

UNIVERSITE DE STRASBOURG

FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

Année 2019

N° 59

THESE

Présentée pour le Diplôme d'Etat de Docteur en Chirurgie Dentaire
le 17 juillet 2019

par

MUTIN Victor

Né le 24 février 1989 à Strasbourg

**PLANIFICATION IMPLANTAIRE ET IMPRESSION CHAIRSIDE DU GUIDE
CHIRURGICAL**

Président : Professeur TADDEI-GROSS Corinne

Assesseurs : Docteur ETIENNE Olivier

Docteur WAGNER Delphine

Docteur BOEHLER Christian

Membre invité : Docteur REYS Guillaume



I. Introduction	6
II. L'impression 3D	7
A. Historique	7
B. Principe	8
1. Par photopolymérisation	8
i. La stéréolithographie	8
ii. Les imprimantes DLP	10
iii. Les imprimantes à jets multiples : Poly-Jet	10
iv. Les imprimantes 3D nanoscopiques : 2PP	11
2. Impression 3D par liage de poudre	12
i. Les imprimantes SLS/DMLS - frittage laser	12
ii. Les imprimantes E-Beam	13
iii. Les imprimantes 3DP	13
iv. Les imprimantes jet d'encre : le Multi-Jet	14
3. Impression 3D par extrusion ou dépôt de matière fondue : FDM	14
4. Impression 3D par encollage : SDL	15
5. La résolution en impression 3D	16
6. Comparaison des différentes technologies	17
C. Matériaux compatibles	17
1. Les plastiques	18
i. Les ABS et simili-ABS	18
ii. Le PLA	19
iii. L'ASA	19
iv. Le PET	20
v. Les polyamides	20
vi. L'alumide	21
vii. Les résines	21
2. Les métaux	22
i. L'aluminium et ses alliages	22
ii. Le gallium	23
iii. Le chrome-cobalt et ses alliages	23
iv. L'acier et ses alliages	23
v. Le titane et ses alliages	24
3. Les céramiques, sables et bétons	24
4. Les matériaux organiques	25
i. Les cires	25

ii. Le bois	25
iii. Le papier	25
iv. Les matières alimentaires	26
v. Les tissus biologiques	26
D. Le post-traitement	27
1. Le rinçage	27
2. La post-polymérisation	28
3. Le retrait des supports d'impression	28
4. Le polissage	29
5. Peinture	29
E. Modèles existants	30
1. Les imprimantes 3D personnelles	30
2. Les imprimantes 3D professionnelles	30
3. Les imprimantes 3D de production	30
F. Application à la chirurgie dentaire	31
G. Cahier des charges d'une imprimante 3D au cabinet pour la réalisation de guides chirurgicaux	31
III. Le guide chirurgical	33
A. Principe : temps par temps de la planification implantaire	33
1. Modèle d'étude	34
2. Imagerie	35
i. La radiographie rétro-alvéolaire ou péri-apicale	35
ii. La radiographie panoramique ou orthopantomogramme	35
iii. L'imagerie 3D	36
3. Choix de la longueur de l'implant	38
4. Choix du diamètre de l'implant	38
5. Choix de l'axe de l'implant	39
6. Le type de chirurgie	40
B. Les différents types de guides chirurgicaux	42
1. Classement des guides chirurgicaux en fonction de la surface d'appui	42
i. Guide chirurgical à appui dentaire	43
ii. Guide chirurgical à appui muqueux	43
iii. Guide chirurgical à appui osseux	43
2. Classement des guides chirurgicaux en fonction du système de guidage	44
i. Les guides à manchon pilote	44
ii. Les guides manchon dans manchon	45

iii. Les guides à trousse spécifique	45
C. Conception	46
1. Méthode conventionnelle	46
2. Numérique	46
i. La numérisation de l'anatomie osseuse	47
ii. La numérisation des dents et des tissus mous	47
iii. La superposition des différents fichiers	49
iv. L'intégration du projet prothétique	49
v. La planification implantaire	49
vi. La conception du guide	50
vii. L'impression et le post-traitement du guide	50
D. Critères de précision et sources d'erreurs	51
1. Sources d'erreurs en imagerie	51
2. Précision en implantologie	51
3. En fonction de l'appui	52
4. En fonction du système de stabilisation	53
5. En fonction du type de chirurgie	53
6. En fonction de la localisation de l'implant	54
7. En fonction de l'expérience du praticien	55
8. Autres avantages et limites de la chirurgie guidée	55
IV. Présentation du protocole Blue Sky Plan et cas cliniques	57
A. La numérisation du patient	57
B. Acquisition dans le logiciel	58
C. Planification implantaire	59
D. Design du guide	60
E. Impression et post traitement	60
F. Cas cliniques	62
1. Cas unitaire - full guided - BlueskyPlan - Formlabs	62
2. Cas multiple 3 implants - Bluesky Plan - Formlabs	63
3. Cas complet - All on 6 maxillaire - forage pilote - dental clinician- Bego	64
V. L'impression 3D de guides chirurgicaux : un investissement ?	65
A. Matériel nécessaire à la chirurgie guidée	65
B. Les services disponibles	66
C. Offre logiciel	67
D. Offre imprimantes et matériaux	69

E. Choix le plus rentable et retour sur investissement	70
VI. Conclusion	73
ANNEXE	74
Références bibliographiques	75
Liste des figures	80

I. Introduction

L'implantologie est la principale révolution en dentisterie de la fin du XXe siècle. Elle a néanmoins connu un grand changement récemment, passant d'une approche guidée par la chirurgie à une approche guidée par la prothèse afin de maximiser les résultats esthétiques et fonctionnels. Le clinicien doit donc partir d'un projet prothétique et faire en sorte que la planification implantaire en découle. Les progrès en informatique et en conception assistée par ordinateur (CAO) ont fait passer ces étapes de planification du physique au virtuel grâce à l'imagerie 3D et les logiciels de CAO et de planification implantaire. Mais comment faire la bascule inverse et repasser d'un projet virtuel à une situation clinique ? C'est autour de ces deux changements d'univers, du patient physique à la planification virtuelle, et de la planification virtuelle à l'intervention physique, que s'articule ce travail de thèse, et en particulier sur la retranscription physique d'un projet implantaire à l'aide de l'impression 3D, cette technologie qui bouleverse depuis le début des années 2000 tous les domaines de l'industrie et qui propose aujourd'hui pléthore de solutions.

II. L'impression 3D

A. Historique

Jusqu'à peu, il existait pour fabriquer des objets trois grandes techniques :

- en soustrayant de la matière (fraisage, sculpture, découpe...)
- en combinant plusieurs matériaux (collage, tissage...)
- en déformant un matériau pour lui donner la forme voulue (moulage, pliage...).

La fabrication d'un objet combinait généralement ces différents procédés, ce qui multipliait les étapes, les outils et les matériaux.

L'impression 3D permet de créer la pièce en un seul passage, couche après couche. Toutes les différentes techniques d'impression 3D relèvent d'un procédé additif et fonctionnent par ajout successif de matière : l'objet prend forme au fur et à mesure.

L'impression 3D a d'abord relevé de la science-fiction, comme dans le dessin animé Tintin et le lac aux requins de 1972 où le professeur Tournesol invente un « produit (qui) permet de faire une copie en trois dimensions de n'importe quel objet » (figure 1.1). Puis à la fin du XXe siècle, l'industrie commence à développer le concept principalement pour le prototypage.



Figure 1.1 : le produit du professeur Tournesol

Le 16 juillet 1984, trois Français Jean-Claude André, Olivier de Witte, et Alain le Méhauté déposent le 1er brevet sur la fabrication additive pour l'entreprise CILAS ALCATEL, brevet qui tombe car abandonné par l'entreprise (1). Trois semaines plus tard, le 8 août 1984, l'Américain Chuck Hull brevète la stéréolithographie (2). Le terme d'impression 3D n'existe pas encore, il s'agit pour l'instant de stereolithography apparatus (du grec « stereo » solide, volume « lithos » pierre et « graphô » écrire) qui désigne un procédé de fabrication par couches successives d'un matériau sensible aux rayons ultraviolets. C'est la société 3D Systems de Hull qui lance fin 1988 la toute première imprimante 3D, la SLA-250. Nous devons aussi à Chuck Hull le nom de l'extension de fichier .STL pour les fichiers destinés à être imprimés.

