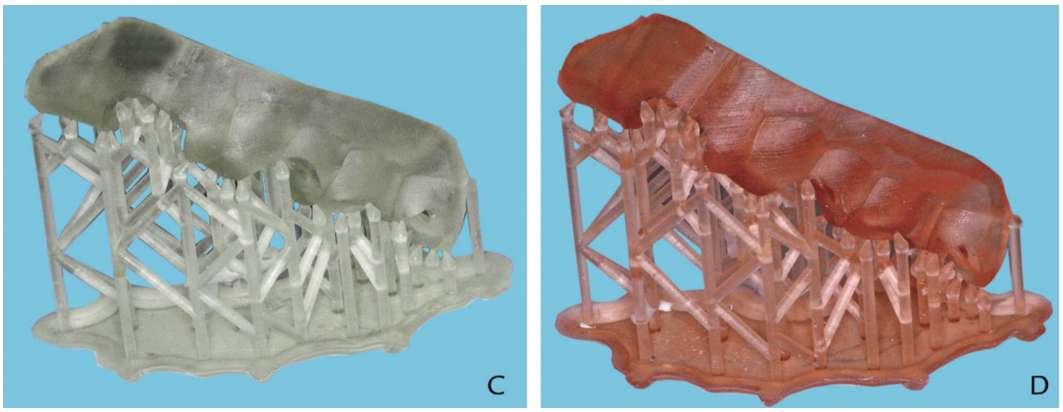

Photo 4 : C, Après 20 minutes dans un bains d'alcool. D, Après 10 minutes dans un four à polymérisation (d'après Whitley et al. 2017)

Photo 5 : Guide fini après post-traitement, retrait des supports, insertion de la douille métallique de guidage et stérilisation (d'après Whitley et al. 2017)

I-3-2- Processus de planification en fonction de la situation clinique

Pour les édentés totaux ou partiels de grande étendue, le protocole a de nombreuses similitudes avec la chirurgie guidée conventionnelle exposée plus haut. Un guide prothétique est essayé en bouche pour valider l'esthétique et la fonction. Un duplicata permettra de réaliser le guide radiologique et un double scan CBCT est effectué pour la planification : le 1er scan avec guide radiologique en bouche, le deuxième scan, guide radiologique seul. Ces guides reposeront exclusivement ou en grande partie sur la muqueuse d'une épaisseur non négligeable. Une empreinte optique de celle-ci et des dents restantes est réalisée.
On obtient la superposition des images des structures osseuses (1er scan), des tissus mous (empreinte numérique) et de la future prothèse (2ème scan) nécessaire pour guider la position des implants et conceptualiser le guide chirurgical.

I-4- Les différents types de guides chirurgicaux

Les informations issues de la planification servent de base à la fabrication des guides chirurgicaux. Ce dernier a concrètement pour objectif de guider les forets implantaires à travers un espace axial aménagé à cet effet (Tahmaseb et al. 2014).
On distingue trois types de guides chirurgicaux : les guides chirurgicaux à appui dentaire, muqueux et osseux. Parmi ces guides, on distingue également les guides pilotes permettant le passage uniquement du premier foret ainsi que les guides « totaux » (*Full guided*) permettant de passer toute la séquence de forets jusqu'à la pose de l'implant (Journel et Drouhet 2016).

I-4-1- Les guides chirurgicaux selon les tissus de soutien

I-4-1-1- Les guides à appui dentaire

Ce guide est destiné principalement au traitement des édentements partiels. Avec ce type de guide, les chirurgies peuvent être réalisées avec ou sans lambeau.
Il est le guide le plus simple à confectionner et à utiliser. La communauté scientifique s'accorde sur le fait qu'il est le guide le plus fiable (Journel et Drouhet 2016). Toutefois, les dents adjacentes qui servent d'appui au guide chirurgical ne doivent en aucun cas être mobiles. En effet, une pression non contrôlée lors du forage aura tendance à mobiliser les dents, et pourrait induire des déviations par rapport au projet initial. Il est également indiqué pour les édentements postérieurs libres à la condition que l'édentement soit inférieur à 30 mm.

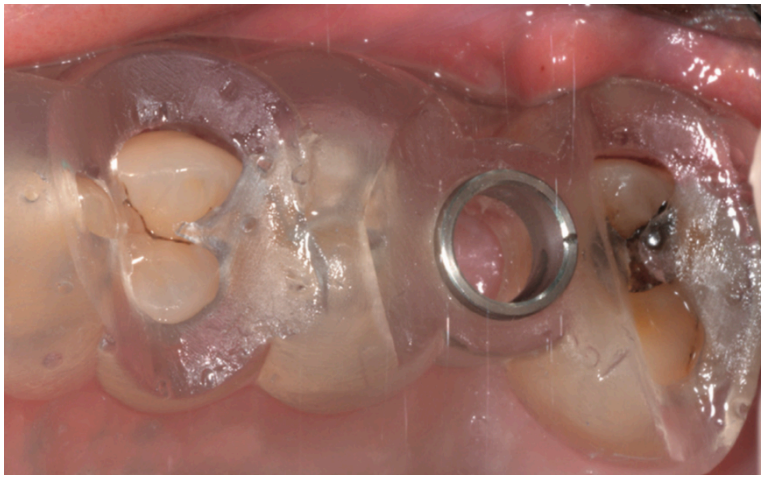

Photo 6 : Guide à appui dentaire
(d'après Whitley et al. 2017)

I-4-1-2- Les guides à appuis muqueux

Un guide chirurgical supporté par la muqueuse doit être contrôlé en bouche. Il est conçu pour une position unique qui facilite sa mise en place. Pour assurer la stabilité du guide chirurgical supporté par la muqueuse, une clé d'occlusion ou de positionnement occlusal est indispensable. La fixation du guide se fait à l'aide de vis trans muqueuses. Le principal avantage de ce guide est qu'il permet de réaliser une chirurgie minimalement invasive, et donc d'éviter d'avoir à réaliser un lambeau périosté. Il est souvent utilisé chez les édentés totaux.
À l'inverse des guides à appui dentaire et osseux, ce type de guide est légèrement moins précis (Journel et Drouhet 2016). La muqueuse dépressible représente une source d'erreur et l'anesthésie engendre des tuméfactions susceptibles d'entrainer des déviations.

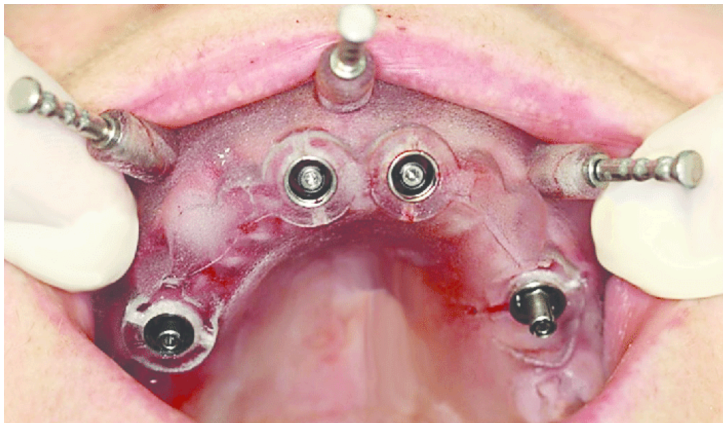

Photo 7 : Guide à appui muqueux avec vis de fixation
(d'après Borisov 2016)

I-4-1-3- Les guides à appui osseux

Les guides à appui osseux sont préconisés pour les édentements complets ou partiels de grande étendue si la levée d'un lambeau est indiquée. Il est placé en contact direct avec l'os. Le guide est positionné par une clé d'occlusion. Il est stabilisé par la mise en place de vis de stabilisation. Les guides chirurgicaux avec support osseux sont moins souvent utilisés, car ils requièrent la levée d'un lambeau de grande étendue pour le positionner et le stabiliser. Ce procédé est contraire à l'essence de la chirurgie guidée qui se veut être une technique peu invasive permettant de mieux appréhender les suites post-opératoires.

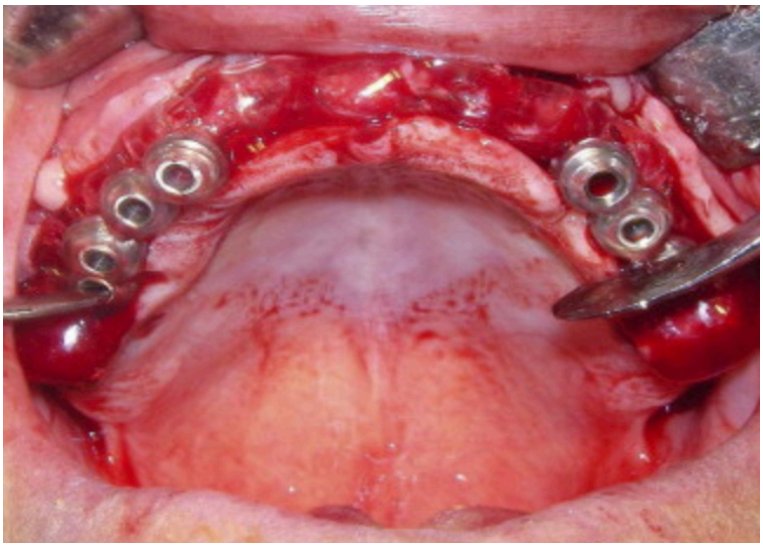

Photo 8 : Guide à appui osseux
(d'après Ozan et al. 2009)

I-4-2- Guidage « pilote » versus « guidage total ou *full guided* »

I-4-2-1- Les guides pilotes

Un guide pilote assure que le foret initial atteint l'angulation, la profondeur et la direction correcte dès le début de la chirurgie. Après avoir passé le foret initial, le guide pilote est retiré et le reste de la chirurgie se fait à main levée. Le guide pilote augmente la prévisibilité de la chirurgie implantaire. Il est facile à positionner, rapide à retirer et convient à toutes les marques d'implants. Toutefois, ce guide n'indique que l'emplacement idéal des implants sans mettre réellement l'accent sur l'angulation des forets, ce qui laisse trop de flexibilité dans le positionnement final de l'implant.

I-4-2-2- Chirurgie partiellement guidée

La chirurgie partiellement guidée s'effectue à l'aide d'un guide et d'une trousse de chirurgie guidée spécifique. Cette solution permet de faire la séquence de forage complète. Après la préparation guidée de l'ostéotomie, le guide est retiré et la mise en place de l'implant se fait à main levée.

I-4-2-3- Chirurgie entièrement guidée

La chirurgie entièrement guidée est similaire à la chirurgie partiellement guidée à la différence que la pose de l'implant s'effectue également au travers du guide. Elle contraint entièrement l'ensemble des angulations et la profondeur du forage ainsi que la mise en place de l'implant.

I-4-3- Précision des systèmes de chirurgie guidée

De nombreuses études se sont intéressées à la précision des systèmes de chirurgie implantaire guidée. La littérature définit la notion de précision comme la déviation entre la position prévue et la position réelle d'un implant posé.

Les déviations sont généralement mesurées :

- au niveau du col de l'implant (1) ;
- à l'apex de l'implant (2) ;
- profondeur du forage (3) ;
- angulaire que ce soit dans le sens vestibulo-lingual ou mésio-distal (4) ;

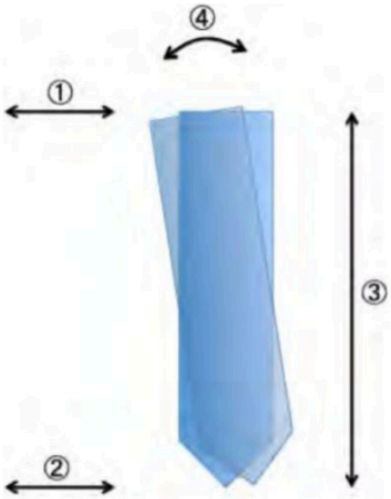

Figure 3 : Schéma illustrant les déviations possibles de l'implant (d'après Schneider et al. 2009)

II- IMPRESSION 3D : FABRICATION D'UN GUIDE

Ce chapitre a pour objectif de décrire l'impression 3D ; les différents procédés et les matériaux imprimables seront étudiés.

II-1- Définition et principes communs

II-1-1- Historique

La première imprimante 3D a été lancée en 1987 par Chuck Hull. Elle fonctionnait grâce à un procédé de "stéréolithographie" (SLA) (Ventola 2014).
À partir des années 1990 et 2000, d'autres technologies d'impression 3D ont vu le jour, dont les procédés FDM (Fused Deposition modeling) du fabriquant Stratasys et SLS (Selective Laser Sintering) de 3D Systems. Ces imprimantes, très coûteuses, étaient principalement destinées au prototypage industriel. Cela explique le fait que l'impression 3D soit devenue une technologie de fabrication industrielle. Lorsque les brevets de la technologie FDM ont expiré, les premières imprimantes 3D de bureau à faible coût ont fait leur apparition.
Depuis, cette date le marché de l'impression de 3D n'a cessé de croître. Entre 2015 et 2017, plus d'un million d'imprimantes 3D de bureau ont été vendues dans le monde.

II-1-2- Définition

L'impression 3D ou fabrication additive fait référence à tout processus de fabrication permettant de former ou de fabriquer des pièces 3D couche par couche à partir de données informatiques.
Cette technologie permet, à un particulier ou à une entreprise, la fabrication physique d'un produit directement après sa conception sur ordinateur par le biais d'une imprimante 3D (Stratasys 2018). La fabrication additive par opposition à l'usinage, n'utilise qu'une quantité de matière limitée à la production de l'objet souhaité. La perte de matériau est pratiquement supprimée et le coût de production est plus faible (Dupagne et al. 2016).
Le protocole d'impression 3D est constitué de plusieurs étapes. En premier, un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) est utilisé pour dessiner l'objet. Un fichier informatique dérivé est créé. L'ensemble de ces données CAO est utilisé pour préparer un fichier de Langage de Tessellation Standard (STL). Le fichier STL est ensuite découpé en centaines, parfois en milliers de couches 2D.

Puis, l'imprimante 3D entre en scène. Dans un premier temps, elle se charge de lire les couches 2D enregistrées dans le fichier STL. Ce protocole peut être assimilé à une lecture de blocs de construction que l'imprimante superpose les uns sur les autres. C'est cette étape qui permet la formation de l'objet tridimensionnel. L'épaisseur de chaque couche individuelle est déterminée en partie par la technologie, en partie par le matériau, et en partie par la résolution souhaitée (Stratasys 2018). Plus les couches sont épaisses plus les impressions sont rapides, les couches plus minces correspondent à une résolution plus fine.

II-1-3- Principe commun des différentes technologies d'impression 3D

Quelle que soit l'imprimante 3D utilisée, elles fonctionnent selon un schéma identique. Le protocole consiste en la conversion d'une maquette numérique en un objet physique par adjonction de matière. C'est la raison pour laquelle, l'impression 3D est fréquemment appelée fabrication additive (Tofail et al. 2018). En comparaison des technologies de fabrications dites soustractives, l'impression 3D est une façon totalement différente de produire des pièces. Pour les technologies soustractives, le protocole consiste à retirer de la matière contenue dans un bloc brut (Oberoi et al. 2018). A contrario, pour l'impression 3D, aucun outil spécifique n'est nécessaire. La pièce est ainsi fabriquée directement sur la plate-forme couche par couche, ce qui offre des avantages considérables bien que certains inconvénients existent (Chen et al. 2014).

Le fonctionnement d'une imprimante 3D peut varier selon le procédé. À titre d'exemple, les imprimantes FDM de bureau fondent des filaments de plastique et les déposent sur la plate-forme d'impression à l'aide d'une buse. À l'inverse, les grandes machines industrielles SLS utilisent un laser pour faire fondre ou fritter de minces couches de poudres composées de métal ou de plastique. Les matériaux utilisés varient selon le processus. Si les plastiques sont de loin les plus courants, les métaux peuvent aussi être imprimés en 3D. Les pièces produites peuvent présenter un large éventail de propriétés physiques spécifiques permettant d'obtenir des objets transparents ou encore caoutchouteux. Dans l'étude qui va suivre, nous aborderons ces différentes technologies.

II-2- Avantages de la fabrication additive en comparaison avec la méthode soustractive

Actuellement, la technologie de fabrication la plus couramment utilisée est la méthode soustractive dite de fraisage. Cette méthode de fabrication numérique produit des géométries complexes à partir d'un bloc de matériau en effectuant des coupes stratégiques au moyen d'une machine à commande numérique pour éliminer la matière non nécessaire. Cependant, des contre-indications existent et influencent considérablement la production. Les inefficacités potentielles de la fabrication soustractive sont généralement liées à la géométrie des objets produits. Plus la géométrie est complexe, plus la trajectoire de l'outil doit être précise. En présence de géométries et de contre-dépouilles de plus en plus développées, les outils ne sont pas suffisamment performants, ce qui entraine un fraisage compliqué, voire impossible. Deux scénarios sont alors envisageables : soit la pièce ne peut pas être fraisée, soit il y aura surfraisage.

Un surfraisage est constaté lorsqu'une quantité de matière plus importante que prévu est retirée parce que les outils n'ont pas pu accéder correctement. C'est le cas, par exemple, lorsqu'un détail interne intime d'une couronne est physiquement plus petit que le plus petit outil déployé par la fraiseuse. Il en résulte un surfraisage de ce détail, ce qui compromet la résistance, l'ajustement et la viabilité du produit et/ou du matériau (Alter 2016).

II-3- Technologies d'impression 3D

Il existe un large éventail d'imprimantes 3D. Elles ont recours à des technologies d'impression différentes. Elle permettent l'impression de fichiers numériques à l'aide de matériaux céramiques, métalliques, de cires ou encore de résine en utilisant des procédés uniques selon la technologie utilisée (Rebong et al. 2018).

Les procédés d'impression 3D les plus couramment employés en dentisterie peuvent être classés en 3 grandes catégories :

- Impression 3D par photopolymérisation ;
- Impression 3D par liage de poudre ;
- Impression 3D par dépôt successif de matière.

II-3-1- L'impression 3D par photopolymérisation

Cette technologie est basée sur l'utilisation de photopolymères liquides.

II-3-1-1- La Stéréolithographie (SLA)

La Stéréolithographie (SLA) est un procédé de fabrication additive qui crée des objets tridimensionnels à partir de résines liquides. Lorsque Charles Hull a breveté le procédé en 1984, il a, par la même occasion, inventé le terme "stéréolithographie". La SLA est aujourd'hui l'une des technologies de prototypage rapide les plus populaires dans la famille des processus de fabrication additive. La plupart des systèmes de fabrication additive exigent que le matériau de construction soit liquéfié, déposé en une couche ultramince et solidifié. Avec la SLA, les changements d'état sont inversés, ici le liquide devient solide.

L'appareil de stéréolithographie se compose d'un réservoir rempli de photopolymère liquide, d'un lit d'impression perforé, d'un laser ultra-violet et d'un fichier STL pour diriger le mouvement du laser et du lit d'impression. L'utilisation d'un réservoir rempli d'un photopolymère liquide a conduit à l'adoption du terme "photopolymérisation en cuve" pour décrire le procédé.

La plaque d'impression est immergée juste en dessous du niveau de la surface dans une cuve contenant de la résine liquide. Une source de lumière, laser en l'occurrence pour la SLA, solidifie la résine point par point. Une fois qu'une couche est terminée, le plateau s'abaisse de l'épaisseur de la couche suivante et le processus est répété pour former progressivement l'objet final (Dawood et al. 2015). Les supports qui ont été générés dans le logiciel de CAO et imprimés pour résister à l'action d'essuyage et de la pesanteur doivent être retirés du produit fini. Le posttraitement implique l'élimination de l'excès de résine ainsi qu'un durcissement dans un four UV (Dawood et al. 2015).

Les géométries des modèles déterminent si des structures de support sont nécessaires. Le procédé SLA n'utilise qu'un seul type de résine à la fois. Les supports sont composés du même matériau que celui utilisé pour créer l'objet et ne peuvent être dissous. Ils doivent être retirés mécaniquement.

L'avantage principal de la stéréolithographie est qu'elle permet de produire des objets très détaillés et durables avec des surfaces lisses. La résolution permise par le système de SLA, qui varie entre 20 à 50 microns offre la possibilité d'obtenir un tel degré de précision. C'est la raison pour laquelle les imprimantes SLA sont couramment utilisées dans la production industrielle de guides chirurgicaux imprimés en 3D (Dawood et al. 2015).

S'il est désormais possible d'imprimer des guides directement au cabinet c'est en partie parce que les prix des consommables et des imprimantes sont abordables et ne nécessitent que peu de place. Toutefois, le processus reste assez lent car les couches sont imprimées point par point contrairement à la technologie Digital Light Processing (DLP).

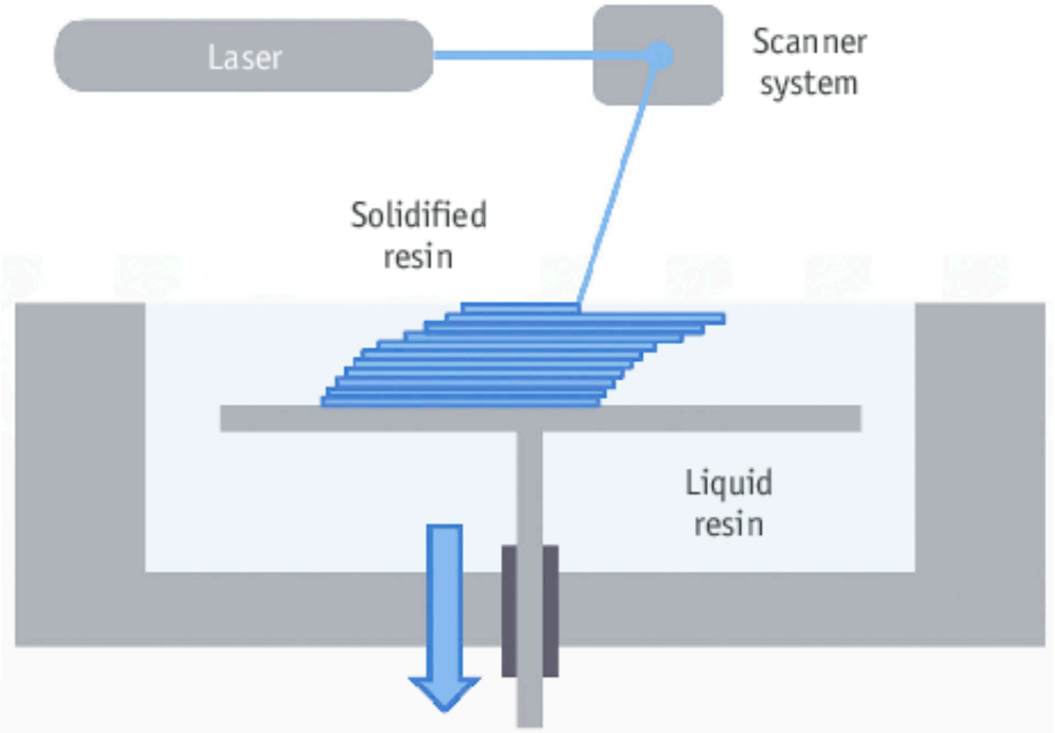

Figure 4 : Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'une imprimante stéréolithographique (d'après Bae Kim et al. 2016)

II-3-1-2- Procédé DLP (Digital Light Processing)

Le terme DLP repose tout comme la SLA sur le principe de la photopolymérisation. Une fois le modèle 3D envoyé à l'imprimante, une cuve de polymère liquide est exposée à la lumière d'un projecteur qui affiche ensuite l'image du modèle. Le polymère liquide exposé durcit et la plaque de construction se déplace. Le processus est répété jusqu'à ce que l'objet 3D soit complet et la cuve vidangée, révélant le modèle solidifié. Le protocole DLP est plus rapide que le protocole SLA. Il permet d'imprimer des objets avec une résolution élevée. La grande différence entre ces 2 procédés est la source lumineuse utilisée. En DLP, le projecteur émet des UV reproduisant la forme complète de la couche à photopolymériser et imprime couche par couche. Toutefois, le coût de ces imprimantes DLP est bien supérieur à celui des imprimantes 3D stéréolithographiques de bureau.

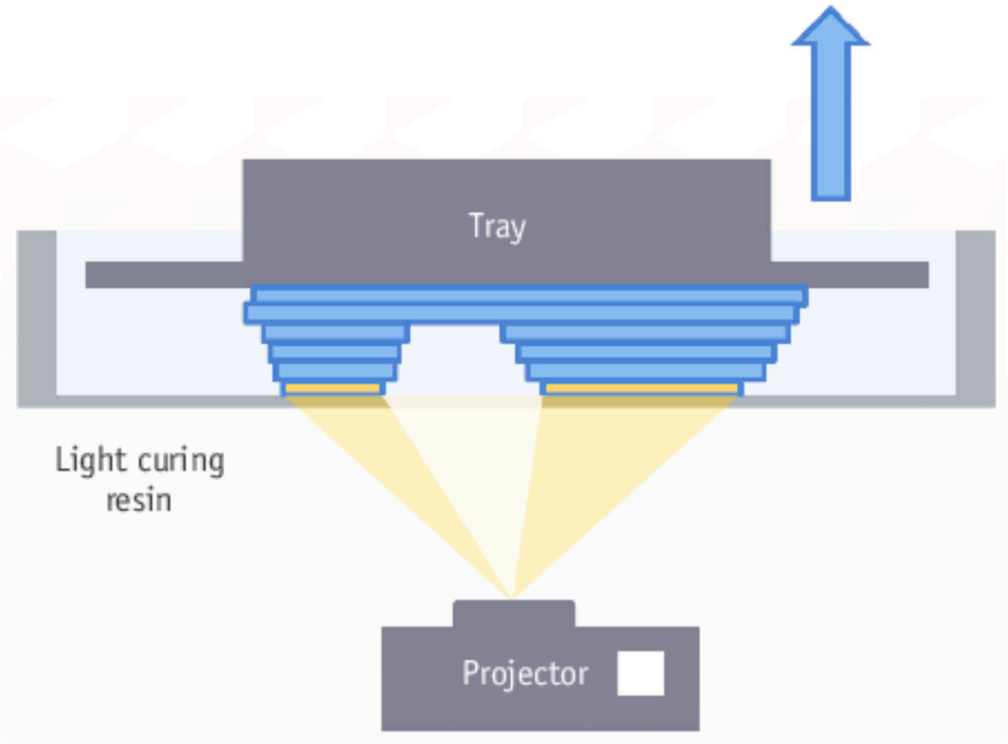

Figure 5 : Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'une imprimante DLP (d'après Bae Kim et al. 2016)

II-3-1-3- Polyjet ™

PolyJet est une imprimante dont le fonctionnement s'apparente à celui d'une imprimante de papier 2D (Ionita et al. 2014). Au même titre qu'une imprimante 2D qui dispose de minuscules gouttelettes de couleur sur du papier permettant de former des mots et des images, PolyJet utilise des buses à tête d'impression fine pour déposer des gouttelettes de matériau photopolymérisable en couches très fines d'une épaisseur de 16 microns. Cette finesse offre la possibilité de fabriquer des pièces détaillées. En même temps qu'il est déposé, le matériau est polymérisé par la lumière (Ibrahim et al. 2009).

La technologie PolyJet s'appuie sur les résines photopolymères. Cette variété de résines proposent un large éventail de propriétés : souples ou rigides, transparents ou opaques. PolyJet est l'un des deux seuls procédés d'impression 3D capable d'imprimer des pièces en couleur et c'est la seule technologie capable d'imprimer plusieurs matériaux simultanément permettant ainsi de fabriquer des pièces à la fois rigides et flexibles (Katkar et al. 2018). Mais cette technologie reste couteuse et encombrante.

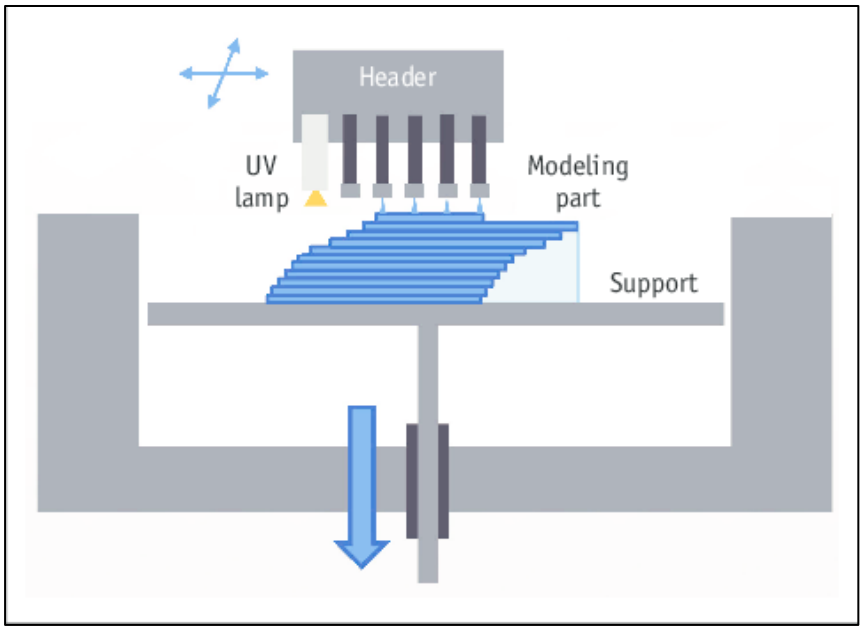

Figure 6 : Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'une imprimante DLP (d'après Bae Kim et al. 2016)

II-3-2- L'impression 3D par liage de poudre

Les technologies de fusion en lit de poudre produisent des pièces solides à partir d'une source thermique qui induit le frittage ou la fusion des particules d'une poudre plastique ou métallique, une couche à la fois.

II-3-2-1- Frittage sélectif par laser FSL/SLS (Selective Laser Sintering)

Le frittage sélectif est une technologie basée sur un laser et des matériaux en poudre tels que le plastique, le métal ou la céramique. Un faisceau laser lie sélectivement les particules entre elles dans un lit de poudre, en élevant la température au-dessus du point de transition vitreuse pour les plastiques. L'énergie dégagée par le laser permet d'agglomérer entre eux les grains de matière et de former une structure solide sans toutefois les fusionner. Le laser orienté par les paramètres déterminés par le logiciel d'impression vient tracer la couche à imprimer. Au fur et à mesure, le support s'abaisse progressivement et une nouvelle fine couche de poudre est répartie uniformément sur la surface (Ibrahim et al. 2009).

Le frittage sélectif par laser présente un certain nombre d'avantages. Contrairement à la stéréolithographie, des supports ne sont pas nécessaires, car la poudre non frittée supporte la pièce. Si les excellentes propriétés mécaniques des pièces SLS sont idéales pour la fabrication de pièces fonctionnelles et de prototypes, ces imprimantes restent très couteuses. Sur le plan logistique, seuls les systèmes SLS industriels sont actuellement largement disponibles. La technologie SLS est donc moins accessible. Enfin, les pièces SLS ont une finition de surface

granuleuse et une porosité interne pouvant nécessiter un post-traitement si une surface lisse et/ou une étanchéité sont requises.

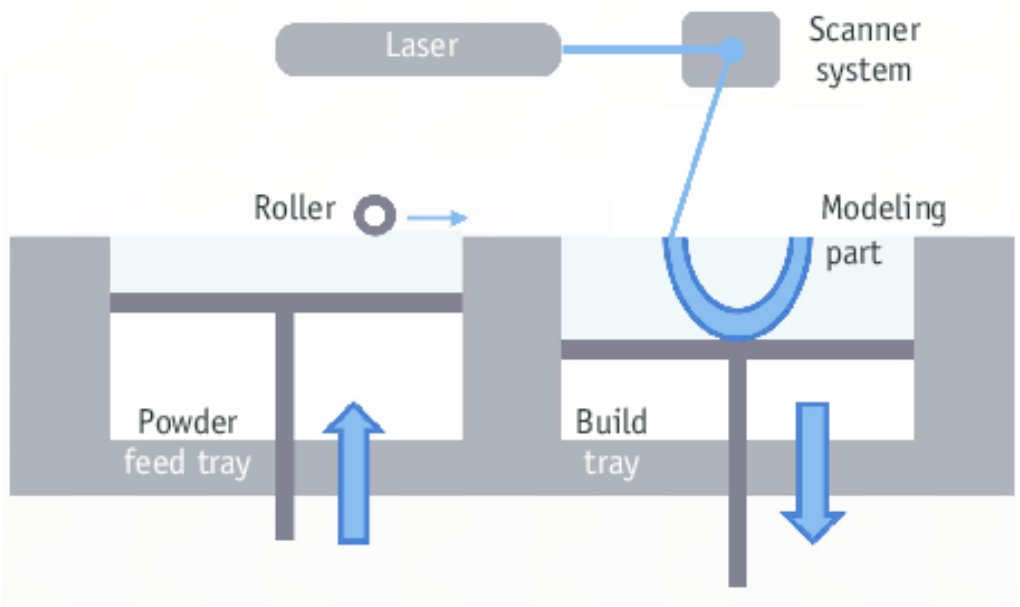

Figure 7 :Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'une imprimante SLS (d'après Bae Kim et al. 2016)

II-3-2-2- Les imprimantes 3D par fusion laser DMLS (Direct Metal Laser Sintering & SLM (Selective Laser Melting)

Les imprimantes 3D par fusion laser, DMLS et SLM utilisent un procédé proche de la technologie par frittage sélectif de poudre. La différence est que pour l'impression 3D par fusion laser, le matériau en poudre est fusionné et non simplement fritté (Aniwaa 2018).
La nuance entre les procédés DMLS et SLM est donc subtile. Tandis que SLM permet d'obtenir une fusion complète des particules de poudre, DMLS chauffe les particules métalliques jusqu'à ce qu'elles fusionnent au niveau moléculaire. Les imprimantes 3D SLM sont régulièrement employées dans le but de produire des pièces métalliques en aéronautique, mais aussi dans l'industrie dentaire pour la fabrication de couronnes et de châssis métalliques pour prothèses partielles (Newsdesk 2018).

II-3-2-3- 3DP technologie

L'impression 3D (3DP), aussi connue sous le nom de système d'impression à jet de liant, utilise une tête d'impression pour disperser sélectivement un liant sur une fine couche de poudre étalée sur un plateau à l'aide d'un rouleau. La tête d'impression délivre un agent liant qui lie les particules de poudre (Ibrahim et al. 2009). Aucune structure de support n'est nécessaire en 3DP, car c'est la poudre environnante qui en a la charge. Durant l'étape de finition, les surfaces du modèle construit sont infiltrées avec un matériau à base de cyanoacrylate afin de durcir la structure. Lorsqu'une couche est terminée, la plate-forme d'impression est abaissée d'une distance égale à une couche de matériau et le processus est répété jusqu'à obtention du produit fini.

II-3-3- L'impression par dépôt de matière fondue

II-3-3-1- FDM (Fused Deposition Modeling)

Le procédé FDM est un moyen simple et abordable de fabrication des biens de consommation personnalisés.

C'est actuellement la technologie de fabrication additive la plus répandue et la moins coûteuse. Pour obtenir la fabrication de l'objet souhaité, un filament thermoplastique passe au travers d'une tête d'impression chauffée et est déposé couche par couche sur la plate-forme de construction. Les imprimantes FDM font partie des imprimantes 3D de bureau abordables et disponibles dans le commerce (Jammalamadaka et Tappa 2018). Les imprimantes grand public sont limitées notamment sur le plan des matériaux mobilisables et produisent des objets de plus faible résolution. Il existe sur le marché des imprimantes FDM professionnelles et industrielles plus couteuses. Contrairement aux imprimantes FDM de bureau, elles utilisent une grande variété de matériaux et impriment à des résolutions supérieures au même titre que les imprimantes 3D Stratasys. Ces imprimantes FDM peuvent contenir plusieurs têtes d'impression pour imprimer plusieurs types de matériaux à la fois. Habituellement, parmi ces imprimantes multi têtes, l'une d'entre elles porte un filament de support qui peut être facilement dissous dans de l'eau. Le matériau de support sert en quelque sorte d'échafaudage, ce qui empêche aux surplombs et aux éléments complexes de s'effondrer pendant le refroidissement. La pièce est généralement prête à l'emploi juste après l'impression. Néanmoins, elle peut nécessiter une étape de post-traitement pour retirer les structures de support ou obtenir le lissage des surfaces. La précision, la solidité et la qualité du résultat final dépendent de l'épaisseur de la couche minimale offerte par l'imprimante 3D. Plus les couches sont fines, plus la résolution est

importante et le résultat précis. De plus, le maillage sélectionné est primordial, car en dépôt de fil fondu, les objets obtenus ne sont pas pleins contrairement à la stéréolithographie.