B. Principe

1. Par photopolymérisation

La photopolymérisation est un procédé qui utilise des polymères liquides capables de se solidifier à la lumière. Il existe différentes technologies qui fonctionnent sur ce principe.

i. La stéréolithographie

La stéréolithographie (ou SLA) est le premier procédé d'impression 3D à avoir vu le jour, breveté par Chuck Hull et l'entreprise 3D Systems en 1986 (2). Elle repose sur la solidification couche par couche d'un photopolymère liquide par un rayon laser ultra-violet. L'imprimante SLA est composée d'une cuve de photopolymère liquide, d'une plateforme mobile verticalement qui vient supporter l'objet en cours de fabrication, d'un laser et d'un ordinateur qui commande la position de la plateforme et le faisceau laser.

La plateforme est positionnée à une certaine profondeur en dessous du niveau du polymère, déterminant l'épaisseur de la couche à imprimer. Par la suite, le faisceau laser vient balayer la surface aux endroits définis par le fichier informatique, et sous l'action des UV, la résine polymérise sous forme solide, formant la première couche de notre objet. La plateforme mobile se déplace alors d'une épaisseur de couche. Le procédé est ainsi répété couche par couche jusqu'à obtention complète du modèle.

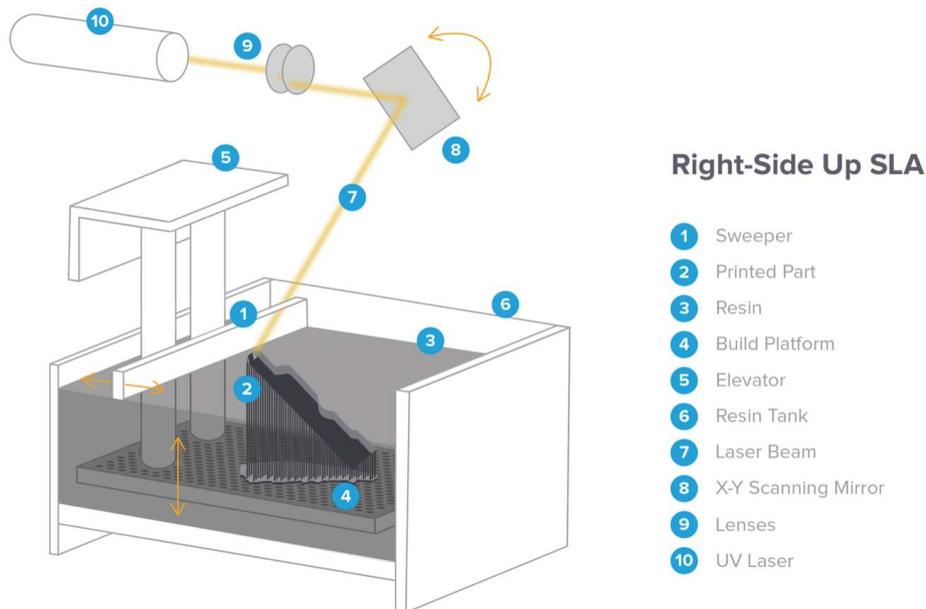


Figure 1.2 : principe de la stéréolithographie

En avril 2019, Formlabs commercialise la Form 3 qui fonctionne selon une technologie intitulée Low Force Stereolithography ou LFS, annoncée comme une forme avancée de stéréolithographie.

Dans le système SLA, les forces exercées sur la pièce pendant l'impression et le décollement sont importantes, induisant des limitations relatives aux matériaux et au volume d'impression, ainsi que l'utilisation de supports solides afin de ne pas abîmer les pièces.

La technologie LFS développée par Formlabs outrepassé ces limites en utilisant un bac flexible et une technique d'illumination linéaire pour améliorer la qualité de surface et la précision de l'impression.

ii. Les imprimantes DLP

Similaire à la stéréolithographie, le procédé DLP pour Digital Light Processing fonctionne lui aussi par exposition de polymères photosensibles à la lumière. Mise au point par Texas Instrument en 1987 (3), elle est utilisée pour la première fois en impression 3D par l'entreprise allemande Envision TEC en 2002. Ici, c'est un projecteur à écran numérique qui va flasher une seule image de chaque couche sur la plateforme de fabrication.

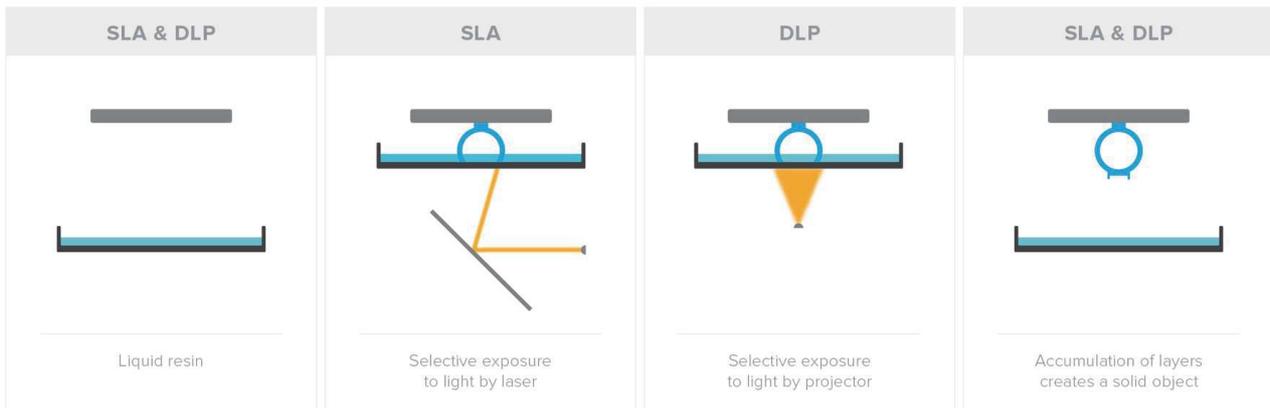


Figure 1.3 : comparaison SLA/DLP

Une évolution récente de la technologie DLP vient par l'utilisation d'un panneau de LEDs UV qui projette la lumière à travers un écran LCD. Cet écran va alors jouer le rôle de masque.

iii. Les imprimantes à jets multiples : Poly-Jet

Breveté par la société Objet Ltd. en 1999 (4), cette technologie combine la technologie jet d'encre (inkjet) et l'utilisation de polymères photopolymérisables. Des têtes d'impression vont projeter des jets successifs de photopolymères sur une surface, couche après couche. À chaque projection, une lumière ultraviolette va être émise pour durcir la matière. Ce système permet d'utiliser concomitamment des matériaux différents sur les différentes buses d'impression, permettant ainsi d'imprimer en même temps des matériaux souples et rigides ou bien opaques et transparents.

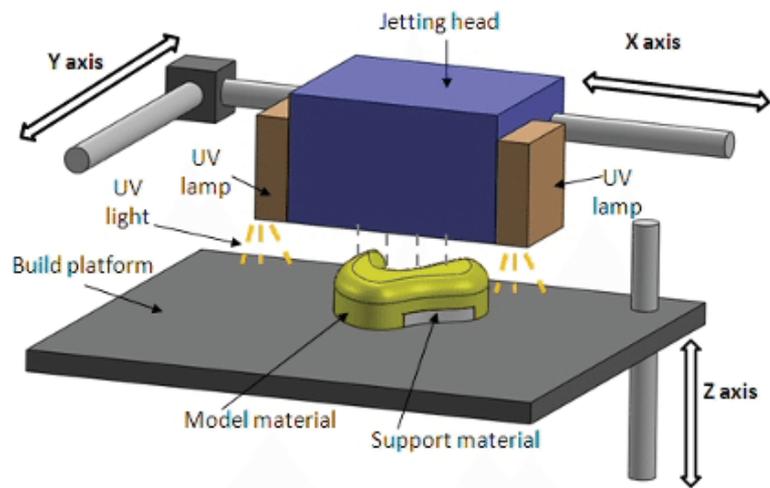


Figure 1.4 : principe du poly-jet

iv. Les imprimantes 3D nanoscopiques : 2PP

Dans la 2PP pour Two Photons Polymerization, un laser à lumière pulsée est concentré sur une solution photopolymère et seules les zones où la lumière est la plus intense vont être polymérisées. Il est alors possible d'imprimer des objets avec une résolution de l'ordre des 100 nm. (5)