La technologie FDM offre de nombreux avantages. Elle est actuellement la plus rentable pour produire des pièces thermoplastiques et des prototypes sur mesure. Une large variété de matériaux thermoplastiques est proposée. Ce procédé est adapté à la fois au prototypage et à certaines applications fonctionnelles non commerciales. Toutefois, des inconvénients existent. La précision dimensionnelle et la résolution de la technologie FDM sont les plus faibles du marché de l'impression 3D. Elle ne convient donc pas à la production de pièces détaillées. Les pièces FDM sont susceptibles d'avoir des lignes de couches visibles ce qui implique généralement un posttraitement pour obtenir une finition lisse.

Actuellement, l'acquisition d'une machine FDM n'est pas très adaptée pour les cabinets dentaires. Il serait en effet préférable de privilégier une imprimante stéréolithographique, qui présente déjà des applications cliniques sur le marché (Dupagne et al. 2016).

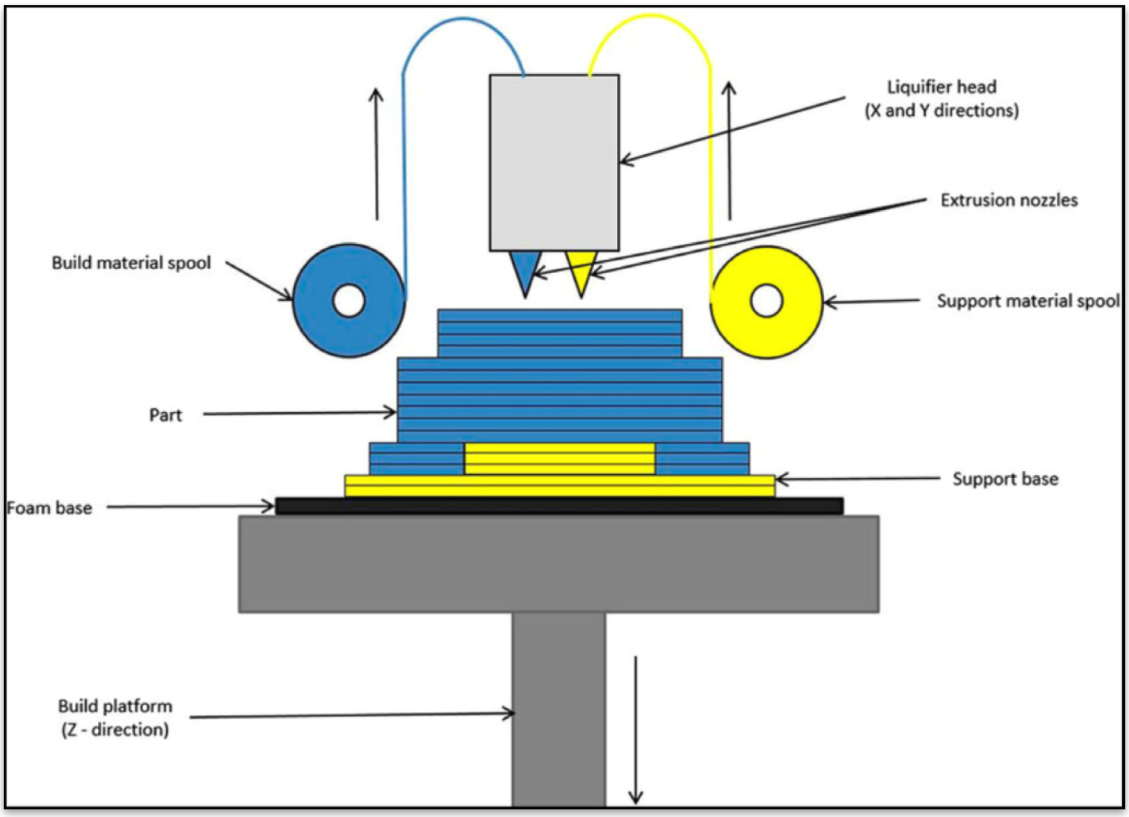

Figure 8 : Schéma illustrant le fonctionnement d'une imprimante FDM à 2 extrudeuses (d'après Mohan et al. 2017)

II-3-4- La bio-impression

La bio-impression utilise les principes de l'impression 3D pour fabriquer des tissus biologiques vivants à partir d'une encre biologique. Des gouttelettes d'encre biologique formées de couches successives vont se superposer permettant ainsi la formation d'un tissu en trois dimensions. La bio-impression est généralement catégorisée en trois types de technologies :

- L'impression par jet d'encre : projection des microgouttelettes d'un liquide contenant des cellules. L'éjection est provoquée par un procédé thermique ou piézoélectrique ;
- La bio-extrusion : des agrégats de cellules sont poussés mécaniquement à travers une micro-aiguille ;
- La bio-impression par laser : les motifs de la cellule sont obtenus par balayage laser à raison de 10 000 impulsions par seconde, chaque impulsion générant une microgouttelette.

II-3-5- Les matériaux d'impression

Les imprimantes 3D peuvent utiliser une large gamme de matériaux telles que les plastiques, les métaux, les céramiques, etc.
Actuellement, le matériau le plus populaire est le plastique, mais certaines imprimantes haut de gamme sont capables d'imprimer un large éventail de matériaux.

II-3-5-1- Les Polymères (plastiques)

Ils se prêtent à plusieurs procédés d'impression : le frittage, la stéréolithographie ou le dépôt de fil fondu.

II-3-5-1-1- L'ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)

L'ABS fait partie de la famille des "thermoplastiques" et est très répandu dans le secteur de l'impression 3D. Il est approprié pour la majorité des imprimantes grand public FDM (Oberoi et al. 2018). Par ailleurs l'ABS liquide est utilisé en stéréolithographie.
Robuste et proposé en différentes couleurs, l'ABS est aussi communément utilisé pour la production d'objets du quotidien, comme les jouets de la marque LEGO. Ses propriétés rendent l'ABS très adapté pour l'impression 3D. Il est nécessaire que l'imprimante puisse atteindre un point de fusion de 220°C.

II-3-5-1-2- Filament PLA (acide polylactique)

Le PLA est probablement le matériau le plus facile à travailler lorsque l'on commence à imprimer en 3D. C'est un matériau respectueux de l'environnement, car il s'agit d'un thermoplastique biodégradable dérivé de ressources renouvelables comme l'amidon de maïs et la canne à sucre. Il est biodégradable, mais les impressions se dégradent avec le temps. Il existe des filaments PLA antimicrobiens qui permettent d'éviter la prolifération des bactéries sur les objets imprimés.
Le PLA est destiné aux imprimantes de type FDM.

II-3-5-1-3- L'alcool polyvinylique (PVA)

Le PVA fait partie d'une nouvelle classe de matériaux d'impression 3D utilisés pour fabriquer des supports qui soutiennent les objets imprimés.
Polymère synthétique, le PVA est soluble dans l'eau. Il fond à environ 200 degrés Celsius et peut libérer des produits chimiques nocifs s'il est chauffé à des températures plus élevées.
Il peut être utilisé dans une extrudeuse d'imprimante 3D pour former des pièces qui supportent d'autres objets. Les parties PVA servant de support se dissolvent dans l'eau, laissant le reste de l'impression. Le PVA est plus ou moins couteux, autour de 100 euros/kg, et est destiné aux imprimantes 3D FDM industrielles avec plusieurs extrudeuses.

II-3-5-1-4- Résine développée pour l'impression 3D

La résine couvre une large gamme de matériaux d'impression 3D à fonctions multiples. La résine est employée par les technologies SLA, DLP et PolyJet.
La résine liquide atteint son état final lorsqu'elle est exposée à la lumière UV. En raison d'une sensibilité élevée à la lumière la résine doit être stocké en toute sécurité. De plus les résines liquides sont périssables.
Des résines biocompatibles sont commercialisées et destinées aux applications dentaires.
La production de guides chirurgicaux nécessite des biomatériaux biocompatibles qui n'induisent pas d'effets indésirables lorsqu'ils sont en contact avec les tissus.
La réponse des tissus mous buccaux aux matériaux dentaires conventionnels et soustractifs est bien documentée, alors que l'impact des résines utilisées par les imprimantes 3D SLA de bureau n'est pas encore totalement connu (Kurzmann et al. 2017).
Plusieurs sociétés telles que Formlabs ont créé leur propre résine dentaire professionnelle comme la résine Dental SG qui est une résine méthacrylique photo-polymérisable. Elle est

certifiée biocompatible de classe I (usage de moins de 24h en bouche) et autoclavable. La résine Dental SG est développée spécialement pour l'impression de guides chirurgicaux. Elle s'utilise avec l'imprimante stéréolithographique de bureau Form2.

Jusqu'à très récemment, les guides chirurgicaux imprimés par stéréolithographie étaient stérilisés à froid. Désormais, l'utilisation de ces nouvelles résines développées spécifiquement pour le secteur dentaire permet l'impression de guides chirurgicaux pouvant être stérilisés dans des autoclaves à vapeur standards, avec ou sans sachet sans affecter la stabilité dimensionnelle du guide. Toutefois, l'utilisation de cette résine présente de nombreuses restrictions et impose le respect des consignes du fabricant en ce qui concerne les étapes de post-traitement. Avant d'être stérilisé à chaud, le guide chirurgical doit être plongé dans un bain d'alcool isopropylique (produit inflammable et irritant) afin d'éliminer l'excès de résine liquide. Le guide est ensuite positionné dans un four à UV pour finaliser la polymérisation de la résine. L'utilisation de cette résine est donc très contraignante, de plus elle est vendue plus de 300 euros/kg.

À l'heure actuelle, très peu de matériaux imprimables sont approuvés par la FDA (Food and Drug Administration) pour une utilisation en bouche. Les plus courants sont les matériaux utilisés pour des contacts temporaires de courte durée, comme les guides chirurgicaux. Le développement et des essais sont en cours pour des matériaux biocompatibles à long terme.

D'autres résines créées spécifiquement pour l'industrie dentaire existent. Elles permettent l'impression de modèles d'études ou de travail ainsi que des gouttières orthodontiques et d'occlusion.

Les biomatériaux sont classés en classe I, IIa, IIb et III, en fonction de la durée et de la nature du contact ainsi que de leur origine chimique. Selon leur classement, les biomatériaux n'auront pas à subir les mêmes tests. Par exemple, les biomatériaux dentaires sont classés IIa et devront subir obligatoirement les tests suivants: génotoxicité, cytotoxicité, sensibilisation et implantation.

II-3-5-1-5- Le Nylon

Le terme nylon peut être utilisé pour n'importe quels polymères synthétiques. Créé à l'origine pour remplacer la soie, le nylon est un matériau résistant notamment à la traction. Il est bon marché car largement utilisé dans d'autres industries. Le nylon nécessite des températures élevées pour l'impression, 250 °C, ce qui est plus chaud que la plupart des extrudeuses. De plus, il est difficile de le faire adhérer à la table d'impression. En général, le nylon nécessite à

la fois un lit d'impression chauffé et de colle blanche. Il est compatible avec des imprimantes FDM.

II-3-5-1-6- Les cires

La cire est utilisée et exploitée dans des domaines comme la bijouterie ou l'industrie dentaire et permet la réalisation de produits en métal ou autres matériaux. C'est le procédé de fabrication par cire perdue. Dans le secteur dentaire il est possible d'imprimer en résine et cire calcinables pour la réalisation d'armatures métalliques, de couronnes coulées, de céramique pressée, de châssis métalliques ou encore d'attelles de contention.

II-3-5-2- Les poudres

Actuellement, les imprimantes 3D les plus modernes utilisent des matériaux en poudre pour fabriquer leurs produits. À l'intérieur de l'imprimante, la poudre est fondue et répartie en couches jusqu'à ce que l'épaisseur, la texture et les motifs désirés soient obtenus. Les poudres peuvent provenir de différentes sources et matériaux, mais les plus courantes sont :

II-3-5-2-1- L'alumide

Composé d'un mélange de polyamide (nylon) et d'aluminium, la poudre d'alumide permet d'obtenir des modèles imprimés en 3D très résistants. Reconnue pour son aspect granuleux et sablonneux, la poudre est fiable pour les modèles industriels et les prototypes.

II-3-5-2-2- Les métaux

Sous forme de poudre, les matériaux comme l'acier, le cuivre et les autres types de métaux sont plus faciles à transporter et à transformer dans les formes désirées. Comme pour les différents types de plastique utilisés en impression 3D, la poudre métallique doit être chauffée au point où elle peut être distribuée couche par couche pour arriver à une forme complète. Les imprimantes 3D métal utilisent la technologie de frittage de poudre ou de dépôt de filaments.

La recherche dans ce domaine s'est principalement concentrée sur l'utilisation de la technique additive SLS pour la production de structures métalliques en titane, en chrome cobalt et en alliages de nickel. Elle est venue démontrer que les structures produites sont biocompatibles et que la rugosité intrinsèque de surface aide à l'intégration des implants.

a) L'Aluminium

En raison de sa légèreté et de sa polyvalence, l'aluminium est aujourd'hui l'un des matériaux d'impression 3D le plus populaire. Il est généralement sous forme d'alliage. Les composants en aluminium peuvent présenter des parois minces et des géométries complexes. Ils sont très résistants aux contraintes mécaniques et aux températures élevées. Ils conviennent donc parfaitement aux prototypes à faible coût et aux modèles fonctionnels tels que les moteurs dans l'industrie automobile et aérospatiale.

b) L'acier inoxydable

L'acier est un matériau très résistant et peut être utilisé dans une grande variété d'applications industrielles voire dans le domaine artistique et du design. Ce type d'acier, qui contient également du cobalt et du nickel, est particulièrement résistant à la fracture. Il présente d'excellentes propriétés mécaniques et magnétiques. Ce matériau est principalement utilisé pour des applications industrielles.

c) Le cobalt-chrome (CoCr)

Robuste et particulièrement résistant à l'usure, il est utilisé dans la réalisation de prothèses médicales et dentaires.

d) Le titane

Favori des industriels pour son excellent rapport résistance/poids, le titane est aussi résistant à la corrosion. Certains alliages contenant du titane sont biocompatibles et donc utilisés pour imprimer des implants.

II-3-5-3- Les matériaux organiques

Les matières alimentaires, le bois et les tissus biologiques sont désormais utilisés dans le domaine de l'impression 3D.

II-4- Types d'imprimantes 3D

II-4-1- Imprimantes de bureau

Trois types d'imprimantes 3D sont disponibles et utilisées en milieu médical.
Les premières sont les imprimantes de bureau, dont les prix varient de quelques centaines à quelques milliers d'euros. Cette gamme d'imprimantes 3D correspond aux imprimantes commercialisées préassemblées, prêtes à l'emploi et principalement destinées à un public de particuliers ou de PME (Petites et Moyennes Entreprises) (Aniwaa 2018 ; Sireix 2017).
Elles offrent une précision plus faible que les imprimantes professionnelles et industrielles de 100 à 250 microns en moyenne. Il existe toutefois des imprimantes de bureau commercialisées pour un usage professionnel capables d'atteindre une précision inférieure à 100 microns. La plupart des imprimantes de bureau utilisent la technologie d'impression par dépôt de fil fondu (FFF /FDM). De plus en plus d'imprimantes 3D de bureau à résine sont basées sur les technologies SLA ou DLP.
Dans le secteur dentaire, elles sont essentiellement employées pour la confection de modèles, de guides chirurgicaux et de pièces calcinables (Sireix 2017).

Photo 9 : Imprimante de bureau stéréolithographique à usage professionnelle Form2 du fabriquant Formlabs

II-4-2- Imprimantes professionnelles

La deuxième famille d'imprimantes inclut des imprimantes professionnelles, dont le prix varie entre 10.000 et 100.000 €. Elles sont généralement mobilisées par les laboratoires de prothèse ayant un large volume de pièces à fabriquer. Elles impriment des matériaux polymères efficaces pour la fabrication de prothèses provisoires, de gouttières occlusales, de gouttières

orthodontiques, de modèles, de bases pour prothèses complètes en résine, de guides chirurgicaux, de portes empreintes individuels, de prothèses partielles métalliques et d'armatures métalliques de couronnes (Sireix 2017).

II-4-3- imprimantes industrielles

Enfin, la troisième famille d'imprimantes est composée des imprimantes industrielles, dont la valeur varie de 100 000 à 1 500 000 euros. Elles offrent la possibilité d'imprimer des objets en métal, en chrome/cobalt, en titane, en or, en zircone, en polymère ou encore en céramique. Elles sont réservées aux centres de production et de recherche et sont généralement utilisées pour la réalisation de prothèses métalliques, couronnes et armature céramo-métalliques. La fabrication additive d'armatures et de piliers implantaires associe deux procédés technologiques, l'impression 3D et l'usinage, qui offrent la précision requise pour la durabilité des prothèses implantaires (Sireix 2017).

II-5- Technologies d'impressions 3D utilisées en implantologie et applications

En implantologie, l'impression 3D doit être associée à d'autres technologies pour la fabrication de guides chirurgicaux, telle que la tomodensitométrie conique (CBCT), la conception assistée par ordinateur/la fabrication assistée par ordinateur (CAO/FAO).

Les trois techniques d'impression 3D les plus courantes en odontologie sont la stéréolithographie (SLA), le traitement numérique de la lumière (DLP) et l'impression par jet de matière (PolyJet). Chacune de ces techniques est capable de fournir la précision et les tolérances requises pour des applications cliniques, mais la qualité diffère d'un appareil et d'un système à l'autre.

Ces technologies permettent l'impression de modèles, de guides chirurgicaux, d'aligneurs orthodontiques et de gouttières occlusales (Oberoi et al. 2018). La photopolymérisation est le procédé le plus couramment utilisé pour les applications dentaires, car il présente plusieurs avantages, dont la rapidité de fabrication, la haute résolution, l'accessibilité, le faible coût, une finition de surface fine et lisse et la possibilité de créer des formes complexes.