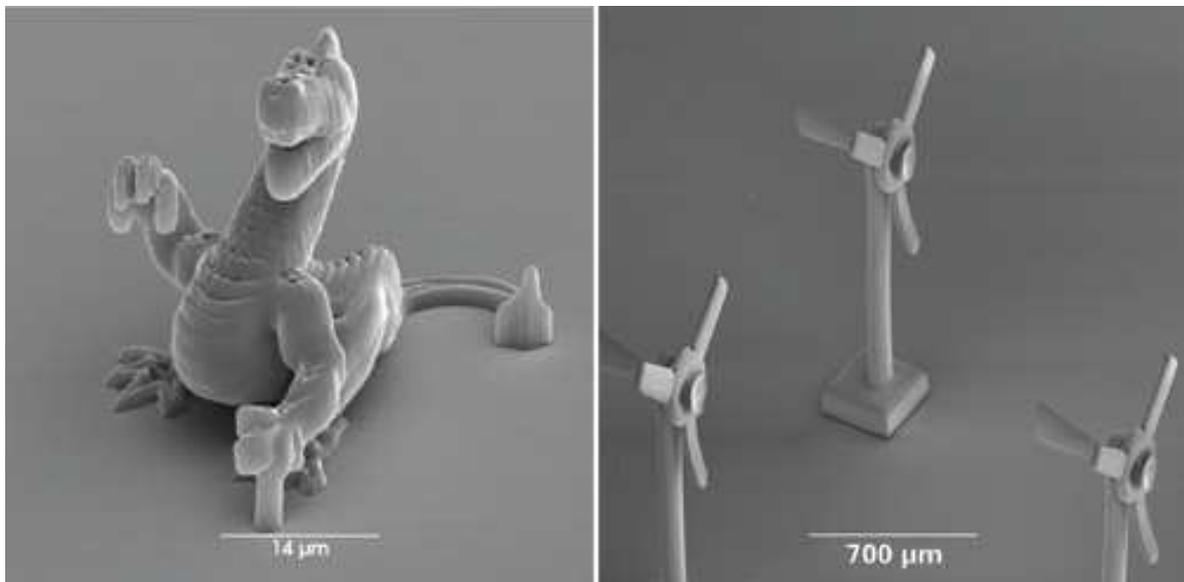
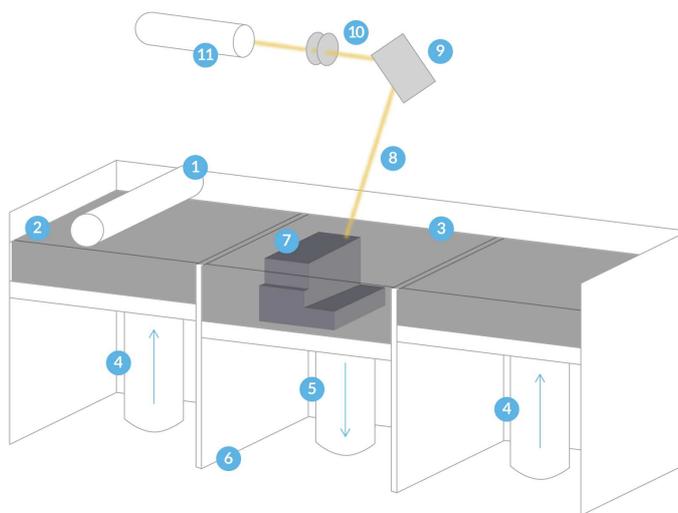


Figure 1.5 : images au microscope électronique à balayage d'un dragon et d'une éolienne réalisées par polymérisation à 2 photons

2. Impression 3D par liage de poudre

Ici, ce n'est pas un polymère liquide qui va polymériser, mais de la poudre qui va être fusionnée grâce à différentes techniques. Il est donc possible d'utiliser un grand nombre de matériaux pouvant être imprimés et l'utilisation du métal est une des grandes avancées du domaine.

Selective Laser Sintering



SLS Printer

- 1 Leveling Roller
- 2 Powder Feed Supply
- 3 Powder Bed
- 4 Powder Feed Piston
- 5 Build Piston
- 6 Build Chamber
- 7 Sintered Part
- 8 Laser Beam
- 9 X-Y Scanning Mirror
- 10 Lenses
- 11 Laser



Figure 1.6 : principe du frittage laser

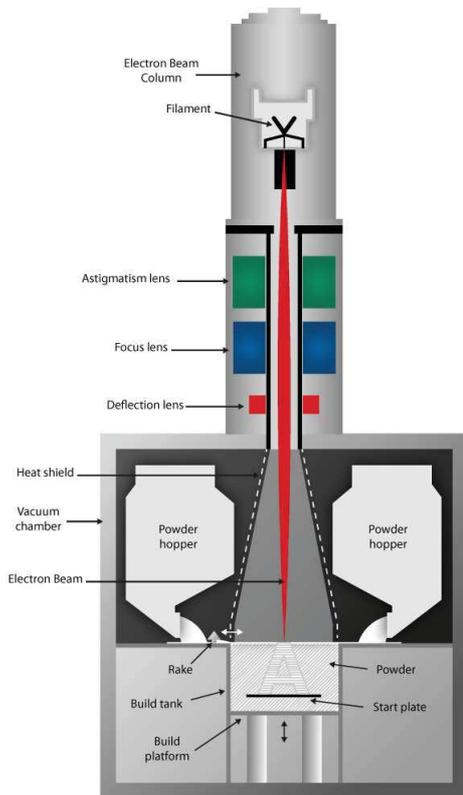
i. Les imprimantes SLS/DMLS - frittage laser

La technologie SLS pour Selective Laser Sintering (frittage laser sélectif) a été développée et brevetée par le Dr. Carl Deckard de l'Université du Texas à Austin en 1986 (6). Un laser va fusionner de fines particules de poudre, couche par couche, comme les autres systèmes de CAO. Un rouleau va venir étaler une fine couche uniforme de poudre préchauffée sur la chambre de construction et le laser va venir balayer la poudre suivant le tracé de la section de l'objet, pour faire fondre jusqu'à la fusion les particules de poudre. Cette opération s'appelle le frittage, comme lors de la cuisson des poteries ou des céramiques. Une fois la tranche fusionnée, le rouleau va étaler une nouvelle couche de poudre jusqu'à fabrication complète de l'objet.

La pièce ainsi formée va devoir être retirée et nettoyée pour la débarrasser de la poudre non frittée.

Le matériau utilisé dans cette méthode est donc une poudre qui peut être de céramique, de polymère, de verre ou de métal. Dans ce dernier cas, la technologie porte le nom de Direct Metal Laser Sintering (DMLS).

ii. Les imprimantes E-Beam



La technologie E-Beam ou EBM pour Electron Beam Melting (fusion par faisceau d'électrons) a été mise au point par Arcam, une société suédoise, rachetée par General Electric en 2016. Ici, l'impression est réalisée dans une chambre à vide où un faisceau va projeter des électrons à très grande vitesse sur une couche de poudre de métal entraînant la fusion des particules de métal, couche après couche. Cette méthode a été mise au point par l'École Polytechnique de Chalmers en Suède (7).

Figure 7 : schéma d'une imprimante EBM

iii. Les imprimantes 3DP

La technologie 3DP pour Three Dimensional Printing (impression tridimensionnelle), développée au MIT (8) est détenue par la société Z corporation rachetée par 3D Systems en 2012. Elle fonctionne par abaissement successif d'une plateforme sur laquelle un rouleau étale une fine couche de poudre. De la même façon qu'une imprimante jet d'encre, des têtes d'impression vont déposer un liant qui vient lier les particules de poudre entre elles et ainsi les solidifier. En utilisant des liants teintés, il devient possible d'imprimer simultanément plusieurs milliers de couleurs. C'est aujourd'hui la seule technologie avec le SDL qui permet cela.

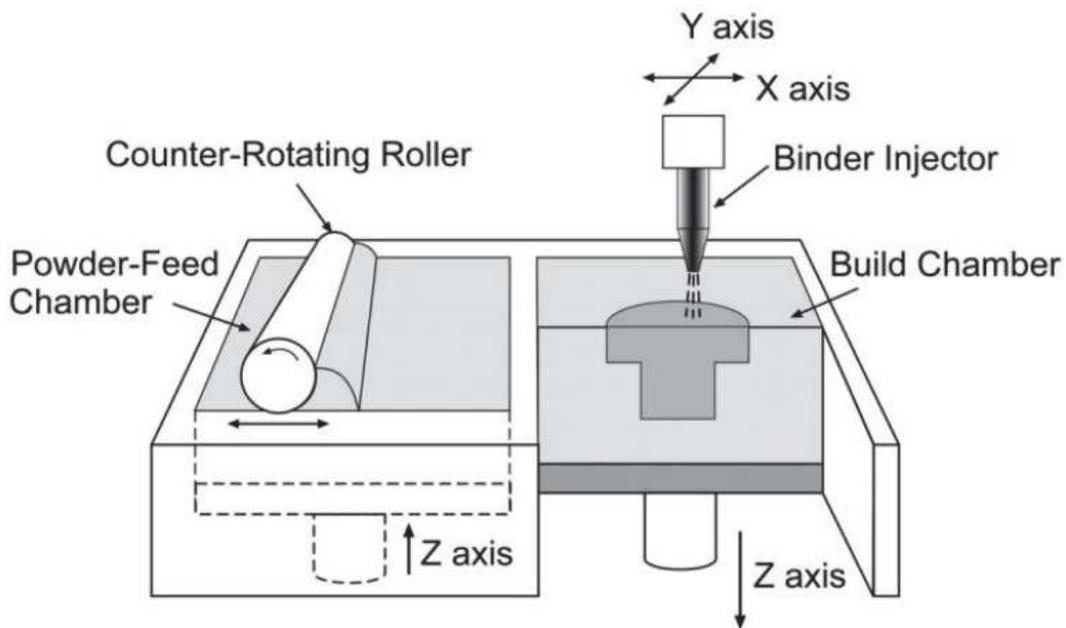


Figure 1.8 : principe de l'impression 3DP

iv. Les imprimantes jet d'encre : le Multi-Jet

Cette technologie fonctionne comme une imprimante jet d'encre classique, où les têtes d'impression vont déposer des gouttes de cire fondue, puis une glu spéciale est déposée de manière à solidifier au fur et à mesure l'objet en cours d'impression. Les fabricants 3D Systems et Stratasys se partagent cette technologie peu utilisée.

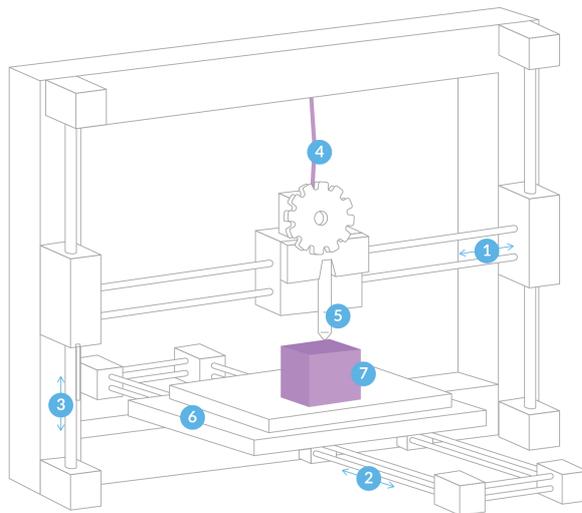
3. Impression 3D par extrusion ou dépôt de matière fondue : FDM

Dans les techniques décrites jusqu'ici, de la lumière ou un liant servaient à solidifier un matériau liquide ou sous forme de poudre. Il existe aussi un autre type d'impression consistant à déposer au fur et à mesure de la matière : la technique de dépôt de matière fondue ou FDM pour Fused Deposition Modeling.

Cette technologie a été développée et brevetée en 1989 par S. Scott Crump (9), fondateur de la société Stratasys qui commercialise en 1990 les premières imprimantes utilisant ce procédé. Mais cette technologie a connu un fort renouveau et de nombreuses évolutions dans les années 2000 quand le brevet expire et que la communauté open-source s'en empare, notamment avec le projet RepRap (replicating rapid prototyper). Cet engouement pour cette technologie a permis une baisse significative des prix.

Comme son nom l'indique, l'imprimante déroule un filament de plastique et le chauffe à haute température via une buse (extrudeur ou tête d'extrusion) pour ensuite le déposer en couches successives très fines, de la base à son sommet.

Fused Deposition Modeling



FDM Printer

- 1 X Direction Motor
- 2 Y Direction Motor
- 3 Z Direction Motor
- 4 Filament
- 5 Extrusion Nozzle
- 6 Build Platform
- 7 Printed Part



Figure 1.9 : principe du dépôt de matière fondue

4. Impression 3D par encollage : SDL

La technologie SDL pour Selective Deposition Laminated (laminage par dépôt sélectif) est encore un procédé différent des deux autres présentés. Il s'agit de découper les couches de l'objet dans du papier avec un laser. Ces couches seront par la suite encollées les unes aux autres, formant ainsi l'objet désiré. Ces feuilles de papier pourront être colorées avant d'être solidarisiées.

Cette technologie a été inventée en 2003 (10) par les frères Conor et Fintan McCormack et leur compagnie Mcor Technologies.

L'avantage premier de cette technologie est d'utiliser le matériau le moins cher du marché, mais permet aussi l'utilisation d'une multitude de couleurs et d'obtenir une très bonne résolution. Par contre, les objets obtenus avec ce procédé demandent beaucoup de post-traitement et de finition, de même que les objets creux ou avec des volumes internes sont difficiles à obtenir. En effet, il est quasiment impossible de retirer le papier à l'intérieur de certaines zones.



Figure 1.10 : objet réalisé par impression FDL

5. La résolution en impression 3D

Dans l'impression 3D, il faut tenir compte de trois dimensions : les deux dimensions planaires (X et Y) et la dimension Z spécifique à l'impression 3D. Les dimensions planaires et Z étant généralement contrôlées à travers des mécanismes différents, leurs résolutions sont différentes et doivent être traitées séparément. Cela prête à confusion concernant la signification du terme « résolution » dans l'impression 3D et le niveau de qualité d'impression attendue.

La résolution d'une imprimante 3D doit donc être un ensemble de deux nombres :

- le diamètre du laser ou de la buse d'impression sur l'axe XY,
- la hauteur de couche sur l'axe Z.

Une plus petite hauteur de couche ne signifie pas nécessairement une meilleure précision et implique nécessairement une augmentation du temps d'impression (il y a 4 fois plus de couches si l'épaisseur des couches est de 25 μm par rapport à une impression en 100 μm) et qui dit plus de couches dit plus de distorsions et plus de risques d'erreur. Par exemple, même à un taux de succès de 99,99 % par couche, la multiplication de la résolution par quatre réduit les chances de succès de l'impression de 90 % à 67 %, en partant du principe que l'échec de l'impression d'une couche entraîne l'échec total de l'impression.

6. Comparaison des différentes technologies

Il existe aujourd'hui un grand nombre de technologies, mais trois se démarquent sur le marché de l'impression 3D : la technologie de dépose de matériau fondu (FDM), la stéréolithographie (SLA et DLP) et le frittage laser (SLS). En effet, les autres technologies sont encore difficilement accessibles en raison de leur prix et de leur utilisation très spécifique. Voici qui suit un tableau comparatif de ces trois technologies en matière d'usage, de résolution, de prix et de coût.

	FDM	SLA/DLP	SLS
Avantages	Rapidité Coût de l'imprimante et du consommable	Précision Etat de surface	Solidité Liberté de design Pas besoin de support
Inconvénients	Précision Détails Design des pièce limité	Limitation de volume Pièce sensible aux UV	Prix des machines Etat de surface rugueux Choix de matériaux limité
Résolution XY Z	0,25mm 0,1mm	0,140mm 0,025mm	0,06mm
Usage	Prototypage rapide low-cost	Prototypage fonctionnel Dentaire Bijouterie	Prototypage fonctionnel Fabrication à petite échelle
Coût	2 000 à 20 000 US\$	3 500 à 80 000 US\$	10 000 à 200 000 US\$

Figure 1.11 : tableau comparatif des 3 principaux systèmes d'impression 3D

C. Matériaux compatibles

C'est l'usage d'une imprimante 3D qui détermine par la suite le type de matériaux nécessaire. En effet, un joaillier, un dentiste ou un ingénieur en aérospatiale ne cherchera pas les mêmes propriétés des matériaux pour les pièces dont il a besoin.

Aujourd'hui, deux familles de matériaux dominent l'impression 3D, les plastiques et les métaux. Il est par ailleurs possible d'utiliser les céramiques et les matières organiques. Évidemment, tous les matériaux ne sont pas compatibles avec toutes les technologies. Les technologies de frittage de poudre utilisent majoritairement des poudres métalliques, de nylon et de céramique, tandis que la stéréolithographie utilise des polymères liquides, souvent des plastiques et certaines imprimantes FDM sont aujourd'hui conçues pour utiliser du béton ou encore des matières alimentaires comme le fromage ou le chocolat.