Le procédé Polyjet est largement utilisé en dentisterie du fait de sa capacité à imprimer et à construire des pièces de différentes couleurs et propriétés physiques puisque les têtes d'impression peuvent être chargées avec de multiples matériaux, permettant ainsi la création de

modèles anatomiques avec une texture gingivale rose, des canaux nerveux et membranes sinusiennes ce qui est très adapté pour l'impression de modèles anatomiques pédagogiques pour apprécier l'anatomie, pratiquer la chirurgie avant l'intervention et informer le patient (Werz et al. 2018).

Les techniques d'impression à base de poudre, y compris SLS/DMLS/SLM/, sont utilisées en dentisterie depuis environ 10 ans. Elles utilisent couramment des alliages métalliques tels que le cobalt-chrome, le titane et les alliages d'acier inoxydable pour fabriquer des armatures de couronnes/bridges, des implants dentaires et des châssis métalliques de prothèses partielles. Le procédé additif SLS permet de créer des implants à géométrie complexe et à surface poreuse. Il a été démontré que cela augmentait l'ostéointégration et a été testé avec succès chez des patients (Katkar et al. 2018).

Les matériaux polymères couramment utilisés en SLS pour créer des modèles dentaires et des guides chirurgicaux sont des poudres de polyamides chargées de pigments. Les modèles SLS sont opaques, tandis que les modèles SLA sont translucides. La précision des guides chirurgicaux imprimés par stéréolithographie a été plus ou moins documenté dans la littérature, mais la précision des guides chirurgicaux SLS pour la mise en place des implants et les complications associées à leur utilisation ne sont pas connues (Giacomo et al. 2012).

III-ANALYSE DE LA LITTERATURE

III-1- Stratégie de recherche

L'objectif de cette revue de littérature est de déterminer l'efficacité et la fiabilité de l'impression 3D pour la conception de guide chirurgicaux en implantologie à travers une grille d'évaluation préalablement définie.

Les données et résultats exposés dans cette thèse s'appuient sur l'analyse d'articles scientifiques. La stratégie de recherche de ces articles a été menée par informatique à l'aide de la base de données The National Library of Medicine (MEDLINE, PUBMED). Le champ de recherche concerne uniquement des articles de revues indexés, rédigés exclusivement en anglais. Pour une meilleure compréhension, plusieurs dénominations de techniques d'impression 3D sont abrégées comme suit :

DLP : Digital light processing FDM : Fused deposition modeling

Les mots clés ou associations de mots-clés utilisés sont :

1. 3D printing OR additive manufacturing OR stereolithographic OR DLP OR FDM,
2. CAD/CAM surgical guide OR surgical template OR guided implant surgery OR Dental Implant,
3. Guided OR freehand.

1AND 2 AND 3

III-2- Sélection des articles

Au total 128 articles ont été identifiés dans la base de donnée. 87 articles ont été retenus après utilisation des filtres : «articles publiés dans les 5 dernières années », « écrit en anglais ».

Les critères d'inclusion utilisés ont été :

-Rapport de cas de plus de deux patients

-RCT (randomised clinical trial ou étude contrôlée randomisée)

-Études Comparatives.

-Études in vitro/in vivo

-Revue de la littérature

Les critères d'exclusions appliqués ont été:

-Rapport de cas

-Articles traitant de disciplines chirurgicales autre que l'implantologie orale.

-Articles ne portant pas uniquement sur les guides chirurgicaux à appuis dentaires. Chez l'édenté total, la qualité du montage dentaire, la dextérité du praticien et le seul appui muqueux rendent l'analyse des données complexes en l'absence de points fixes sur lesquels se fier cliniquement. En effet, **selon Gjelvold et al. 2108**, la précision peut être affectée par l'accumulation des erreurs ainsi que le type de tissus de support du guide, respectivement l'appui osseux, muqueux et dentaire.

Pour Journel et Drouhet 2016, le guide à appui dentaire est la solution de choix. Pour les édentés complets il s'avère plus pertinent de retenir un guide à appuis muqueux avec des vis de fixation. De nombreuses erreurs peuvent s'accumuler lors de la planification, les étapes d'élaboration du projet prothétique, de l'empreinte primaire à la réalisation du montage directeur, ainsi que la duplication de ce montage sont des sources d'imprécision significatives précédant la réalisation du guide.

Douze articles respectaient les critères d'inclusions et d'exclusions choisis.

Après lecture de L'article de SOMMACAL et al. de 2018, cet article ne répondait pas directement aux critères d'inclusion choisis. Ce dernier n'évalue ni la stabilité du guide, ni la position des implants. Cependant, l'étude réalisé par SOMMACAL avait pour objectif d'étudier les imperfections « intrinsèques » du guide directement après fabrication en fonction du type d'imprimante 3D utilisé. Ces imperfections peuvent avoir une répercussion clinique (bascule du guide/ adaptation sur les dents résiduelles, adéquation entre planification et position du forage implantaire), nous avons par conséquent choisis de l'inclure dans la revue réalisée.

III-3- Répartition des articles sélectionnés

Auteurs et date de parution de l'article	Journal et impact factor (selon ISI journal citation 2017)	Type d'étude
(Happe et al. 2018)	*International Journal of Computerized Dentistry 1.75*	Série de cas
(Tan et al. 2018)	*International Journal of Computerized Dentistry 1.75*	Etude comparative in vitro
(Bencharit et al. 2018)	*Journal of Oral and Maxillofacial Surgery 1.77*	Etude prospective
(Mangano et al. 2018)	*International Journal of Environmental Research and Public Health* 2.145	Etude prospective
(Bell et al. 2018)	*International Journal of Periodontics & Restorative Dentistry 1.15*	Étude comparative in vitro
(Gjelvold et al. 2018)	*The Journal of Prosthetic Dentistry 2.11*	Étude comparative in vitro
(Sommacal et al. 2018) compare	*The International Journal of Oral & Maxillofacial Implants 2.47*	Étude comparative in vitro
(Cristache and Gurbanescu 2017)	*International Journal of Dentistry 1.79*	Etude prospective
(Matta et al. 2017)	*Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery 2.03*	Étude comparative in vitro
(Lanis et al. 2017)	*International Journal of Computerized Dentistry 1.75*	Revue narrative
(Lee et al. 2016)	Journal of Advanced Prosthodontics 1.14	Étude prospective
(Kernen et al. 2016)	*clinical implant dentistry and related research 3.097*	Etude comparative in vitro
(Kühl et al. 2015)	*Clinical Implant Dentistry and Related Research*	Etude in vitro

Tableau 2 : Les 13 articles retenus dans la revue de littérature effectuée

L'efficacité et la fiabilité des systèmes de chirurgie guidée sont évalués selon les critères suivant:

1. Précision chirurgicale/ reproductibilité entre planification numérique et position de l'implant
2. Stabilité du guide
3. Coût de production
4. Transfert d'informations entre laboratoire et cabinet

III-4- Analyse des publications

III-4-1- Précision chirurgicale/ reproductibilité entre planification numérique et position de l'implant.

III-4-1-1- Précision : chirurgie guidée VS chirurgie à main levée

III-4-1-1-1- Tan et al. 2018 Essai comparatif randomisé de faible puissance

Étude	Nombre de patients	Protocole de planification	Type de guide	Protocole de mesure	Paramètres de résultat
(Tan et al. 2018)	30 modèles imprimés (EnvisionTEC) d'un cas d'édentement unitaire	Superposition DICOM (CBCT Gendex CB-500) /STL (Trios 3 ;3shape) avec le logiciel Implant Studio	Deux groupes : -pose des implants à l'aide d'un guide imprimé en 3D (Polyjet ;Stratasys OrthoDesk) -pose des implants à main levée (sans guide)	Superposition de l'empreinte optique des implants posés (position réelle) avec le fichier de planification	Mesures effectuées au niveau des implants : -au point d'entrée -à l'apex -angulaire -vertical

Tableau 3 : Caractéristiques de l'étude comparant la précision de la pose d'implant guidé par rapport à la pose d'implant à main levée

L'étude menée par Tan et ses collaborateurs (2018) a pour objectif de vérifier et de mesurer la précision de la pose d'un implant au travers d'un guide stéréolithographique obtenu par une planification réalisée en superposant les images d'un scanner intra-oral avec les images du CBCT dans un environnement in vitro. Les résultats obtenus par le biais de ce protocole numérique sont mis en perspective avec ceux obtenus dans le cadre d'un protocole de chirurgie à main levée. Les auteurs s'appuient sur le cas d'une 16 absente qui a été imprimé 30 fois. Chaque réplique est numérisée pour créer un modèle numérique 3D et radiographiée pour créer des données de tomographie par ordinateur à faisceau conique. Les données de surface et les données CBCT sont fusionnées pour faciliter la mise en place de l'implant.

Pour chaque cas, un guide chirurgical est imprimé. Les cas simulés sont assignés à deux groupes : le groupe A (guidé) et le groupe B (à main levée). Les implants sont placés, puis les modèles sont de nouveau scannés grâce à des *scan bodies*, permettant d'y associer l'analogue numérique de l'implant et obtenir la position réelle des implants. Les nouvelles données sont superposées et comparées aux fichiers initiaux. Les déviations angulaires, les déplacements de la tête, de l'apex et la profondeur sont évalués. Dans un premier temps, les auteurs observent que l'angulation des implants et le déplacement apical sont significativement plus proches de

la position prévue dans le groupe A (guidé) que dans le groupe B (à main levée). A contrario, les auteurs constatent que les déplacements de la tête des implants et la profondeur n'ont pas varié selon le protocole utilisé. Les résultats obtenus montrent que dans un environnement in vitro, le protocole numérique offre davantage de précision pour planifier et guider la pose d'implants que le protocole à main levée.

Type de chirurgie	Point d'entrée (mm)	Apex (mm)	Angle (°)	Verticale (mm)
Guidée	0,42	0,87	3,91°	0,32
Main levée	0,48	1,48	8,82°	0,17
Valeur de p	0,17	**0,001**	**0,005**	0,26

Tableau 4 : Déviations moyennes des implants posés en fonction du type de chirurgie réalisée (D'après Tan et al. En 2018)

III-4-1-2- Précision : *Fully Guided Surgery VS Partially Guided Surgery*

III-4-1-2-1- Bencharit et al. 2018 Etude comparative

Étude	Nombre de patients	Protocole de planification	Type de guide	Protocole de mesure	Paramètres de résultat
(Bencharit et al. 2018)	31 implants placés chez 16 patients	Superposition DICOM (CBCT i-CAT FLX V10)/ STL (3shape) avec le logiciel Implant Studio.	Deux groupes : - chirurgie entièrement guidée - chirurgie partiellement guidée	Superposition du CBCT post-opératoire avec le fichier de planification	Mesures effectuées au niveau des implants : -mésiale -distale -vestibulaire -linguale -angulation

Tableau 5 : Caractéristiques de l'étude comparant la précision de la chirurgie totalement guidée avec la chirurgie partiellement guidée

Bencharit et al. (2018) mènent une étude transversale dont l'objectif est de comparer la chirurgie implantaire partiellement guidée et la chirurgie implantaire entièrement guidée à l'aide de guides stéréolithographiques. Les auteurs ont recours à la méthode de la tomodensitométrie postopératoire afin de mesurer la précision de la pose de l'implant. Les écarts par rapport aux positions prévues sont identifiés comme les variables de résultats principales, les systèmes implantaires utilisés, le logiciel de planification et le secteur d'implantation sont considérés comme des variables de résultats secondaires. Les déviations mésiale, distale, vestibulaire, linguale, et angulaire sont mesurées.

Au total 31 implants sont posés, 20 entièrement guidés et 11 partiellement guidés. Les résultats présentés dans le tableau 6 montrent que les positions distales et angulaires sont significativement plus précises pour la chirurgie implantaire entièrement guidée.

Ils avancent que les systèmes implantaires et les logiciels de planifications utilisés n'ont que peu d'influence sur la précision de la pose de l'implant. Ils ajoutent que dans certaines situations, la chirurgie totalement guidée ne peut être mise en œuvre en raison d'un manque d'ouverture buccale ou du manque d'espace avec les dents adjacentes. En conclusion les auteurs recommandent aux praticiens d'avoir recours à des protocoles de chirurgie entièrement guidée dès que la situation clinique du patient le permet.

Type guidage	Mésiale (mm)	Distale (mm)	Vestibulaire (mm)	Linguale (mm)	Angle (°)
Entièrement guidée (N=20)	0,17 ± 0,78	0,44 ± 0,78	0,23 ± 1,08	0,22 ± 1,44	0,32 ± 2,36
Partiellement guidé (N=11)	0,33 ± 1,38	0,03 ± 1,59	0,62 ± 1,15	0,27 ± 1,61	0,59 ± 6,83°
Valeur de p	NS	**0,006**	NS	NS	**0,007**

Tableau 6 : Déviations moyennes des implants posés par chirurgie entièrement guidée et chirurgie partiellement guidée (D'après Bencharit et al. 2018)

III-4-1-3- Précision : Guides imprimés en 3D VS Guides fabriqués au laboratoire

Étude	Nombre de patients	Protocole de planification	Type de guide	Protocole de mesure	Paramètres de résultat
(Bell et al. 2018)	20 implants posés dans 20 modèles répliques d'un cas d'édentement unitaire	Superposition DICOM/ STL avec le logiciel Blue Sky Plan	-Imprimés en 3D (PolyJet ; StrataSys ; Objet30 Orthodesk) - guides thermoformés	Superposition des CBCT post opératoires (position réelle) avec le CBCT du modèle contrôle (position planifiée)	Mesures effectuées au niveau de l'implant : -déviations au point d'entrée -déviations à l'apex -déviations angulaire
(Matta et al. 2017)	13 patients	Superposition DICOM/ STL avec le logiciel CoDiagnostiX.	Guides imprimés en 3D (DLP) et guides thermoformés	Superposition des scanners de surface, des 2 types de guides entre eux pour mesurer les différences de position au niveau de la douille métallique de guidage	Mesures effectuées au niveau de la douille métallique de guidage : -déviations horizontales -déviations verticales -déviations angulaires
(Kernen et al. 2016)	8 mâchoires inférieurs de cadavre	Planification à l'aide d'un guide radiologique et du logiciel SMOP.	Guides imprimés en 3D (PolyJet, STRATASYS) et guides fabriqués au laboratoire	Superposition des empreintes optiques (position réelle estimée) avec le fichier de planification (position virtuelle)	Mesures effectuées au niveau de l'implant : -déviations au point d'entrée (M/D ;V/L ; Verticale) -déviations à l'apex (M/D ;V/L ;Verticale) -Déviations angulaires

Tableau 7 : Caractéristiques des études concernant la précisions des guides chirurgicaux en fonction de la méthode de fabrication

III-4-1-3-1- Bell et al. Etude comparative non randomisée

Bell et al. (2018) ont comparé la précision des guides chirurgicaux thermoplastiques et imprimés en 3D. Dans le cadre de cette étude, un cas clinique d'édentement unitaire est sélectionné. Une planification est réalisée afin de positionner l'implant. Un modèle dit « contrôle » est imprimé pour recevoir l'implant. Vingt duplicatas de ce modèle sont réalisés par la même imprimante 3D. Dix implants sont placés avec un guide chirurgical thermoplastique et les 10 autres avec un guide chirurgical imprimé en 3D. Au total 21 CBCT postopératoires sont réalisés et superposés au CBCT du « modèle contrôle » pour observer les déviations d'angulation et de position à la tête et à l'apex des implants. Les résultats présentés dans le tableau 8 montrent qu'il n'y a pas de différences angulaires statistiquement significatives entre les implants posés avec les différents guides. Cependant, les positions à la tête et à l'apex sont significativement plus précises pour les implants placés avec les guides chirurgicaux imprimés en 3D.

Les auteurs précisent que les déviations constatées peuvent être dues à une accumulation d'erreurs lors de la collecte des données ou bien encore lors de la fabrication par prototypage rapide. Ils notent que les propriétés mécaniques du guide chirurgical thermoplastique, plus flexible et moins rigide, peuvent expliquer les imprécisions dans la pose des implants.

Type de fabrication	Point d'entrée (mm)	Apex (mm)	Angle (°)
Guide imprimé en 3D	0,51+/- 0,24	0,75+/- 0,36	2,36°
Guide thermoformé	1,33+/-0,3	1,60+/- 0,29	3,40°
Valeur de p	**0,001**	**0,001**	0,143

Tableau 8 : Déviations moyennes des implants posés avec un guide imprimé en 3D ou thermoformé (D'après Bell et al. 2018)

III-4-1-3-2- Matta et al. Etude comparative non randomisée

L'étude de **Matta et al. (2017)** est menée pour déterminer l'impact de la méthode de fabrication sur la précision des guides chirurgicaux. Selon eux, la conception assistée par ordinateur et la fabrication assistée par ordinateur (CAO/FAO) via une imprimante 3D permettent de concevoir des guides chirurgicaux à faible coût. Ils relèvent que l'argument du coût réduit ne saurait influer négativement sur la qualité du guide chirurgical. Une même planification virtuelle est utilisée pour fabriquer deux types de guides : un guide chirurgical thermoformé par un prothésiste expérimenté et un guide imprimé en 3D. Cette procédure est répétée pour 13 patients qui forment l'échantillon. Un scanner industriel à lumière blanche est utilisé pour numériser les guides chirurgicaux sur le modèle en plâtre. Les déviations de la douille de guidage insérée dans le guide sont observées.

Les auteurs constatent que les deux méthodes de fabrication fournissent des guides significativement différents. Ils considèrent que chacune des deux méthodes est en mesure de transférer la localisation préétablie de l'implant à la situation clinique.

III-4-1-3-3- Kernen et al. Etude comparative non randomisée

Kernen et al. dans leur étude de 2016 tentent d'évaluer si les guides imprimés en 3D (D-temp) se distinguent des guides fabriqués en laboratoire (L-temp). Les guides L-temp sont fabriqués pour huit mâchoires cadavériques inférieures humaines à l'aide d'un logiciel de planification numérique en intégrant une brique Lego® (Groupe Lego, KIRKBI A/S, Billund, Danemark) comme élément de référence. Les guides numériques (D-temp) sont virtuellement conçus et imprimés en trois dimensions. La précision des deux guides pour chaque planification est évaluée en déterminant l'écart coronal, apical et angulaire estimé si des implants sont mis en place au travers de ces guides. Les implants ne sont pas posés. Les auteurs positionnent des tiges en titane dans les canons de guidage. Une empreinte optique est réalisée et les implants virtuels correspondants sont associés aux tiges en titane (équivalent digital du transfert et de l'analogue en empreinte conventionnelle).

Les résultats exposés dans le tableau 7 montrent que les différences entre les 2 guides sont significatives, avec une précision globale plus élevée pour les guides numériques en ce qui concerne les déviations mésiales/distales et verticales au point d'entrée et les déviations verticales à l'apex.

Les auteurs concluent que le positionnement des implants peut être amélioré grâce à l'utilisation de guides imprimés en 3D par rapport aux guides fabriqués au laboratoire qui utilisent des éléments physiques pour transférer la planification virtuelle à la situation clinique réelle.

Type de fabrication	Point d'entrée (mm)	Apex (mm)	Angle (°)
Guide imprimé en 3D	M/D : 0,31 V/L : 0,32 Verticale : 0,00	M/D : 0,16 V/L : 0,23 Verticale : 0,20	1,15°
Guide fabriqué au laboratoire	M/D : 0,31 V/L : 0,32 Verticale : 0,50	M/D : 0,50 V/L : 0,50 Verticale : 0,49	1,11°
Valeur de p	M/D : **0,009** V/L : 1,64 Verticale : **0,006**	M/D : 0,51 V/L : 0,103 Verticale : **0,006**	0,878°

Tableau 9 : Déviations moyennes des implants posés avec un guide imprimé en 3D et un guide fabriqué au laboratoire (D'après Kernen et al. 2016)

III-4-1-4- Précision d'un guide imprimé en 3D

III-4-1-4-1- Külh et al. Étude in vitro

Kühl et al. dans leur articles de 2015 suggèrent que l'impression 3D de guides chirurgicaux représente une alternative aux guides fabriqués en laboratoire. Ils ont cherché à déterminer la précision d'un guide chirurgical virtuellement conçu et imprimé (Polyjet ; Objet Eden 260 V, Stratasys Ltd) à l'aide du logiciel coDiagnostiX™.

Les modèles en plâtre et les données de planifications de 9 patients qui ont reçu une chirurgie guidée sont utilisés.

Après impression, les guides sont mis en place sur les modèles originaux équipés de références pour les mesures. Les positions des douilles de guidage sont déterminées à l'aide d'un scanner de surface et les écarts calculés comparés aux positions virtuelles.

Les canons présentent un écart tridimensionnel moyen de 0,22 mm au centre du sommet de la douille, de 0,24 mm au centre de la base de la douille et un écart angulaire moyen de 1,5°. Les auteurs estiment la déviation virtuelle moyenne à l'apex (0,49 mm) pour un implant de 10 mm si celui-ci avait été posé au travers des douilles métalliques.

Au vu des résultats, malgré les limites de cette étude, les auteurs suggèrent qu'une grande précision peut être obtenue en utilisant des guides imprimés pour la chirurgie implantaire guidée.

III-4-1-5- Précision des guides avec canon de guidage incorporé dans leur conception dit « *Sleeveless* »

Étude	Nombre de patients	Protocole de planification	Type de guide	Protocole de mesure	Paramètres de résultat
(Lee et al. 2016)	21 implants posés chez 11 patients	Superposition CBCT (PaX-Flex3D, Vatech)/ STL (scanner extra-oral)	Guides à canon incorporé à appui dentaire imprimés à l'aide d'une imprimante de bureau DLP (Perfactory ; EnvisionTEC)	Superposition du CBCT post opératoire (position réelle) avec le fichier de planification (position planifiée)	Mesures effectuées au niveau du pilier implantaire : - horizontale - verticale - angulaire
(Cristache et Gurbanescu 2017)	65 implants posés chez 25 patients	Superposition CBCT (Planmeca)/ STL (3Shape)	Guides à canon incorporé à appui dentaire imprimés à l'aide d'une imprimante de bureau DLP (Perfactory ; EnvisionTEC)	Superposition de l'empreinte optique avec piliers de numérisation (position réelle) avec le fichier de la planification	Mesures effectuées au niveau des implants : -au point d'entrée -à l'apex -angulaire -verticale

Tableau 10 : Caractéristiques des études concernant la précision de guides chirurgicaux imprimés en 3D avec canon de guidage incorporé dans leur conception

Photo 10 : Forets modifiés pour guides « *sleeveless* »
a : stop ; b :partie guide ; c : partie travaillante ;
(d'après Lee et al. 2016)

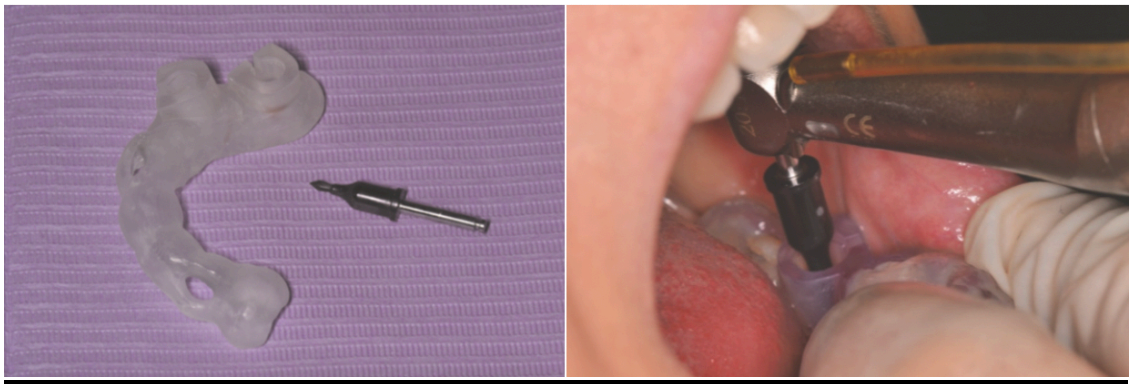

Photo 11 : Guide « *sleeveless* » (d'après Cristache et Gurbanescu 2017)

III-4-1-5-1- Lee et al. Étude comparative non randomisée

Lee et al dans leur étude de 2016 cherchent à déterminer la précision d'un système de chirurgie implantaire guidée nouvellement introduit qui offre une tolérance minimale des instruments. Ce protocole utilise des forets modifiés et un guide imprimé à l'aide d'une imprimante DLP. La conception de ce guide a la particularité d'incorporer dans son design le canon de forage. Ainsi, aucune douille métallique n'est insérée manuellement dans le guide.
Dans le cadre de l'étude, 21 implants sont posés chez 11 patients à l'aide de ce système. Après l'intervention chirurgicale, les écarts de position horizontale, verticale et les écarts angulaires entre les implants planifiés et les implants mis en place sont mesurés au niveau du pilier implantaire à l'aide d'un logiciel.
D'après les résultats observés dans le tableau 8, il n'existe pas de différence significative de position angulaire et horizontale mais les déviations verticales sont significativement plus importantes que les déviations horizontales.
En conclusion, les auteurs soutiennent que le système de chirurgie implantaire à guidage direct du foret fait preuve d'une grande précision pour la pose des implants.

	Horizontale (mm)	Verticale (mm)	Angulaire (°)
Guide imprimé en 3D	M/D : 0,593+/- 0,238 V/L : 0,691+/- 0,344	0,925 + /- 0,376	M/D : 2,024° +/- 0,942° V/L : 2,390° +/- 1,142°
Valeur de p	0,421	**0,018**	0,308

Tableau 11 : Déviations moyennes des piliers implantaires posés avec un guide imprimé en 3D (D'après Lee et al. 2016)

III-4-1-5-2- Cristache et al. Etude comparative non randomisée

L'étude de Cristache et al. de 2017 est menée pour déterminer le niveau de précision d'un guide stéréolithographique avec un canon de guidage dans son design sans douille métallique insérée. Des forets modifiés sont utilisés au travers du guide.

Les auteurs émettent deux hypothèses : Il n'existerait aucune déviation angulaire ou tridimensionnelle entre la position prévue de l'implant et la position de l'implant posé. Toutefois, si des écarts venaient à être constatés, aucun écart significatif ne saurait être relevé entre les implants maxillaires et mandibulaires.

Dans le cadre de l'étude, 65 implants sont posés. La comparaison se fait par la superposition de la planification avec l'empreinte numérique représentant la position réelle de l'implant en bouche.

Les résultats de l'étude présentés dans le tableau 12 révèlent une grande précision dans l'insertion des implants.

Les auteurs considèrent que la comparaison du projet avec l'empreinte numérique postinsertion est un moyen efficace pour déterminer la précision du guide chirurgical. Cette méthode permet d'éviter au patient une exposition supplémentaire aux rayonnements. Les auteurs concluent que l'utilisation d'un guide chirurgical 3D sans canon métallique permet une pose globalement très précise des implants. Toutefois, il existe des différences significatives entre les implants maxillaires et mandibulaires sur lesquels les écarts d'angulation et au point d'entrée sont significativement plus faibles.

	Point d'entrée (mm)	Apex (mm)	Angle (°)	Verticale au point d'entrée (mm)
Guide imprimé en 3D	0,79+/- 0,52	1,17 + /- 0,63	2,34° +/- 0,85°	0,5 +/- 0,38
Valeur de p	NS	NS	NS	NS

Tableau 12 : Déviations moyennes de la position des implants par rapport à la position planifiée (d'après Cristache et al. 2017)

III-4-1-6- Précision des guides imprimés en 3D selon le type d'imprimante 3D utilisé

Étude	Nombre de patients	Protocole de planification	Type de guide	Protocole de mesure	Paramètres de résultat
(Gjelvold et al. 2018)	20 implants posés dans 20 modèles répliques d'un cas d'édentement unitaire	Entièrement numérique : superposition CBCT (ProMax Planmeca)/ STL (3Shape)	Guides imprimés par 2 imprimantes de bureau différentes : -DLP (Envisiontech) -SLA (Fromlabs)	Superposition de l'empreinte optique à l'aide de piliers de numérisation (position réelle) avec le fichier de la planification	Mesures effectuées au niveau de l'implant : -au point d'entrée -à l'apex -angulaire -vertical -rotationnelle de l'hexagone de l'implant
(Sommacal et al. 2018)	8 patients, 2 types de guide pour chaque cas	Non renseigné	Guides imprimés par 2 imprimantes 3D différentes : -FFF grand publique (Replicator, MakerBot) -DLP professionnelle (Perfactory ; EnvisionTEC)	Superposition des scanner de surface des 2 types de guide positionnés sur le modèle avec le fichier numérique issue de la planification et qui a servi pour l'impression	Mesure des différences maximales et minimales entre le fichier de conception virtuelle du guide et les guides imprimés

Tableau 13 : Caractéristiques des études concernant la précision des guides chirurgicaux fabriqués à partir d'imprimante 3D différentes

III-4-1-6-1- Gjelvold et al. Étude comparative non randomisée

L'étude menée par Gjelvold et al (2018) vise à évaluer l'ampleur des déviations de position des implants après l'utilisation de guides chirurgicaux imprimés via deux imprimantes 3D de bureau différentes à partir d'un flux de travail numérique similaire. Les modèles sélectionnés sont l'imprimante « DLP » et l'imprimante « SLA ». Les auteurs émettent l'hypothèse selon laquelle le modèle de l'imprimante 3D n'influe pas sur la précision des guides chirurgicaux. Dans le cadre du protocole d'étude, un modèle maxillaire avec une dent manquante est dupliqué en 20 exemplaires. Puis, les modèles sont divisés en 2 groupes et affectés à l'imprimante « DLP » et à l'imprimante « SLA ». Les guides chirurgicaux sont ensuite imprimés. La pose des implants est réalisée, une empreinte numérique est effectuée à partir de piliers de numérisation pour représenter la position réelle des implants sans avoir recours à un CBCT post-opératoire. Les déviations par rapport au projet initial sont calculées selon différentes modalités de mesures : au point d'entrée, à l'apex, angulaire, horizontale et verticale.

Les résultats présentés dans le tableau 9 montrent des différences significatives notamment au point d'entrée et au niveau de la position verticale des implants avec un écart moyen inférieur pour le groupe affecté à l'imprimante DLP. Les auteurs expliquent que ces différences peuvent être la conséquence d'un protocole de post-traitement plus long pour les résines utilisées par l'imprimante SLA ayant pu engendrer des déformations mineures. Ils considèrent que les imprimantes 3D de bureau testées sont capables de produire des guides chirurgicaux engendrant des déviations implantaires globalement similaires bien que l'une des deux imprimantes soit plus fiable.

Type de fabrication	Point d'entrée (mm)	Apex (mm)	Angle (°)	Vertical (°)
Guide SLA	0,39 ± 0,01	0,49 ± 0,17	1,25 ± 0,49	0,34 ± 0,18
Guide DLP	0,27 ± 0,08	0,34 ± 0,14	0,99 ± 0,57	0,16 ± 0,11
Valeur de p	**0,023**	0,063	0,280	**0,009**

Tableau 14 : Déviations moyennes de la position des implants par rapport à la position planifiée (d'après Gjelvold et al. 2018)

III-4-1-6-2- Sommacal et al. Étude comparative non randomisée

Sommacal et al. (2018) mènent une étude comparative afin de déterminer la précision d'une imprimante tridimensionnelle grand public à filament fondu (FFF) par rapport à une imprimante professionnelle (DLP). Les auteurs mettent en exergue le fait qu'il n'existe pas dans la littérature de données analysant la disponibilité, l'accessibilité et la rentabilité des imprimantes 3D utilisées pour la chirurgie guidée. À l'heure actuelle, aucune recommandation ou ligne directrice sur les caractéristiques minimales requises des imprimantes 3D destinées à la chirurgie guidée n'ont été émises.

Pour mener à bien leur étude, huit patients sont sélectionnés. Une planification implantaire est mise en œuvre, ce qui permet d'obtenir 8 fichiers STL nécessaires à la fabrication des guides chirurgicaux. Par la suite, deux imprimantes 3D sont sélectionnées : l'imprimante « FFF » et l'imprimante « DLP ». L'imprimante « DLP » est une imprimante professionnelle d'une valeur marchande de 85 000 €. L'imprimante « FFF » est une imprimante grand public d'une valeur marchande de 2 800 €.

Les guides « FFF » sont imprimés en PLA (acide polylactique), les guides « DLP » le sont à l'aide d'une résine spécifique commercialisée par le fabricant de l'imprimante.

Les auteurs cherchent à observer et expliquer les différences et imprécisions constatées. Les guides sont scannés et les fichiers obtenus superposés avec les fichiers virtuels de planification. D'autres facteurs sont pris en compte. Sommacal et al. comparent la dose létale 5O ld50 des 2 matériaux, le prix d'achat des imprimantes ainsi que le prix des matériaux utilisés.
Le coût en résine des guides « DLP » est de 4,47 euros. Celui des guides « FFF » est de 0,50 centime d'euros.
Les auteurs constatent que les guides DLP sont significativement plus précis. Les guides FFF présentent tellement d'imprécisions qu'ils n'ont pas pu être repositionnés sur les modèles.
Il faut noter que les guides DLP ont été confectionnés par le fabriquant alors que les guides FFF ont été imprimés par les auteurs.

En conclusion les imprimantes « FFF » grand public ne sont pas assez précises pour l'impression des guides chirurgicaux.

III-4-2- Stabilité du guide

III-4-2-1- Mangano et al. Etude prospective

Étude	Nombre de patients	Protocole de planification	Type de guide	Paramètres de résultat
(Mangano et al. 2018)	38 implants posés chez 20 patients	Superposition CBCT (CS 9300®) /STL (CS 3600®, Carestream Dental) avec le logiciel SMOP®	28 Guides stéréolithographiques à appuis dentaires imprimés à l'aide d'une imprimante stéréolithographique de bureau (XFAB2000®, DWS).	-Ajustement et stabilité -durée de la chirurgie -complication per et post opératoire -stabilité et survie des implants

Tableau 15 : Caractéristiques de l'étude de Mangano et al. 2018)

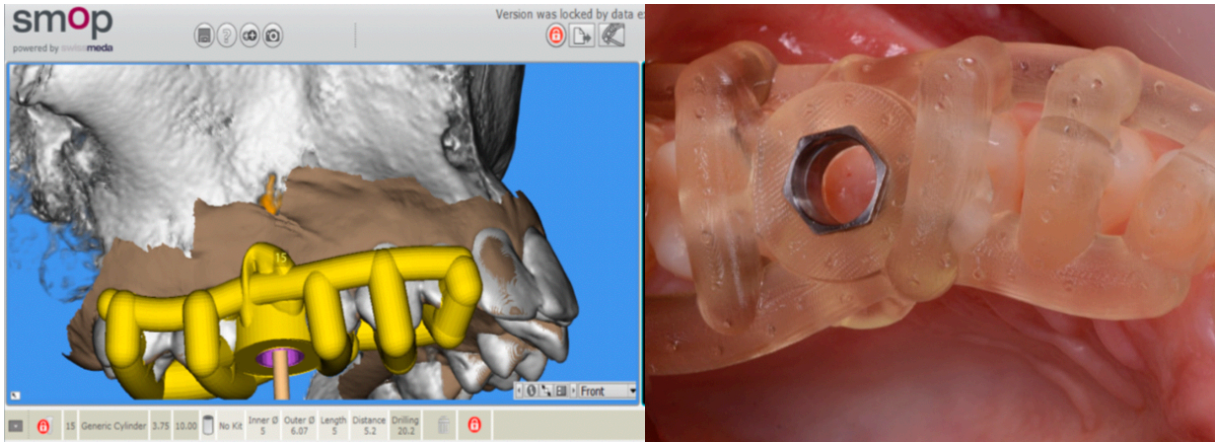

Photo 12 : Guide ouvert à supports dentaires sélectifs
(d'après Mangano et al. 2018)

Mangano et al. dans leur étude de 2018 exposent les résultats obtenus avec des guides chirurgicaux à appuis dentaires au design ouvert innovant fabriqués avec une imprimante 3D stéréolithographique de bureau (SLA). L'acquisition des images, la fabrication du guide et la chirurgie sont réalisées au cabinet à l'aide du logiciel SMOP®.

Un scanner intra-oral et un CBCT sont utilisés pour obtenir les tissus mous et durs de chaque patient. Les chirurgies sont réalisées et les patients suivis pendant une période d'un an. Les résultats de l'étude sont : l'ajustement et la stabilité des guides chirurgicaux ; la durée de la chirurgie ; les complications per et postopératoires ; ainsi que la stabilité et la survie des implants.

38 implants sont posés chez 20 patients à l'aide de 28 guides chirurgicaux imprimés en 3D.