1. Les plastiques

Les plastiques sont des polymères susceptibles d'être façonnés, généralement à chaud et sous pression. Ils sont très utilisés en impression 3D.

i. Les ABS et simili-ABS

L'acrylonitrile butadiène styrène (ABS), un polymère thermoplastique styrénique, est l'un des matériaux les plus utilisés en impression 3D, surtout avec la technologie par dépôt de filament. Fondant entre 230 et 260 °C, il peut supporter des températures relativement basses (jusqu'à -20 °C) et élevées (80 °C) et possède aussi des propriétés mécaniques intéressantes le rendant souple et résistant aux chocs, ainsi qu'un très beau rendu avec une surface lisse et brillante. Lorsqu'il est utilisé en impression par la technique FDM, il nécessite l'utilisation d'un plateau d'impression chauffant afin d'éviter le décollement des pièces, car il rétrécit au contact de l'air en refroidissant. Il n'est pas biodégradable et relâche des particules fines, potentiellement toxiques.

Il existe en réalité plusieurs types d'ABS, aux multiples propriétés dont l'aspect diffère en fonction de la technologie 3D utilisée. Ce matériau se retrouve par exemple en bobine de filament d'1,75 ou de 3 mm pour les impressions par dépôt de filament fondu dans des couleurs variées. Il est aussi possible de le retrouver dans une imprimante par stéréolithographie sous forme de polymère liquide, ainsi que dans la technologie Polyjet.

L'ABS est un matériau très répandu dans les objets du quotidien, notamment dans l'automobile où il entre dans la composition par exemple de la carrosserie des Citroën Méhari ou dans l'enveloppe externe des casques de moto. C'est aussi le matériau des célèbres briques Lego.



Figure 1.12 : briques Lego en ABS

ii. Le PLA

L'acide polylactique ou PLA, contrairement à l'ABS est biodégradable car fabriqué à partir d'amidon de maïs. Il fond à une température de 150 °C et est plus difficile à manipuler que l'ABS en raison de sa vitesse de refroidissement et de durcissement élevée, mais ne nécessite pas de plateau chauffant. Grâce à ses propriétés environnementales, le PLA est de plus en plus utilisé par les particuliers, mais il est en revanche sensible à l'eau et aux rayons ultraviolets. Il se retrouve sous de très différentes couleurs et peut tout à fait être utilisé pour des objets destinés à être au contact d'aliments.

Il existe un dérivé du PLA, l'acide polyvinylique, qui est très utilisé en impressions 3D, surtout comme matériau de support dans les impressions en ABS ou PLA, car il se dissout dans l'eau après impression. Il trouve sa place principalement dans les imprimantes FDM à plusieurs buses d'injection. Une tête sera spécifique à l'impression du support en acide polyvinylique.

ABS et PLA sont globalement les deux matériaux utilisés dans les impressions par dépôt de matière fondue.



Figure 1.13 : bobine de PLA pour une impression FDM

iii. L'ASA

L'acrylonitrile styrène acrylate est un matériau similaire à l'ABS avec une meilleure résistance aux rayons ultraviolets. Il nécessite un plateau chauffant et il est conseillé d'utiliser une imprimante avec une enceinte fermée ou d'imprimer dans un espace ouvert en raison des émissions de styrène.

iv. Le PET

Le polytéréphtalate d'éthylène, plus connu sous le nom de PET, se trouve principalement dans les bouteilles en plastique jetables. Il est utilisé dans les impressions FDM sous forme de bobine et fond à une température d'environ 245 °C. Plus solide que l'ABS, il est indiqué dans l'impression de pièces fonctionnelles qui demandent à la fois solidité et flexibilité (coque de téléphone, pièces mécaniques, robotique...) ainsi que pour des pièces destinées au contact alimentaire. Il est 100 % recyclable, n'émet aucune odeur en impression et ne nécessite pas de plateau chauffant.



Figure 1.14 : bobine de filament PET

v. Les polyamides

Les objets en polyamide sont souvent fabriqués à partir d'une poudre fine, granuleuse et blanche en utilisant la technologie du frittage sélectif par laser (SLS), mais certaines familles de ce matériau, comme le nylon, se présentent sous la forme d'un filament et s'utilisent avec la technique de dépôt de matière fondue (FDM). Grâce à leur structure semi-cristalline, ils comportent de nombreux avantages : grande stabilité, résistance importante aux chocs et sont à la fois rigides et flexibles. Biocompatibles, ils se retrouvent dans les pièces destinées au contact avec les aliments, sauf ceux contenant de l'alcool.

vi. L'alumide

L'alumide est une poudre composée de polyamide et d'aluminium utilisée en technologie de frittage laser. Avec une surface légèrement poreuse et d'un aspect sableux et granuleux, ce matériau offre une grande solidité, une haute résistance à la température (172 °C max.) et aux chocs et une relative flexibilité. Cependant, des post-traitements sont généralement nécessaires : meulage, polissage, revêtement et fraisage par exemple.

L'alumide est utilisée pour des modèles complexes, pièces de conception ou pour des petites séries de modèles fonctionnels, ayant besoin d'une rigidité importante et d'un aspect proche de l'aluminium. La technique employée implique des limites géométriques faibles.

vii. Les résines

Les résines, aux multiples propriétés, sont la troisième grande famille des matériaux utilisés en impression 3D après les thermoplastiques et les polyamides. Dans les technologies SLA de photopolymérisation, ces résines sont photosensibles et peuvent être thermoplastiques ou thermosolides, mates ou brillantes. La gamme de couleurs de ces résines n'est pas très étendue. Elles sont principalement noires, blanches ou transparentes, mais peuvent facilement être peintes.

Il existe de la résine « classique » solide et résistante, mais cassante, de la résine calcinable qui peut être brûlée afin de créer des moules, de la résine flexible avec une grande élasticité et une mémoire de forme, mais peu résistante, au contraire de la résine « tough » à haute résistance, mais moins précise, de la résine haute température (avoisinant les 300 °C), de la résine durable comme le polypropylène chimiquement inerte et semi-rigide ou encore de la résine biocompatible de classe 1.

Les résines en impression 3D nécessitent une phase de post-traitement lors de laquelle il faut nettoyer les pièces à l'alcool isopropylique afin d'éliminer les restes de résine à la surface de la pièce, ainsi que pour certaines une phase supplémentaire de photopolymérisation.

Figure 1.15 : réservoir de résine Formlabs



2. Les métaux

Les métaux constituent le deuxième type de matériaux utilisés en impression 3D. L'impression 3D métal a connu ces dernières années une croissance très rapide avec de nombreux développements technologiques, caractérisés par l'arrivée de fabricants ambitieux proposant des procédés de fabrication innovants et toujours plus abordables, mais également un portefeuille de matériaux chaque jour un peu plus large. Il est possible aujourd'hui d'imprimer de l'aluminium, du titane, de l'acier ou encore des métaux précieux comme l'or ou le bronze. Ces matériaux sont prisés dans l'industrie pour créer des composants pour l'outillage ou des pièces finies dans l'aérospatiale, l'automobile ainsi que dans le médical.



Figure 1.16 : bridge complet dont l'armature est imprimée. Le métal est, de droite à gauche, brut, poli et céramisé.

i. L'aluminium et ses alliages

L'aluminium utilisé en impression 3D est un alliage contenant de l'aluminium, de la silice et du magnésium avec la technologie de frittage laser direct. Ce métal est un excellent compromis entre légèreté et solidité, il est donc principalement utilisé dans les domaines où la notion de poids est essentielle comme en aéronautique, aérospatiale ou pour les voitures de course. Moins robuste que les aciers, il a l'avantage d'être résistant à la corrosion et il peut être soudé. Il est beaucoup utilisé en fonderie, car il est très résistant à la chaleur.

ii. Le gallium

Encore au niveau de la recherche et développement, le gallium est utilisé en alliage avec 25 % d'indium pour imprimer des objets à partir de petites bulles de métal ou à partir des câbles de métal autoportants pour rejoindre des composants électroniques par exemple. La particularité de cet alliage est due à la basse température nécessaire pour faire fondre le gallium (29,7° C) et au fait que les deux métaux durcissent à l'air, tandis que l'intérieur reste liquide, pouvant imprimer ainsi des pièces flexibles. (11)

iii. Le chrome-cobalt et ses alliages

Les alliages à base de cobalt, notamment le chrome-cobalt, sont utilisés depuis très longtemps pour des moulages avec la méthode de la cire perdue. Imprimées avec la technique E-Beam et DMLS, les pièces en alliages de cobalt présentent une meilleure qualité que celles obtenues avec les méthodes de production traditionnelles comme le moulage à la cire perdue.

Certains alliages cobalt-chrome, comme le CoCrMo (cobalt, de chrome et molybdène), sont très utilisés en médecine pour la fabrication des prothèses tant en orthopédie qu'en odontologie grâce à sa rigidité et son état de surface lisse et résistante à l'usure et à la corrosion. De plus, les industries automobile et aérospatiale utilisent certains alliages cobalt-chrome-molybdène très résistants à la chaleur.

iv. L'acier et ses alliages

Le métal le plus utilisé dans l'industrie pour la fabrication de tout type de pièces est l'acier. Il a aussi été le premier métal utilisé en impression 3D. La société française Phoenix récemment rachetée par le leader 3D System avait notamment développé des brevets sur l'acier. L'alliage le plus utilisé est l'acier inoxydable, plus connu sous le nom d'inox. Très présent dans la vie quotidienne, les industries mécaniques et la médecine, il présente de bonnes propriétés mécaniques et permet d'obtenir une surface polie et brillante. Plusieurs acteurs de la fabrication additive proposent ce matériau avec les technologies de frittage laser.

Il est aussi possible d'imprimer des pièces en bronze ou en or en utilisant l'inox comme matériau de base : les couches de poudre d'inox sont recouvertes de colle pour injecter du bronze à l'impression par exemple.

La société EOS propose l'acier Maraging Steel MS1, un acier martensitique qui est utilisé dans la fabrication d'outillages ou de moules grâce à sa haute dureté et à sa résistance à la rupture.

En 2017, des chercheurs californiens ont montré que sous certaines conditions, l'acier imprimé en 3D est trois fois plus solide que celui fabriqué avec les méthodes traditionnelles (12).

v. Le titane et ses alliages

Le titane est le matériau phare de la médecine et de l'aérospatiale grâce à son excellent compromis entre solidité et poids, en plus de sa grande résistance à la corrosion et sa biocompatibilité. Cependant, les techniques traditionnelles de fabrication du titane s'avèrent compliquées et coûteuses, ce matériau durcissant rapidement. De plus, il est souvent contaminé par des impuretés lors de sa phase de soudure. L'impression 3D rend plus facile la fabrication des pièces en titane et évite les impuretés lors de la soudure. Cependant, un grand inconvénient de ce matériau est son coût élevé, autour de 50 fois supérieur à celui de l'acier. L'alliage le plus utilisé est le Ti6Al4V.

3. Les céramiques, sables et bétons

Très peu d'imprimantes sont aujourd'hui capables d'imprimer des céramiques, le procédé étant complexe et entraînant des contraintes de design. L'impression se déroule en deux temps : le matériau composite est tout d'abord imprimé par frittage laser, puis l'objet subit un traitement suivi d'un émaillage à chaud à plus de 1 000 °C, comme pour un émaillage traditionnel où différentes couleurs pourront être appliquées.

Le sable est aussi compatible avec l'impression 3D. Résistant très bien à la chaleur, il convient parfaitement pour des moulages nécessitant des températures élevées. La technologie est un peu particulière où l'imprimante mixe le sable et un liant et le vaporise couche par couche.

Les recherches se multiplient aussi sur l'impression 3D de matériau de grande surface et il est aujourd'hui envisageable d'imprimer en 3D des maisons. La société Contour Crafting propose ainsi d'imprimer en une vingtaine d'heures une maison d'une surface de 200 m². Les matériaux utilisés sont des simili-bétons et permettraient en situation d'urgence de construire des habitations très rapidement et à moindre coût (13).

4. Les matériaux organiques

i. Les cires

Les cires sont utilisées en impression 3D pour réaliser le maître-modèle qui servira plus tard à réaliser des moules et utiliser la méthode de la cire perdue. L'impression 3D cire convient à différents secteurs, la bijouterie, la conception de pièces en métal ou encore des prothèses dentaires. Cette technique permet d'obtenir une précision très importante, allant jusqu'à 25 μm , bien plus précis qu'en méthode traditionnelle. Les cires sont utilisées dans les technologies Poly-Jet, Multi-Jet et FDM.

ii. Le bois

Le bois, ou plutôt du bois composite composé à 40 % de bois recyclé et de résine plastique, peut aujourd'hui être imprimé grâce à la technologie de filament fondu. La température d'impression, comprise entre 185 et 230 °C, permet d'obtenir une couleur claire ou foncée à partir d'un bois standard. Il est donc possible de nuancer et d'apporter une touche personnelle sans couche additive. Le bois composite résiste aux intempéries, au soleil et ne pourrit pas avec le temps. De plus, il ne nécessite pas d'entretien particulier comme le demanderait du vrai bois. Ces avantages en font une matière première intéressante pour imprimer des objets à l'aspect du bois mais sans ses inconvénients.

iii. Le papier

Le papier s'imprime grâce à la technologie déjà décrite du laminage par dépôt sélectif ou SDL. Ces imprimantes combinent un procédé additif, via la superposition de feuilles de papier A4 sur lesquelles sont déposés un liant et des encres de couleur, ainsi qu'un procédé soustractif qui, par l'intermédiaire d'un traceur, vient découper le bloc de feuilles selon la forme de l'objet désiré.

Bien que le terme d'impression 3D puisse paraître trompeur, cette technologie a toutefois l'avantage d'être l'une des rares à permettre la fabrication d'objets sans limitation dans le choix des couleurs. L'utilisation de papier comme matériau source lui donne également un vrai intérêt économique et écologique, mais peut aussi s'avérer un frein pour la création de pièces mécaniques ou nécessitant une bonne solidité.

iv. Les matières alimentaires

La technologie à dépôt de filament fondu peut facilement s'adapter à l'impression de matériaux alimentaires : il suffit de remplacer l'extrudeur par une seringue remplie d'un aliment en pâte et il devient alors possible d'imprimer toutes sortes de formes à partir de matières diverses comme le chocolat, le fromage, le houmous ou du glaçage en sucre pour la pâtisserie. Il est tenu de préciser que la machine ne crée pas de matière, mais lui donne une forme voulue. Ces technologies sont encore lentes et peu précises et sont plutôt réservées à un usage occasionnel et posent en outre des problèmes d'hygiène alimentaire.

v. Les tissus biologiques

L'impression 3D de matière organique ne se résume pas à la création de formes, mais vraiment d'imprimer à l'aide de cellules vivantes des tissus. Différentes méthodes existent :

- bio-impression « inkjet » où des imprimantes sont modifiées pour déposer des gouttelettes de bio-matériaux,
- impression type FDM avec des solutions extrudées à l'aide d'une micro-aiguille,
- stéréolithographie d'hydrogels sensibles à la lumière.

En 2015, le marché de la bio-impression a été évalué à 100 milliards de dollars et devrait connaître une croissance de 35,9 % entre 2017 et 2022, surpassant de loin de nombreux marchés reliés à l'impression 3D. Les acteurs clés attendus sont toujours les pays d'Amérique du Nord – le leader étant les Etats-Unis qui est suivi du Canada, puis l'Europe avec l'Angleterre et l'Allemagne comme leaders. La croissance principale du marché se concentrera sur le développement de tissus et d'organes dans un premier temps. Les progrès médicaux réalisés aujourd'hui permettent d'imaginer que, d'ici une dizaine d'années, il sera possible de réaliser des greffes d'organes humains imprimés en 3D, sans doute l'une des plus grandes révolutions médicales de l'Histoire. Des chercheurs canadiens ont par exemple réussi à imprimer un réseau d'hydrogel chargé en acide rétinoïque pour le traitement du glioblastome (14), ou encore des chercheurs allemands sont capables aujourd'hui d'imprimer des matrices pour le développement de cardiomyocytes, cellules qui seront utilisées pour réaliser des patchs cardiaques sur-mesure. (15)

D. Le post-traitement



Figure 1.17 : pièce en ABS après et avant traitement par acétone

En fonction de la technique et du matériau utilisé ainsi que de l'usage souhaité, des étapes de post-traitement de la pièce sont nécessaires avant son utilisation. Seul le post-traitement de pièces imprimées à l'aide des 3 technologies principales que sont le dépôt de matière fondue (FDM), la stéréolithographie (SLA) et le frittage laser (SLS) sera développé ici.