Parmi les guides chirurgicaux, 24 présentent un ajustement et une stabilité optimales, trois présentent un ajustement optimal et une stabilité suffisante, et un seul présente un ajustement inadéquat et une stabilité insuffisante. La durée moyenne des interventions est de 15,7 ± 5,2 min. Aucune complication per-opératoire n'a été signalée, mais un implant n'était pas stable au moment de la pose et a dû être retiré. Le taux de succès à 1 an était de 100%.
La conception et la fabrication des guides sont essentielles. Un design inadapté du guide ne permet pas d'obtenir une bonne stabilité même si une imprimante industrielle 3D performante est utilisée pour sa fabrication. La chirurgie guidée réalisée entièrement au cabinet avec des guides ouverts, à supports dentaires sélectifs semble représenter un protocole fiable et reproductible.

III-4-3- Transfert d'informations entre laboratoire et cabinet

III-4-3-1- Happe et al. Série de cas

Dans leur article de 2018, Happe et al. décrivent et discutent des options disponibles pour la planification implantaire numérique et la chirurgie guidée.
Ils ont dégagé 3 protocoles différents du plus traditionnel au plus récent avec le tout numérique :
— transfert des informations à partir d'un wax up diagnostic vers un guide radiologique ;
— superposition des images du CBCT avec les images d'un scanner de surface ;
— création d'un wax up numérique ;

III-4-3-2- Lanis et al. Revue narrative

Lanis et al. (2017) partent du principe selon lequel l'utilisation de l'ingénierie numérique en médecine permet d'améliorer la mise en œuvre des traitements. L'utilisation d'un logiciel de planification implantaire permet de combiner les domaines radiographiques, prothétiques, chirurgicaux et de laboratoire dans un scénario virtuel commun. Le chirurgien dispose d'une planification virtuelle complète du traitement.
Lanis et al. proposent et émettent des recommandations afin de guider le choix du flux de travail numérique approprié en fonction de la situation clinique pour obtenir une planification précise.
-Première situation : patients partiellement édentés avec suffisamment de références occlusales pour un wax-up virtuel ;
-Deuxième situation: patients partiellement édentés ou complètement édentés ne disposant pas de références occlusales suffisantes pour un wax up virtuel ;

-Troisième situation: patients partiellement édentés sans références occlusales suffisantes, où les dents seront extraites pour une implantation immédiate.

Pour ces deux derniers cas, une étape de laboratoire est nécessaire même si les guides chirurgicaux finiront par être imprimés en 3D.

III-5- Synthèse de la revue de littérature

III-5-1- Les intérêts de la chirurgie guidée

— Sécurité, confort :

L'amélioration de la précision lors de la pose de l'implant grâce à l'utilisation d'un guide chirurgical est cliniquement pertinente. Le guide chirurgical sécurise le geste du chirurgien et assure un positionnement précis de l'implant. Il permet d'éviter d'endommager les structures vitales tout en optimisant le volume osseux disponible (Kühl et al. 2015; Gjelvold et al. 2016; Kernen et al. 2016; Lee et al. 2016; Cristache et Gurbanescu 2017; Lanis et al. 2017; Matta et al. 2017; Bencharit et al. 2018; Happe et al. 2018; Mangano et al. 2018; Sommacal et al. 2018; Tan et al. 2018).

La littérature met en exergue les nombreux avantages de la chirurgie guidée : respect des structures anatomiques et examen approfondi de la topographie osseuse, réduction du temps d'intervention chirurgical tout en la rendant moins invasive, résultats prothétiques optimaux (Bencharit et al. 2018; Mangano et al. 2018).

La chirurgie guidée permet le recours à une chirurgie dite « *flapless* » (sans lambeau). Le choix d'un tel protocole contribue à améliorer le confort, la satisfaction du praticien et du patient avec des suites postopératoires moins lourdes.

— Précision et reproductibilité :

La précision d'un système de chirurgie implantaire guidée est définie comme l'écart entre la position prévue et la position réelle d'un implant posé (Gjelvold et al. 2016; Kernen et al. 2016; Cristache et Gurbanescu 2017; Matta et al. 2017; Bell et al. 2018; Bencharit et al. 2018).

L'association de la planification 3D et de la fabrication assistée par ordinateur (CAO;FAO) permet de transférer la position virtuelle des implants vers le site opératoire grâce à l'assistance de guides chirurgicaux (Kühl et al. 2015; Kernen et al. 2016; Lee et al. 2016; Cristache et Gurbanescu 2017; Lanis et al. 2017; Matta et al. 2017; Bell et al. 2018; Happe et al. 2018; Mangano et al. 2018).

L'étude menée par Tan et al. 2018 cherche à comparer, dans un milieu in vitro, la précision de la chirurgie guidée numérique par rapport à la chirurgie à main levée. Les résultats de l'étude

démontrent l'utilité clinique des guides chirurgicaux pour des édentements partiels. Selon les auteurs, la mise en place de l'implant à l'aide d'un guide contribue à améliorer sensiblement le transfert des positions virtuelles par rapport à une pose à main levée. Néanmoins, les implants posés à main levée peuvent être placés avec une grande précision. Les auteurs préconisent de privilégier la chirurgie guidée notamment pour les praticiens inexpérimentés (Tan et al. 2018). La chirurgie guidée semble donc rendre l'implantologie moins « opérateur dépendante » lorsqu'elle est mise en œuvre à l'aide de guides stéréolithographiques (Bell et al. 2018; Bencharit et al. 2018; Tan et al. 2018).

Les auteurs relèvent toutefois l'importance d'une maitrise totale de l'implantologie et être en mesure de se passer du guide si besoin (Happe et al. 2018). Si l'utilisation d'un guide chirurgical permet de poser les implants dans des positions proches de celles planifiées, des déviations sont systématiquement observées.

D'autres auteurs rappellent que l'utilisation de guides chirurgicaux 3D s'inscrit dans un processus global d'acquisition de données numériques en accord avec le concept du « prothétiquement guidé » (Cristache et Gurbanescu 2017). La possibilité de « virtualiser » l'ensemble des données cliniques, notamment les tissus mous et les tissus durs, favorise la reproductibilité et accroit la précision des positions implantaires. Désormais, l'utilisation d'un wax-up digital permet aux praticiens de prévisualiser numériquement la future restauration (Lanis et al. 2017; Happe et al. 2018). Il est également possible de réaliser des restaurations immédiates avant même la pose de l'implant (Lee et al. 2016; Cristache et Gurbanescu 2017; Happe et al. 2018).

— Communication entre praticiens et laboratoires :

L'évolution de la technologie permet aux praticiens de disposer d'un flux de travail entièrement numérique grâce au CBCT, aux scanners de surface ou aux logiciels de planification. La superposition du fichier DICOM avec le fichier STL permet de générer un environnement virtuel pour la planification implantaire et la fabrication d'un guide chirurgical (Kühl et al. 2015; Gjelvold et al. 2016; Kernen et al. 2016; Lee et al. 2016; Cristache et Gurbanescu 2017; Lanis et al. 2017; Matta et al. 2017; Bell et al. 2018; Bencharit et al. 2018; Happe et al. 2018; Mangano et al. 2018; Tan et al. 2018).

Ce scénario virtuel favorise et facilite la communication et permet de discuter du cas entre confrères et le prothésiste dans un environnement virtuel via internet (Lanis et al. 2017; Happe

et al. 2018; Tan et al. 2018). Le traitement optimal est alors plus facilement sélectionné et mis en œuvre pour des résultats esthétiques et fonctionnels (Bell et al. 2018).

III-5-2- Apports et intérêts de l'impression 3D en chirurgie implantaire guidée

—Précision des guides chirurgicaux imprimés en 3D :

Les progrès en matière de technologie d'impression 3D, de logiciels de planification et de qualité des matériaux ont permis de la rendre plus accessible. Le recours aux guides chirurgicaux imprimés est en constante augmentation. Il convient de s'interroger sur la précision de ces guides étant donné qu'au cours du processus de conception et de fabrication, des erreurs peuvent s'accumuler et impacter le traitement (Cristache et Gurbanescu 2017).

Bell et al. en 2018 ainsi que Matta et al. en 2017 comparent la précision des guides chirurgicaux imprimés en 3D par rapport aux guides chirurgicaux thermoformés. Pour rappel, les deux études utilisent des critères de comparaison différents.

Matta et ses collaborateurs observent les déviations de la douille de guidage qui sert pour le passage des forets d'ostéotomie. S'ils relèvent que les guides thermoformés fabriqués par un prothésiste sont significativement différents des guides imprimés en 3D, ils constatent que chacune de ces 2 méthodes de fabrication permet de transférer la position virtuelle des implants vers la situation clinique.

Bell et ses collaborateurs se sont focalisés sur les déviations angulaires, à la tête et à l'apex des implants. Pour rappel, la même planification a servi pour la fabrication des deux types de guides. Les résultats de cette étude comparative montrent qu'il n'existe pas de différences significatives dans la déviation angulaire des implants posés à l'aide des guides 3D ou thermoformés. A contrario, les auteurs constatent que les positions à la tête et à l'apex des implants sont plus précises lorsque la pose est réalisée avec les guides 3D. Ces différences d'angulation peuvent en partie être expliquées par la différence de rigidité des guides, les guides thermoformés étant généralement plus souples. Leur propension à se déformer sous les contraintes exercées lors du forage est augmentée. Bell et al. 2018 ajoutent que cette souplesse pourrait être responsable de mouvements au niveau de la douille métallique de guidage, ce qui impacterait indirectement la position des implants.

Ces deux études relatives à la précision des guides chirurgicaux selon la méthode de fabrication choisie sont fondamentales dans le cadre de notre recherche, car très peu d'articles sur le sujet sont répertoriés dans la littérature.

Les guides peuvent donc être thermoformés ou bien imprimés en 3D. En ce qui concerne l'impression 3D, plusieurs technologies et procédés sont disponibles sur le marché.
Les catégories d'imprimantes sont multiples et leur prix varie énormément. Sommacal et al. soulignent qu'au-delà du processus de fabrication de l'imprimante 3D, c'est la résolution d'impression qui différencie chacun des modèles. Les auteurs critiquent le fait que ces imprimantes soient disponibles à l'achat sans qu'aucun consensus ne soient définis pour garantir une qualité et une précision suffisantes des objets imprimés en 3D à usage clinique (Sommacal et al. 2018).

Gjelvold et al. et Sommacal et al. comparent la précision de différentes technologies d'impression 3D et évaluent leur pertinence en milieu clinique.
L'étude de Sommacal et al. est menée dans le but de comparer la précision d'une imprimante 3D grand public FFF (dépôt de fil fondus) avec une imprimante DLP (Digital Light Processing) professionnelle. Les résultats révèlent que les guides FFF sont la source de nombreuses imprécisions et n'ont pas pu être positionnés précisément sur le modèle donc inutilisables cliniquement. Il faut noter que ces imprécisions sont probablement dues au fait que les guides DLP ont été confectionnés par le fabriquant alors que les guides FFF ont été imprimés par les auteurs.
Dans le même cadre, Gjelvold et al. souhaitent comparer la précision des guides chirurgicaux de deux imprimantes 3D de bureau : l'imprimante DLP et l'imprimante SLA. L'objet de l'étude est de mesurer les déviations de position des implants posés pour chacune des deux imprimantes 3D. Les implants sont posés in vitro. Les résultats montrent que les deux imprimantes sont capables de fournir des guides précis utilisables en chirurgie implantaire. L'imprimante DLP s'avère légèrement plus précise, mais les auteurs soulignent que le choix d'une expérience in vitro est susceptible de limiter la portée de leur étude.
Si les études émettent des résultats contrastés, elles valident dans leur grande majorité le recours aux guides chirurgicaux imprimés en 3D. Elles soulignent que si l'existence de différences entre la position planifiée et la position réelle est une réalité, il n'existe aucun système de chirurgie guidée permettant d'obtenir un résultat parfait. De nombreux facteurs extérieurs aux guides peuvent expliquer l'accumulation d'erreurs engendrant ces déviations. Pour les éviter,

l'ensemble des auteurs préconise de faire preuve d'une attention particulière à chaque étape du protocole, c'est-à-dire de la récolte des données préopératoires à la conception et la fabrication du guide.

Dans le cadre de notre recherche, nous avons identifié plusieurs lacunes de la littérature relative aux guides 3D. Parmi elles, il a été remarqué qu'à ce jour une seule étude a comparé la précision des imprimantes de bureau grand public par rapport aux imprimantes professionnelles et industrielles en dentisterie implantaire guidée. Le développement croissant du marché des imprimantes 3D de bureau et des scanners intra-oraux rend désormais inéluctable la mise en œuvre d'études comparatives afin de déterminer leur fiabilité.

— Conception et design : Stabilité, adaptation et tolérance des instruments :

L'impression 3D permet d'éviter le recours au laboratoire ou au prothésiste pour la fabrication du guide. Dorénavant, le passage du fichier informatique au produit physique est une réalité. Les praticiens sont donc plus libres et contrôlent l'ensemble de la chaine CAO/FAO (Happe et al. 2018).

L'impression 3D direct permet de créer des évents au sein du design du guide pour favoriser une meilleure irrigation indispensable pour un contrôle thermique adéquat lors du forage (Cristache et Gurbanescu 2017). Ces petites fenêtres et ces designs « épurés » permettent de vérifier directement en bouche la bonne assise du guide sur les faces occlusales des dents supports pour une bonne stabilité. Ces guides sont particulièrement adaptés et recommandés pour des édentements partiels (Mangano et al. 2018).

Dans le cadre des études évoquées, les guides analysés accueillaient un cylindre métallique de guidage (douille en titane) inséré manuellement après l'impression. La présence de ce cylindre peut avoir des conséquences sur la précision de la pose des implants (Bell et al. 2018; Gjelvold et al. 2018). La conception et la fabrication direct par le procédé d'impression 3D permet d'obtenir des guides avec un canon de guidage non métallique incorporé dans son design (*Sleeveless*). Cette différence matérielle permet de minimiser la tolérance mécanique des instruments et augmenter la précision. Cependant, ce type de design requiert des forets modifiés spécifiques (Lee et al. 2016; Cristache et Gurbanescu 2017). (Photo 10)

Le support sur lequel repose le guide chirurgical influence la précision de l'acte. Les guides chirurgicaux imprimés en 3D peuvent être à la fois supportés par l'os, la muqueuse ou les dents (Cristache et Gurbanescu 2017; Gjelvold et al. 2018). Le choix du support est surtout dicté par la situation clinique et a une influence non négligeable sur la chaine de planification, la stabilité et la précision du guide (Gjelvold et al. 2018).

— Temps et coût de fabrication :

Jusqu'à très récemment, les guides chirurgicaux étaient fournis par le laboratoire ou imprimés en 3D par un sous-traitant industriel (Happe et al. 2018).
Le prix d'un guide chirurgical implantaire fabriqué par un industriel peut coûter plus de 350 euros avec des délais et des étapes de laboratoire supplémentaires (Kühl et al. 2015; Bencharit et al. 2018).

Le récent développement des imprimantes tridimensionnelles de bureau de haute qualité favorise la fabrication de guides chirurgicaux directement au cabinet ce qui réduit sensiblement les coûts et les délais (Bencharit et al. 2018). Le prix de revient d'un guide imprimé au cabinet oscille entre 20 et 50 euros et peut être fait en quelques heures (Kühl et al. 2015; Bencharit et al. 2018). La conception numérique des guides chirurgicaux combinée à l'impression 3D au cabinet constituent une méthode pratique et rentable très intéressante.

III-5-3- Inconvénients de la chirurgie guidée et de l'impression 3D

Les études citées montrent que le recours aux guides chirurgicaux permet de réaliser des chirurgies sans lambeau. L'intervention est accélérée, plus confortable pour le patient et les suites opératoires plus légères (Mangano et al. 2018). Mais certains auteurs soulignent les inconvénients de la chirurgie sans lambeau, notamment l'incapacité pour le praticien de visualiser la topographie osseuse. Le guide chirurgical limite l'irrigation ce qui peut entrainer des complications. Certes le design particulier des guides imprimé en 3D permet en principe une meilleure irrigation, toutefois, le contrôle thermique ne pourra jamais égaler celui obtenu dans le cadre d'une chirurgie à main levée (Mangano et al. 2018).

La chirurgie guidée n'est pas applicable dans certaines situations cliniques (Lanis et al. 2017; Happe et al. 2018). L'utilisation d'un guide chirurgical est parfois impossible, notamment lorsque l'ouverture buccale est limitée (Cristache et Gurbanescu 2017; Mangano et al. 2018).

La majorité des études ont constaté l'existence systématique de déviations entre la planification et la situation clinique. Si l'utilisation de guides chirurgicaux imprimés en 3D améliore la précision de la pose de l'implant, ils ne sauraient compenser l'inexpérience du praticien. Il est donc indispensable que ce dernier maitrise son geste chirurgical (formation).

Une accumulation d'erreurs dans la chaîne CFAO est susceptible de se produire que ce soit lors du CBCT ou de la prise de l'empreinte optique, lors de la planification ou de la superposition des données dans le logiciel, mais aussi au cours de l'impression 3D ou du protocole de post-traitement du guide imprimé. C'est pourquoi le praticien doit totalement maitriser le processus de fabrication additive ainsi que les logiciels de planification et d'impression 3D (Lanis et al. 2017; Happe et al. 2018). Chaque clinicien doit donc suivre une courbe d'apprentissage et recevoir une formation appropriée afin de se familiariser avec les différents outils.

La chirurgie guidée permet un temps opératoire plus court, plus précis et sécurisé. Il est important de ne pas occulter le temps nécessaire à la phase de planification préimplantaire ainsi que les étapes de post-traitement des guides imprimés. La chirurgie à main levée est en tout état de cause plus rapide pour un praticien expérimenté.

Enfin, le coût des guides chirurgicaux imprimés semble être un argument en faveur de l'impression 3D, mais l'acquisition des technologies nécessaires à leur fabrication représente un investissement assez conséquent. Pour imprimer un guide chirurgical directement au cabinet, le praticien devra s'équiper d'un CBCT, d'un scanner intra oral, d'un logiciel de planification et d'une imprimante 3D de bureau. A tout cela, s'ajoutent les frais supplémentaires de matériaux et de maintenance des différents outils. En l'état de la littérature, il n'existe aucun article permettant d'évaluer le coût complet d'un guide chirurgical imprimé en 3D de bonne qualité. Il serait donc intéressant que des recherches futures s'intéressent de près à cette problématique. Avant de s'équiper, il est donc fortement conseillé de connaitre ses besoins et définir les objectifs et limites du cabinet.