1. Le rinçage

En SLA, la pièce en cours d'impression trempe littéralement dans un bain de résine liquide non polymérisée. La première étape à réaliser dès la fin de l'impression est de rincer et d'agiter la pièce dans un bain d'alcool isopropylique (IPA) afin d'éliminer la couche de résine liquide à la surface de la pièce imprimée. Cette étape peut être réalisée plusieurs fois. Formlabs propose une solution de lavage intégrée, la Formwash, où une turbine d'entraînement magnétique vient agiter la solution d'IPA.



Figure 1.18 : FormWash et kit de finition Form2 - Formlabs

2. La post-polymérisation

Après le retrait des excédents de résine, certains matériaux utilisés dans la technologie SLA ou DLP nécessitent une seconde phase de polymérisation afin d'atteindre leurs propriétés mécaniques et esthétiques optimales. Il convient dès lors de suivre les recommandations du fabricant (durée, température et longueur d'onde) et de réaliser cette phase de polymérisation dans une chambre de polymérisation ultra-violet. De nouveau, Formlabs propose une solution intégrée, la FormCure, où des LEDs vont permettre la polymérisation de la pièce qui repose sur un plateau tournant. Il est possible de réaliser cette étape après le retrait des supports d'impression, mais la pièce risque de se déformer pendant cette seconde phase de polymérisation.



Figure 1.19 : FormCure - Formlabs

3. Le retrait des supports d'impression

En FDM et en SLA, l'impression 3D nécessite l'utilisation de supports d'impression. En effet, un objet imprimé en 3D se construisant couche après couche, où chaque couche se dépose sur la précédente, que se passe-t-il quand il n'existe pas de couche précédente? Le plastique fondu qui est extrudé ou la résine qui sera polymérisée ne tiendront pas tout seuls dans les airs, il faut qu'ils reposent sur quelque chose. C'est le rôle des supports. Ces supports répondent à des règles strictes d'utilisation qui ne seront pas décrites ici, mais restent nécessaires à la réussite de l'impression.

Une fois l'impression terminée, la pièce sera retirée de son plateau d'impression et les supports seront découpés à l'aide d'une pince coupante, d'un cutter ou d'un bistouri.

Certains supports sont solubles : c'est le cas du PVA (alcool polyvinylique) et du HIPS (polystyrène choc, un simili-ABS). Il suffit donc de plonger la pièce dans une solution (eau chaude pour le PVA, D-Limonene pour le HIPS). Il faut utiliser une imprimante à double buse d'extrusion pour pouvoir dissoudre uniquement les supports et pas toute la pièce.



Figure 1.20 : deux dispositions différentes de supports d'impression

4. Le polissage

En fonction du résultat escompté, la pièce peut avoir besoin d'être polie. FDM ou SLA, le papier de verre avec des grains de plus en plus fins sera le meilleur outil. Pour certains filaments, un passage dans un bain de vapeur d'acétone permet l'obtention d'une pièce parfaitement lisse et brillante. Attention cependant à ne pas laisser la pièce trop longtemps dans le bain de vapeur sous peine de voir certains détails s'effacer.

5. Peinture

Une fois la pièce polie, il sera possible de procéder à des étapes de peinture. La peinture acrylique fonctionne sur la majorité des matériaux, mais aussi la peinture à l'huile, glycérol ou la laque. Une (ou plusieurs) couche d'apprêt sera probablement nécessaire.

E. Modèles existants

1. Les imprimantes 3D personnelles

Aussi appelées imprimantes 3D de bureau, elles sont principalement vendues toutes assemblées, prêtes à l'emploi et offrent un encombrement réduit. Elles sont destinées aux particuliers et aux PME et utilisent principalement la technologie FDM et de plus en plus les technologies SLA ou DLP avec des polymères liquides.

On peut aussi trouver des imprimantes 3D en kit à monter soi-même, qui nécessitent des compétences techniques, de la patience et de la débrouillardise, mais elles sont significativement moins chères que celles assemblées. Elles sont majoritairement basées sur la technologie par dépôt de filament.

On peut trouver ces imprimantes pour moins de 2 000 € et elles permettent d'imprimer des objets en résine principalement, de petite taille et où la vitesse d'impression n'a que peu d'importance. Ces imprimantes sont très prisées du grand public bricoleur, adepte du « do it yourself » qui trouvera de nombreux forum d'aide et d'entraide.

2. Les imprimantes 3D professionnelles

Les imprimantes 3D professionnelles s'adressent aux bureaux d'étude, aux entreprises de recherche et développement, aux architectes, aux laboratoires de prothèse ou encore aux prestataires de prototypage. Les écoles et les hôpitaux sont aussi des utilisateurs de ce type de machines. Ces imprimantes sont plus volumineuses, plus chères (5 000 à 15 000 €) mais aussi plus fiables. Elles ne nécessitent pas d'assemblage, sont livrées prêtes à l'emploi et disposent d'un service après vente professionnel. Elles utilisent toutes les technologies existantes, de nombreux matériaux et servent un objectif bien défini où précision et vitesse sont des paramètres primordiaux.

3. Les imprimantes 3D de production

Encore plus grosses et volumineuses, développées pour les industriels, ces imprimantes de production ont des performances élevées, un large éventail de matériaux, mais en contre partie demandent des investissements bien plus importants (plusieurs centaines de milliers d'euros).

F. Application à la chirurgie dentaire

La chirurgie et la prothèse dentaire sont des disciplines qui demandent beaucoup de précision. Depuis une vingtaine d'années, les imprimantes 3D font leur arrivée dans les laboratoires de prothèse pour aider les prothésistes à la réalisation de modèles, de couronnes, de bridges ou d'armatures. Utilisant au départ principalement la cire par des méthodes de filament fondu, elles permettent de gagner en précision et d'automatiser certaines phases du travail de laboratoire. La pièce est alors conçue sur un ordinateur et le fichier 3D imprimé. S'en suit l'étape classique de la mise en revêtement et de la coulée du métal par la méthode de la cire perdue.

Aujourd'hui, les technologies évoluant, les usages sont beaucoup plus variés. Il est ainsi possible de réaliser des modèles en résine pour les travaux prothétiques, des modèles pour les gouttières thermoplastiques, des guides chirurgicaux, des modèles pédagogiques ou orthodontistes, des armatures de couronnes, bridges ou prothèses amovibles, imprimer directement des gouttières et protège-dents, et même aujourd'hui imprimer des couronnes et bridges ou des prothèses amovibles complètes.

G. Cahier des charges d'une imprimante 3D au cabinet pour la réalisation de guides chirurgicaux

Après avoir identifié ses besoins, de nombreux critères sont à prendre en compte avant d'investir dans une imprimante 3D :

- la technologie utilisée : elle dépend directement de matériau et de la précision recherchés,
- la taille maximale d'impression,
- le coût de revient, l'installation et la mise en place.

Un guide chirurgical est un dispositif médical destiné à être utilisé en bouche, sur des muqueuses ou de l'os et en présence de sang. Il convient donc d'utiliser un matériau biocompatible. De plus, il demande de la rigidité et de la solidité. Les matériaux qui répondent à cette demande sont les résines, les métaux et les matières plastiques. En raison du coût élevé, l'impression de métal est à écarter.

Niveau précision, la technologie FDM permet d'imprimer des couches de 0,5 à 0,127 mm tandis que les technologies SLA ou DLP de 0,05 à 0,015 mm. Ces dernières sont donc bien très précises, et correspondent à nos besoins.

La technologie idéale pour une imprimante 3D de bureau utilisée pour l'impression de guides chirurgicaux semble être la stéréolithographie avec des résines biocompatibles (aujourd'hui, Formlabs et SprintRay proposent une résine biocompatible de classe I destinée à la pratique dentaire). Certaines entreprises dentaires se lancent elles aussi sur le marché de l'impression 3D. Ainsi, la marque allemande VOCO propose 3 imprimantes 3D de technologie DLP ainsi qu'une gamme variée de résines. Bien que plus rapides que la technologie SLA, ces imprimantes restent peu abordables (plus de 30 000 €) et sont plutôt destinées aux laboratoires de prothèse.