IV- PRÉSENTATION D'UN CAS CLINIQUE

Le cas clinique présenté a été réalisé par le Docteur Pierre Weidmann, assistant hospitalier universitaire en chirurgie orale au sein de l'hôpital Rothschild.

Cas clinique : Mr L. 70 ans

Le patient s'est présenté initialement dans le service afin de remplacer des dents et ne souhaitait pas de réhabilitation par prothèse amovible.

Antécédents médicaux: Hypertension.

Le patient se plaignait d'une difficulté à maintenir la bouche ouverte associée à une douleur au niveau des articulations temporo-mandibulaires due à l'édentement ancien non réhabilité.

Édentement postérieur libre + encastré antérieur.

Plan de traitement retenu : Prothèse supra-implantaire fixe en deux temps.

Au vu du nombre d'implants et de l'âge du patient, une chirurgie guidée a été retenue.

Les examens cliniques et radiologiques ont permis de poser l'indication d'implants dentaires sans avoir recours à des traitements d'augmentation osseuse préalable.

Photo 13 :Situation initiale

La difficulté opératoire relève ici du faible espace mésio-distal disponible en antérieur et de l'absence de repère en postérieur.
La contrainte majeure tient quant à elle à la nécessité d'un résultat esthétique optimal et de la restauration du calage postérieur.
Un guide pilote à appuis mixte dentaires et muqueux avec levée d'un lambeau de pleine épaisseur a été retenue.

Planification :

A partir de modèles en plâtre et d'une cire d'occlusion, un wax-up a été réalisé au laboratoire.

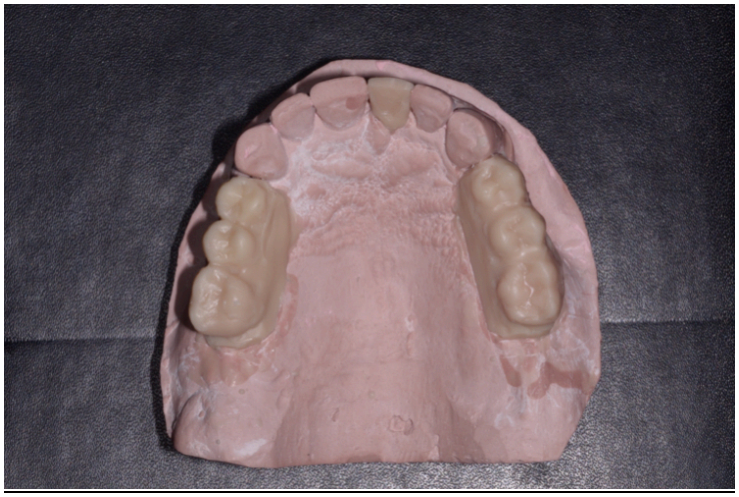

Photo 14 : Projet prothétique

Initialement, une chirurgie guidée à l'aide du logiciel SIMPLANT a été retenue pour les dents postérieures. Il permet la conception de guide plein de type gouttière (photo 15).
Avec ces guides, chez les patients édentés partiels, il est difficile de contrôler visuellement la bonne adaptation sur les dents support.
Par conséquent, un deuxième guide, réalisé avec le logiciel SMOP a été imprimé pour la pose de l'implant antérieur (guide réalisé à titre d'essai gratuit).

Deux guides de conception totalement différente ont donc été imprimés pour le cas ce qui montre bien la liberté qu'offre la CAO et l'impression 3D.

Matériel, logiciel et coût :

-CBCT du service d'odontologie de l'hôpital Rothschild : PLANMECA ROMEXIS

-Deux guides différents imprimés. L'objectif était de comparer le confort, la stabilité et la visibilité des différents guides. Un guide SIMPLANT stéréolithographique de type gouttière (plein) avec visibilité et irrigation réduite et un guide SMOP PolyJet (STRATASYS) à appuis sélectifs offrant une visibilité, une stabilité et une irrigation adéquate.

-Coût : Environ 300 € pour le guide SIMPLANT.

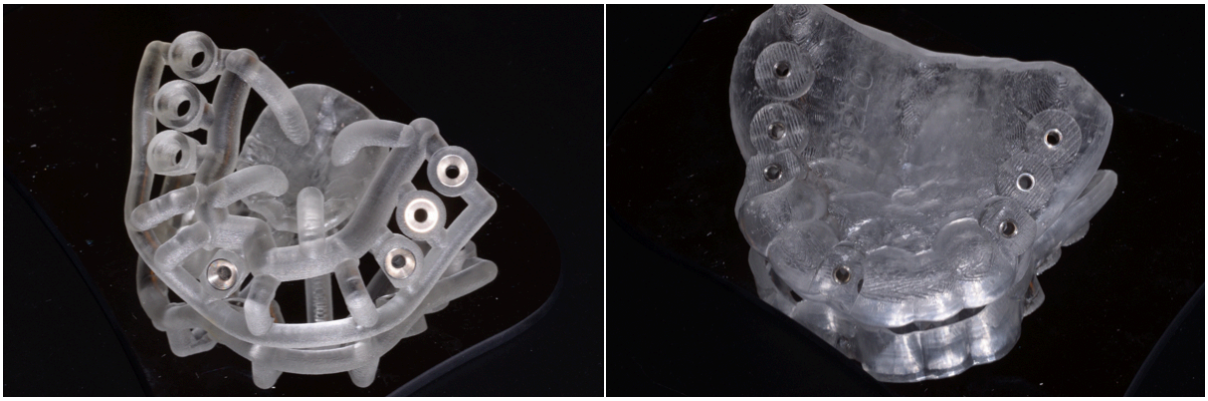

Photo 15 : Guides chirurgicaux SMOP (gauche) et SIMPLANT (droite)

La bonne assise et la stabilité du guide ont été contrôlées par une analyse visuelle sur le modèle et en bouche.

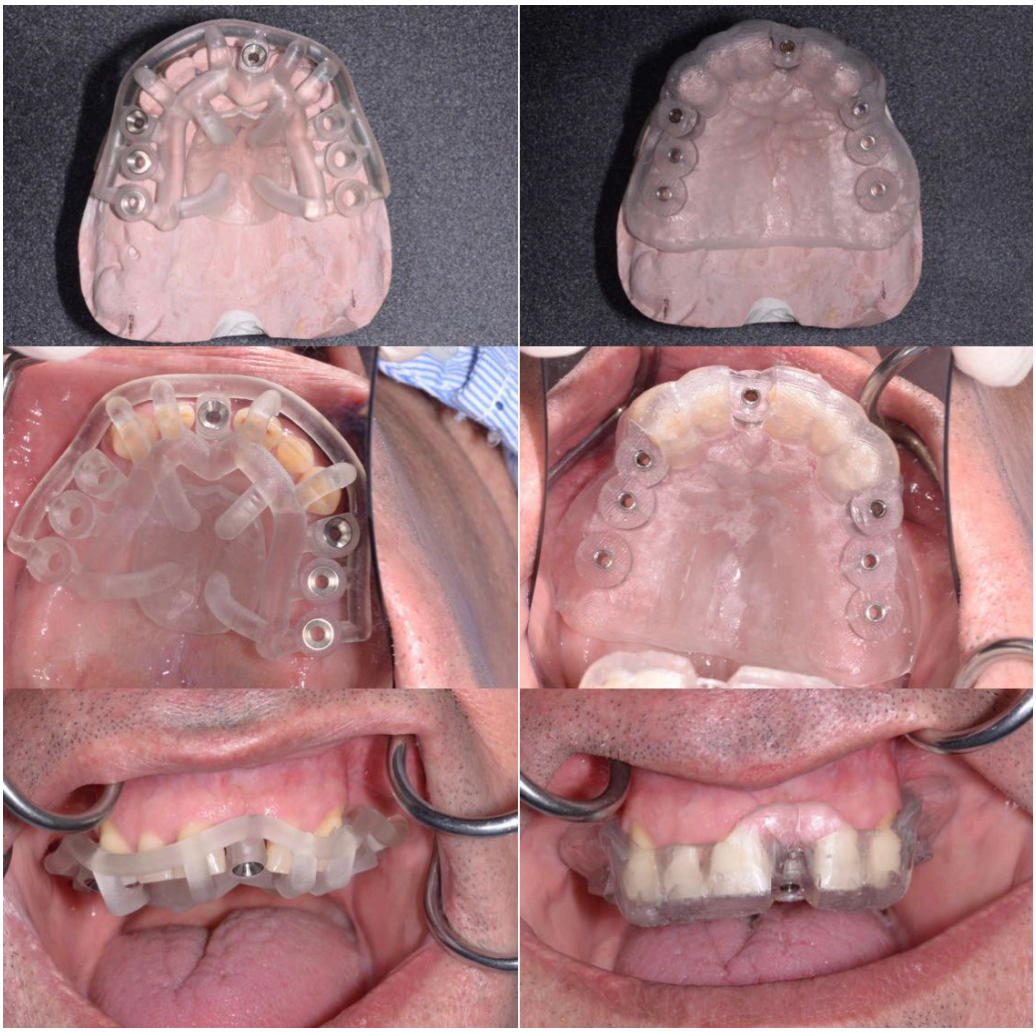

Photo 16 : Essayage des guides chirurgicaux

Phase chirurgicale :

L'implant antérieur a été posé avec le guide SMOP.

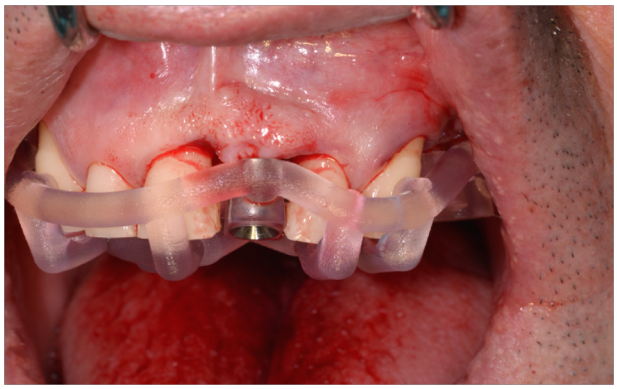

Photo 17 : Pose chirurgicale de l'implant antérieur

Les implants postérieurs ont été posés avec le guide SIMPLANT.

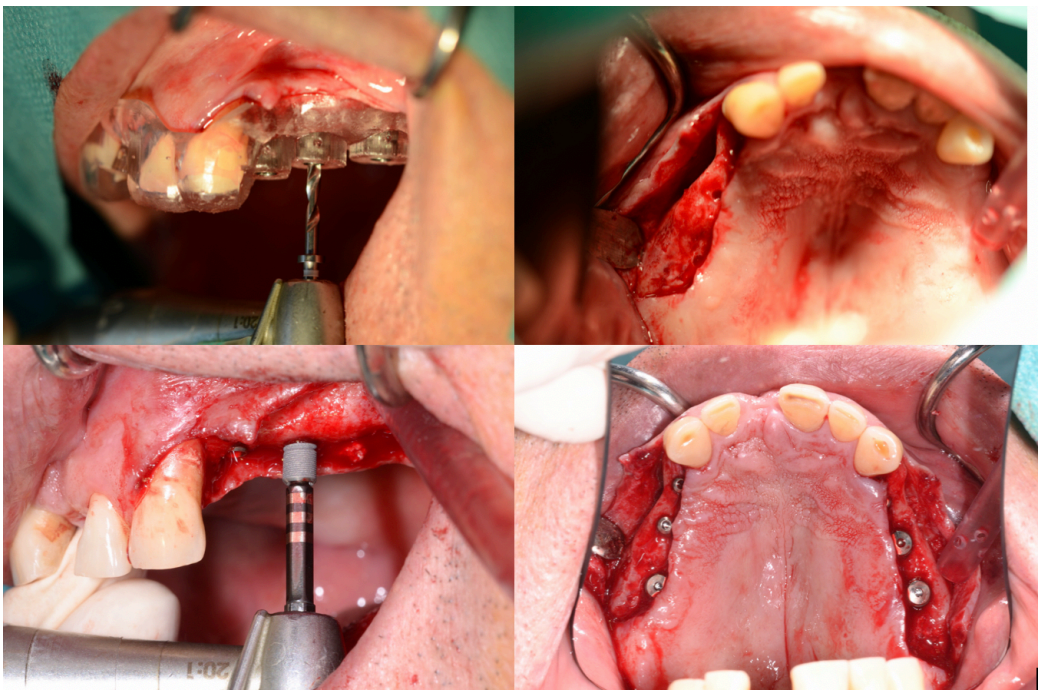

Photo 18 : Pose chirurgicale des implants postérieurs

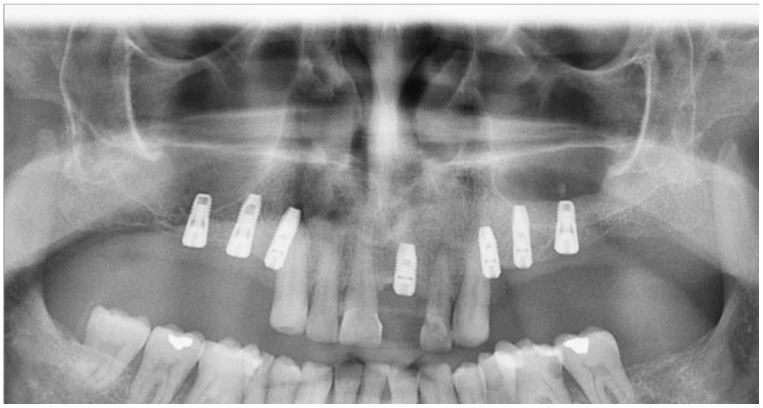

Photo 19 : Panoramique post-opératoire

Temporisation :

Le patient n'a pas souhaité de restauration provisoire. Les implants ont été enfouis.

Restauration :

Photo 20 : Prothèses scellées supra-implantaires

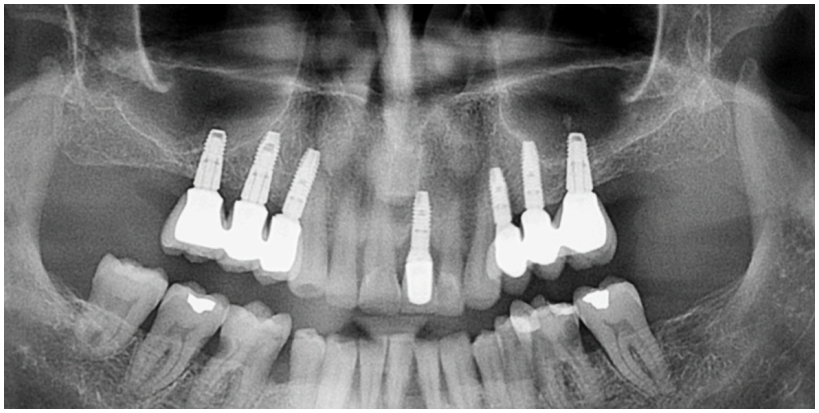

Photo 21 : Radio panoramique post-traitement

V- Conclusion

La chirurgie guidée est une pratique relativement récente. Le positionnement des implants dans l'espace demeure un défi en implantologie chirurgicale et prothétique. Les guides chirurgicaux ont une place prépondérante pour mener à bien les traitement implantaires.
Les progrès technologiques en matière de radiologie, de planification et de numérisation des données permettent de nous approcher au plus près du projet thérapeutique prédéfini.

A l'issue de la revue systématique de littérature effectuée dans ce travail, 13 articles ont été retenus en rapport avec l'utilisation de guides chirurgicaux imprimés en 3D. Malgré le faible nombre d'études de haut niveau de preuve présentant des critères d'évaluation superposables, l'analyse des résultats publiés semble montrer que l'utilisation des guides chirurgicaux imprimés en 3D permet un positionnement optimal des implants avec une prédictibilité des résultats. Ceux-ci plaident en faveur de la fabrication additive comme technique de choix.
Les technologies d'impressions 3D par photopolymérisation tel que DLP, SLA et PolyJet semblent offrir de meilleurs résultats en termes de stabilité et de précision.

La facilité des protocoles de numérisation permet une gestion plus simple des cas cliniques pouvant aboutir à une démocratisation de la chirurgie guidée au quotidien de l'implant unitaire à l'édenté total. Une maitrise totale de l'implantologie chirurgicale et prothétique est indispensable à la parfaite exploitation des outils informatiques. La formation continue clinique et théorique des praticiens reste fondamentale.

Le côté dynamique de ce secteur concurrentiel de l'impression 3D entraîne constamment de nouvelles innovations et une réduction des coûts.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 Protocole traditionnel de production d'un guide chirurgical 5
Figure 2 : Résumé du flux de travail proposé par le logiciel Blue Sky Plan pour la planification et la fabrication d'un guide stéréolithographique à appui dentaire (d'après Whitley et al. 2017) 13
Figure 3 : Schéma illustrant les déviations possibles de l'implant.....18
Figure 4 : Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'une imprimante stéréolithographique (d'après Bae Kim et al. 2016).....23
Figure 5 : Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'une imprimante DLP.....24
Figure 6 : Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'une imprimante DLP.....25
Figure 7 :Schéma illustrant le principe de fonctionnement d'une imprimante SLS 26
Figure 8 : Schéma illustrant le fonctionnement d'une imprimante FDM à 2 extrudeuses 28

Photo 1 : Superposition des données DICOM et STL.....11
Photo 2 : Wax-up numérique et choix de la position de l'implant.....12
Photo 3 : A, orientation du fichier de conception du guide sur la plateforme de l'imprimante et préparation des supports pour l'impression. B, guide imprimé 14
Photo 4 : C, Après 20 minutes dans un bains d'alcool. D, Après 10 minutes dans un four à polymérisation (d'après Whitley et al. 2017) 14
Photo 5 : Guide fini après post-traitement, retrait des supports, insertion de la douille métallique de guidage et stérilisation (d'après Whitley et al. 2017) 14
Photo 6 : Guide à appui dentaire 16
Photo 7 : Guide à appui muqueux avec vis de fixation 16
Photo 8 : Guide à appui osseux 17
Photo 9 : Imprimante de bureau stéréolithographique à usage professionnelle Form2 du fabriquant Formlabs 34
Photo 10 : Forets modifiés pour guides « sleeveless » 47
Photo 11 : Guide « sleeveless » (d'après Cristache et Gurbanescu 2017).....48
Photo 12 : Guide ouvert à supports dentaires sélectifs 53
Photo 13 :Situation initiale.....63
Photo 14 : Projet prothétique.....64
Photo 15 : Guides chirurgicaux SMOP (gauche) et SIMPLANT (droite).....65
Photo 16 : Essayage des guides chirurgicaux 66
Photo 17 : Pose chirurgicale de l'implant antérieur.....67
Photo 18 : Pose chirurgicale des implants postérieurs.....67
Photo 19 : Panoramique post-opératoire.....68
Photo 20 : Prothèses scellées supra-implantaires.....68
Photo 21 : Radio panoramique post-traitement.....68

Tableau 1 : Facteurs influençant le choix du logiciel de planification.....9
Tableau 2 : Les 13 articles retenus dans la revue de littérature effectuée.....39
Tableau 3 : Caractéristiques de l'étude comparant la précision de la pose d'implant guidé par rapport à la pose d'implant à main levée.....40
Tableau 4 : Déviations moyennes des implants posés en fonction du type de chirurgie réalisée 41

Tableau 5 : Caractéristiques de l'étude comparant la précision de la chirurgie totalement guidée avec la chirurgie partiellement guidée.....42
Tableau 6 : Déviations moyennes des implants posés par chirurgie entièrement guidée et chirurgie partiellement guidée (D'après Bencharit et al. 2018).....43
Tableau 7 : Caractéristiques des études concernant la précisions des guides chirurgicaux en fonction de la méthode de fabrication.....43
Tableau 8 : Déviations moyennes des implants posés avec un guide imprimé en 3D ou thermoformé (D'après Bell et al. 2018).....44
Tableau 9 : Déviations moyennes des implants posés avec un guide imprimé en 3D et un guide fabriqué au laboratoire (D'après Kernen et al. 2016).....46
Tableau 10 : Caractéristiques des études concernant la précision de guides chirurgicaux imprimés en 3D avec canon de guidage incorporé dans leur conception.....47
Tableau 11 : Déviations moyennes des piliers implantaires posés avec un guide imprimé en 3D (D'après Lee et al. 2016).....48
Tableau 12 : Déviations moyennes de la position des implants par rapport à la position planifiée (d'après Cristache et al. 2017).....49
Tableau 13 : Caractéristiques des études concernant la précision des guides chirurgicaux fabriqués à partir d'imprimante 3D différentes.....50
Tableau 14 : Déviations moyennes de la position des implants par rapport à la position planifiée (d'après Gjelvold et al. 2018).....51
Tableau 15 : Caractéristiques de l'étude de Mangano et al. 2018).....53

BIBLIOGRAPHIE

Alter D. 3D Printing In Dental Technology [Internet]. aegis dental network. 2016 [Consulté le le 22 déc 2018]. Disponible sur: https://www.aegisdentalnetwork.com/idt/2016/03/3d-printing-in-dental-technology

Aniwaa. Les technologies d'impression 3D - guide sur les différentes techniques [Internet]. Aniwaa. 2018 [Consulté le 22 déc 2018]. Disponible sur: https://www.aniwaa.fr/les-technologies-dimpression-3d/

Bae Kim G, Lee S, Kim H, Yang D, Kim Y-H, Soo Kyung Y, et al. Three-Dimensional Printing: Basic Principles and Applications in Medicine and Radiology. Korean J Radiol. 2016;17:182.

Bell C, Sahl E, Kim Y, Rice D. Accuracy of Implants Placed with Surgical Guides: Thermoplastic Versus 3D Printed. Int J Periodontics Restorative Dent. 2018;38(1):113-9.

Bencharit S, Staffen A, Yeung M, Whitley D, Laskin DM, Deeb GR. In Vivo Tooth-Supported Implant Surgical Guides Fabricated With Desktop Stereolithographic Printers: Fully Guided Surgery Is More Accurate Than Partially Guided Surgery. J Oral Maxillofac Surg. 2018;76(7):1431-9.

Bidgood WD, Horii SC. Introduction to the ACR-NEMA DICOM standard. Radiogr Rev Publ Radiol Soc N Am Inc. mars 1992;12(2):345-55.

Borisov R. RADIOLOGICAL TEMPLATES AND CAD/CAM SURGICAL GUIDES. A literature review. J IMAB – Annu Proceeding Sci Pap. 2016;22(3):1285-95.

Brothier J, Soenen A. Évolution des guides chirurgicaux implantaires réalisés au cabinet dentaire [Internet]. LEFILDENTAIRE magazine dentaire. 2017 [Consulté le 22 janv 2019]. Disponible sur: https://www.lefildentaire.com/articles/clinique/implantologie/evolution-des-guides-chirurgicaux-implantaires-realises-au-cabinet-dentaire/

Chen J, Zhang Z, Chen X, Zhang C, Zhang G, Xu Z. Design and manufacture of customized dental implants by using reverse engineering and selective laser melting technology. J Prosthet Dent. 2014;112(5):1088-1095.e1.

Cristache CM, Gurbanescu S. Accuracy Evaluation of a Stereolithographic Surgical Template for Dental Implant Insertion Using 3D Superimposition Protocol. Int J Dent. 2017; 2017: 4292081.

Dawood A, Marti BM, Sauret-Jackson V. 3D printing in dentistry. Br Dent J. 2015;219(11):521-9.

Dupagne L, LE GOFF S, TAPIE L. L'impression 3D. Revue Biomatériaux Cliniques [Internet]. 2016 [Consulté le 22 déc 2018]; Disponible sur: https://www.information-dentaire.fr/02-94p1/011025-23303-L-impression-3D.html

Ganz SD. Three-Dimensional Imaging and Guided Surgery for Dental Implants. Dent Clin North Am. 2015;59(2):265-90.

Giacomo GAD, Silva JV da, Silva AM da, Paschoal GH, Cury PR, Szarf G. Accuracy and Complications of Computer-Designed Selective Laser Sintering Surgical Guides for Flapless Dental Implant Placement and Immediate Definitive Prosthesis Installation. J Periodontol. 2012;83(4):410-9.

Gjelvold B, Chrcanovic BR, Korduner E-K, Collin-Bagewitz I, Kisch J. Intraoral Digital Impression Technique Compared to Conventional Impression Technique. A Randomized Clinical Trial: Conventional vs. Digital Impression. J Prosthodont. 2016;25(4):282-7.

Gjelvold B, Mahmood DJH, Wennerberg A. Accuracy of surgical guides from 2 different desktop 3D printers for computed tomography-guided surgery. J Prosthet Dent. 2018. pii: S0022-3913(18)30677-2.

Happe A, Fehmer V, Herklotz I, Nickenig H-J, Sailer I. Possibilities and limitations of computer-assisted implant planning and guided surgery in the anterior region. Int J Comput Dent. 2018;21(2):147-62.

Ibrahim D, Broilo TL, Heitz C, de Oliveira MG, de Oliveira HW, Nobre SMW, et al. Dimensional error of selective laser sintering, three-dimensional printing and PolyJet™ models in the reproduction of mandibular anatomy. J Cranio-Maxillofac Surg. 2009;37(3):167-73.

Ionita CN, Mokin M, Varble N, Bednarek DR, Xiang J, Snyder KV, et al. Challenges and limitations of patient-specific vascular phantom fabrication using 3D Polyjet printing. Proc SPIE-- Int Soc Opt Eng. 2014;9038:90380M.

Jablow M. Closed, open, and selectively open CAD/CAM architecture: what does it mean? [Internet]. Dentistry IQ. 2010 [Consulté le 24 janv 2019]. Disponible sur: https://www.dentistryiq.com/articles/2010/10/closed-open-and-selectively-open-cad-cam-architecture-what-does-it-mean.html

Jammalamadaka U, Tappa K. Recent Advances in Biomaterials for 3D Printing and Tissue Engineering. J Funct Biomater. 2018;9(1). pii: E22.

Van Der Walt JG, Nsengimana J. State of the art of Additive Manufacturing for polymeric medical implants. In 2016 [cité 3 févr 2019]. Disponible sur: http://ir.cut.ac.za/handle/11462/1238

Journel P, Drouhet G. Influence du type d'édentement sur la précision des guides chirurgicaux stéréolithographiques. Implant. 2016;4:277-87.

Jung RE, Schneider D, Ganeles J, Wismeijer D, Zwahlen M, Hämmerle CHF, et al. Computer technology applications in surgical implant dentistry: a systematic review. Int J Oral Maxillofac Implants. 2009;24 Suppl:92-109.

Kernen F, Benic GI, Payer M, Schär A, Müller-Gerbl M, Filippi A, et al. Accuracy of Three-Dimensional Printed Templates for Guided Implant Placement Based on Matching a Surface Scan with CBCT. Clin Implant Dent Relat Res. 2016;18(4):762-8.

Kowalski B. Implant Planning Software [Internet]. aegis dental network. 2014 [Consulté le 25 sept 2018]. Disponible sur: https://www.aegisdentalnetwork.com/idt/2014/03/implant-planning-software

Kühl S, Payer M, Zitzmann NU, Lambrecht JT, Filippi A. Technical accuracy of printed surgical templates for guided implant surgery with the coDiagnostiX ™ software. Clin Implant Dent Relat Res. 2015;17 Suppl 1:e177-182.

Kurzmann C, Janjić K, Shokoohi-Tabrizi H, Edelmayer M, Pensch M, Moritz A, et al. Evaluation of Resins for Stereolithographic 3D-Printed Surgical Guides: The Response of L929 Cells and Human Gingival Fibroblasts. BioMed Res Int. 2017;2017:4057612.

Lanis A, Llorens P, Álvarez Del Canto O. Selecting the appropriate digital planning pathway for computer-guided implant surgery. Int J Comput Dent. 2017;20(1):75-85.

Lee D-H, An S-Y, Hong M-H, Jeon K-B, Lee K-B. Accuracy of a direct drill-guiding system with minimal tolerance of surgical instruments used for implant surgery: a prospective clinical study. J Adv Prosthodont. 2016;8(3):207-13.

Ludlow M, Renne W. Digital Workflow for Implant Dentistry [Internet]. Decisions in Dentistry. 2017 [Consulté le 26 sept 2018]. Disponible sur: http://decisionsindentistry.com/article/digital-workflow-for-implant-dentistry/

Machado GL. CBCT imaging – A boon to orthodontics. Saudi Dent J. janv2015;27(1):12-21.

Mangano F, Gandolfi A, Luongo G, Logozzo S. Intraoral scanners in dentistry: a review of the current literature. BMC Oral Health. 2017;17(1):149.

Mangano FG, Hauschild U, Admakin O. Full in-Office Guided Surgery with Open Selective Tooth-Supported Templates: A Prospective Clinical Study on 20 Patients. Int J Environ Res Public Health. 2018;15(11).

Matta R-E, Bergauer B, Adler W, Wichmann M, Nickenig H-J. The impact of the fabrication method on the three-dimensional accuracy of an implant surgery template. J Cranio-Maxillo-fac Surg Off Publ Eur Assoc Cranio-Maxillo-fac Surg. juin 2017;45(6):804-8.

Mohan N, Senthil P, Vinodh S, Jayanth N. A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process. Virtual Phys Prototyp. 2017;12(1):47-59.

Mora MA, Chenin DL, Arce RM. Software tools and surgical guides in dental-implant-guided surgery. Dent Clin North Am. juill 2014;58(3):597-626.

Newsdesk. What does 3D printing mean to dentistry? [Internet]. dentalreview.news. 2018 [Consulté le 23 déc 2018]. Disponible sur: https://www.dentalreview.news/technology/25-dental-3d-print/2080-what-does-3d-printing-mean-to-dentistry

Oberoi G, Nitsch S, Edelmayer M, Janjić K, Müller AS, Agis H. 3D Printing—Encompassing the Facets of Dentistry. Front Bioeng Biotechnol. 2018;6:172.

Ozan O, Turkyilmaz I, Ersoy AE, McGlumphy EA, Rosenstiel SF. Clinical Accuracy of 3 Different Types of Computed Tomography-Derived Stereolithographic Surgical Guides in Implant Placement. J Oral Maxillofac Surg. 2009;67(2):394-401.

Rebong RE, Stewart KT, Utreja A, Ghoneima AA. Accuracy of three-dimensional dental resin models created by fused deposition modeling, stereolithography, and Polyjet prototype technologies: A comparative study. Angle Orthod. 2018;88(3):363-9.

Richert R, Goujat A, Venet L, Viguie G, Viennot S, Robinson P, et al. Intraoral Scanner Technologies: A Review to Make a Successful Impression. J Healthc Eng. 2017;2017:8427595.

Sireix C. Les imprimantes 3D. L'information dentaire [Internet]. 2017 [Consulté le 17 janv 2019]; Disponible sur: https://www.information-dentaire.fr/011025-23739-Impression-et-odontologie.html

Sommacal B, Savic M, Filippi A, Kühl S, Thieringer FM. Evaluation of Two 3D Printers for Guided Implant Surgery. Int J Oral Maxillofac Implants. 2018;33(4):743-6.

Stratasys. What Is 3D Printing? | 3D Printing For Beginners Guide | Stratasys Direct [Internet]. 2018 [Consulté le 22 déc 2018]. Disponible sur: https://www.stratasysdirect.com/resources/tutorials/what-is-3d-printing

Tahmaseb A, Wismeijer D, Coucke W, Derksen W. Computer Technology Applications in Surgical Implant Dentistry: A Systematic Review. Int J Oral Maxillofac Implants. 2014;29(Supplement):25-42.

Tan PLB, Layton DM, Wise SL. In vitro comparison of guided versus freehand implant placement: use of a new combined TRIOS surface scanning, Implant Studio, CBCT, and stereolithographic virtually planned and guided technique. Int J Comput Dent. 2018;21(2):87-95.

Ting-Shu S, Jian S. Intraoral Digital Impression Technique: A Review. J Prosthodont Off J Am Coll Prosthodont. 2015;24(4):313-21.

Tofail SAM, Koumoulos EP, Bandyopadhyay A, Bose S, O'Donoghue L, Charitidis C. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. Mater Today. 2018;21(1):22-37.

Valente F, Schiroli G, Sbrenna A. Accuracy of computer-aided oral implant surgery: a clinical and radiographic study. Int J Oral Maxillofac Implants. 2009;24(2):234-42.

Ventola CL. Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses. Pharm Ther. 2014;39(10):704-11.

Werz SM, Zeichner SJ, Berg B-I, Zeilhofer H-F, Thieringer F. 3D Printed Surgical Simulation Models as educational tool by maxillofacial surgeons. Eur J Dent Educ Off J Assoc Dent Educ Eur. 2018;22(3):e500-5.

Whitley D, Eidson RS, Rudek I, Bencharit S. In-office fabrication of dental implant surgical guides using desktop stereolithographic printing and implant treatment planning software: A clinical report. J Prosthet Dent . 2017;118(3):256-63.

Stereolithography (SLA) [Internet]. GE Additive. [Consulté le 22 déc 2018]. Disponible sur: https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/information/stereolithography-technology

Les opinions émises dans les dissertations présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs, sans aucune approbation ni improbation de la Faculté de Chirurgie Dentaire.

BENJOAR Marc. Apport de l'impression 3D dans la fabrication et la précision des guides chirurgicaux en implantologie : données actuelles et étude d'un cas clinique. 77 p. : ill., graph., tabl. Réf. Biblio. : p 72-76.

Sous la direction de : M. le Docteur Pierre WEIDMANN

Th : Chir Dent. : Paris 7 : année 2019

RÉSUMÉ :

L'implantologie intra-orale est une discipline qui consiste à positionner de manière raisonnée des implants dans l'os maxillaire ou mandibulaire. Un positionnement tridimensionnel correct de l'implant associé à des volumes osseux et gingivaux suffisants est impératif. Grâce au flux de travail numérique continu, il est dorénavant possible de planifier à l'aide de logiciels l'ensemble des étapes du traitement implantaire jusqu'à la conception et la fabrication de guides chirurgicaux assistées par ordinateur. Il existe plusieurs méthodes de fabrication pour réaliser ces guides, notamment l'impression 3D. L'objectif de ce travail est d'évaluer l'apport de l'impression 3D dans la fabrication et la précision des guides chirurgicaux.
Après une présentation de l'évolution des concepts de chirurgie guidée et les différentes technologies d'impression 3D, une analyse de la littérature a été effectuée, nous avons sélectionné 13 articles à l'aide de mots-clés ou associations de mots-clés dans la base de donnée The National Library of Medicine (MEDLINE, PUBMED). Pour illustrer nos propos, un cas clinique sera également présenté. La pérennité de la prothèse supra-implantaire découle en majeure partie du positionnement de l'implant dans le tissu osseux, qualité par conséquent dépendante de l'expérience du praticien. La planification implantaire a pour objectif « d'assembler » différentes données : les données radiographiques et les données « cliniques » matérialisées par les modèles d'étude. L'association de ces données permet de réaliser une pose d'implant virtuelle qui servira de base à la conception de guides chirurgicaux.
La réalisation par un prothésiste dentaire de guides chirurgicaux issus d'un wax up diagnostique a permis de limiter les erreurs de positionnement des implants. Cependant, la planification implantaire numérique ou chirurgie « virtuelle » permet de d'augmenter la précision, de diminuer le temps opératoire de l'intervention et d'aboutir à une chirurgie moins invasive. Cette dernière méthode simple et rapide d'utilisation permet de systématiser la planification implantaire numérique, de l'édentement unitaire à l'édenté total.

TITRE en anglais : The contribution of 3D printing in the manufacturing and the accuracy of surgical guides in dental implantology: current data and a clinical case study.

RÉSUMÉ en anglais :

DISCIPLINE : implantologie

MOTS-CLÉS Français : Impression tridimensionnelle (FMeSH), Conception assistée par ordinateur (FMeSH), Implants Dentaires (FMeSH), Chirurgie assistée par ordinateur (FMeSH), Guides chirurgicaux, Fabrication additive

---

MOTS-CLÉS Anglais : Printing, Three-Dimensional (MeSH), Computer aided-design (MeSH), Dental Implants (MeSH), Surgery, computer-assisted (MeSH), Surgical template, Rapid prototyping, Additive manufacturing

---