Figure 1.21 : l'imprimante SolFlex 650 de VOCO

Certains leaders de l'impression 3D se lancent aussi dans le domaine dentaire : en février 2018 à Chicago (16) lors du LMT LabDay (le plus grand événement écritain des prothésistes dentaires) 3D Systems, l'un des leaders mondiaux de l'impression 3D, expose sa gamme NextDent avec une imprimante 3D à technologie DLP la NexDent 5100 et pas moins de 16 résines à usage dentaire (Chacune avec un usage spécifique comme l'impression de modèle, de porte-empreinte ou encore de guides chirurgicaux. La résine NextDent SG biocompatible peut être stérilisée à l'autoclave avec un cycle de 15 minutes à 121 °C ou 3 minutes à 138 °C (17)).

La taille moyenne d'une arcade dentaire est de 58,5 mm sur 51,25 mm. La taille minimale du plateau d'impression devra donc être d'une dizaine de centimètres carrés pour l'impression d'un guide arcade complète. En fonction de son activité implantaire, il convient d'acquérir un plateau d'impression adapté. La position et l'orientation tridimensionnelle des pièces sur le plateau permettront d'optimiser le nombre d'impressions.

Enfin, la majorité des praticiens n'étant pas des experts en informatique et en impression 3D, une machine solide, fiable et avec un suivi de qualité semble être un critère important lors du choix d'une imprimante 3D.

III. Le guide chirurgical

Une position correcte de l'implant en trois dimensions a été soulignée comme un facteur essentiel pour un résultat esthétique optimal des reconstructions implanto-portées. (18). De plus, une étude récente sur l'évaluation des risques de péri-implantite a montré que près de la moitié des péri-implantites est causée par une mauvaise position de l'implant (19). Ces résultats démontrent que le succès esthétique et à long terme des implants dépend fortement du positionnement correct de celui-ci.

Les guides chirurgicaux ont donc vu le jour pour répondre aux différentes problématiques implantaire que sont :

- le positionnement de l'implant,
- l'esthétique de la restauration,
- la distribution des forces masticatoires,
- l'accès facilité à l'hygiène.

En effet, l'étape chirurgicale doit être en parfait accord avec le projet prothétique pour éviter des soucis pouvant aller de l'inconfort à l'échec de la chirurgie.

A. Principe : temps par temps de la planification implantaire

La planification implantaire est l'étape préalable à la chirurgie de pose d'implants. Elle comporte le choix du nombre, de la longueur, du diamètre et de la position des implants et leur orientation.

Elle découle de l'analyse de l'ensemble des informations collectées par le chirurgien-dentiste lors de l'examen clinique général et local du patient, des examens complémentaires radiographiques 2D (panoramique) et 3D (cone-beam, scanner) et de la réalisation du projet prothétique (smile design, wax up physique ou virtuel).

L'implantologie moderne repose sur le principe que le positionnement de l'implant doit être dicté par le projet prothétique, alors qu'il était guidé seulement par l'os dans les années 80. Aujourd'hui, les règles de positionnement des implants se basent sur les impératifs biologiques et aussi biomécaniques nécessaires à un succès implantaire sur le long terme. Ainsi, une meilleure distribution des forces masticatoires (de l'ordre de 10 à 35Kg/cm²), une meilleure esthétique et un meilleur contrôle de l'hygiène sont assurés.

Bränemark et son équipe introduisent en 1971 l'implant à vis tel que nous le connaissons (20). Par la suite, beaucoup d'autres formes ont vu le jour, avec pour objectif de simplifier ou de répondre de manière optimale à des situations spécifiques. Aujourd'hui, il existe une multitude de fabricants d'implants et par conséquent une multitude d'implant différents, que ce soit en longueur, diamètre, forme, connectique, matériau ou traitement de surface. Dans ce travail, seuls les généralités de la planification implantaire seront abordées non pas le choix du système implantaire et du type d'implant.

La position de l'implant dans un espace défini par la longueur de la crête édentée mésio-distale, le diamètre vestibulo-lingual, la hauteur inter-arcade ainsi que le volume osseux reste le principal facteur du maintien des tissus environnants pour aboutir à un résultat acceptable.

1. Modèle d'étude

La coulée de modèle d'étude permet d'évaluer la situation et l'état de la cavité buccale du patient et de planifier les traitements. Une fois montée en articulateur suite à un enregistrement précis de l'occlusion et du rapport inter mandibulo-maxillaire, ces modèles permettent d'évaluer les rapports horizontaux et verticaux des deux arcades, le contexte occlusal et aident à déterminer le projet prothétique et par conséquent implantaire. Ces modèles en plâtre pourront être sectionnés afin d'avoir une idée de l'axe et du diamètre de l'implant. Mais cette approche paraît très délicate et peu précise.



Figure 2.1 : modèle sectionné

2. Imagerie

Les examens radiologiques constituent les examens complémentaires incontournables du bilan pré-implantaire (21).

Ils sont utiles tout au long du traitement que ce soit la radiographie rétro-alvéolaire, la radiographie panoramique, la tomographie volumique à faisceau conique ou le scanner. La décision thérapeutique est donc fortement conditionnée par l'analyse de ces données.

i. La radiographie rétro-alvéolaire ou péri-apicale

Un cliché rétro-alvéolaire est une projection radiologique sur un film ou un capteur numérique intra-oral de taille réduite permettant une étude détaillée d'une dent et de son environnement parodontal. Il permet d'avoir une image sur laquelle jusqu'à 4 dents sont visibles et donne des informations en deux dimensions sur le volume et la qualité de l'os et les structures anatomiques remarquables. Cet examen n'est pas suffisant pour aborder une chirurgie.

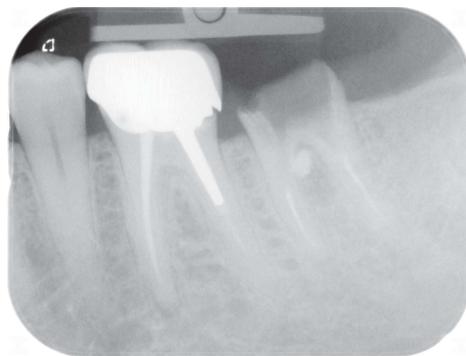


Figure 2.2 : une radiographie rétro-alvéolaire

ii. La radiographie panoramique ou orthopantomogramme

Cette technique radiologique est une tomographie, donc un plan de coupe, tissus et structures situés en dehors de ce plan ne sont pas observables car ils apparaissent flous. La production de chaque coupe topographique nécessite un mouvement précis et contrôlé du tube radiogène et du film. Les progrès techniques ont rendu possible la modification de la forme de la coupe tomographique, en passant d'une coupe linéaire à une courbe et au final à une morphologie se rapprochant quasiment de celle d'une arcade dentaire (morphologie en fer-à-cheval).

Une radiographie panoramique permet donc de visualiser sur un même plan de coupe toutes les dents et leurs tissus de soutien, ainsi qu'une vision globale des maxillaires et de la mandibule. Mais l'image obtenue reste en deux dimensions et ne donne pas une information précise concernant l'épaisseur de l'os alvéolaire et ne permet pas d'apprécier la qualité de l'os spongieux.



Figure 2.3 : un orthopantomogramme

iii. L'imagerie 3D

Remplaçant le scanner traditionnel qui effectue plusieurs coupes linéaires se superposant lors de multiples rotations du système, c'est la tomographie volumique par faisceau conique (TVFC) ou cone beam computed tomography (CBCT) en anglais, qui est surtout employé.

Ici, le faisceau de rayons X est à angle ouvert, de géométrie conique, afin de réaliser une image de projection. La source de rayons X n'effectue qu'une seule rotation autour du volume étudié. Le faisceau est pulsé et non continu, comme la plupart des scanners. Ces caractéristiques propres lui permettent de diminuer la vitesse d'acquisition et les irradiations, comparativement au scanner (diminution d'un facteur 12 pour les irradiations). Le CBCT permet d'obtenir un nombre arrêté de projections coniques grâce au capteur numérique. Ces projections sont donc obtenues sous différents angles de vue autour du volume étudié. Après rotation, les images numérisées obtenues, initialement réparties selon la trajectoire circulaire de l'appareil, sont traitées par des algorithmes qui permettent la reconstruction primaire du volume selon les voxels. Ces derniers ont la particularité

d'être isotropiques (même taille d'arête quelle que soit la direction) donc cubiques, contrairement au scanner (voxels anisotropiques et donc des parallélépipèdes). Cette caractéristique du CBCT diminue les déformations au moment de la reconstruction, par rapport au scanner.

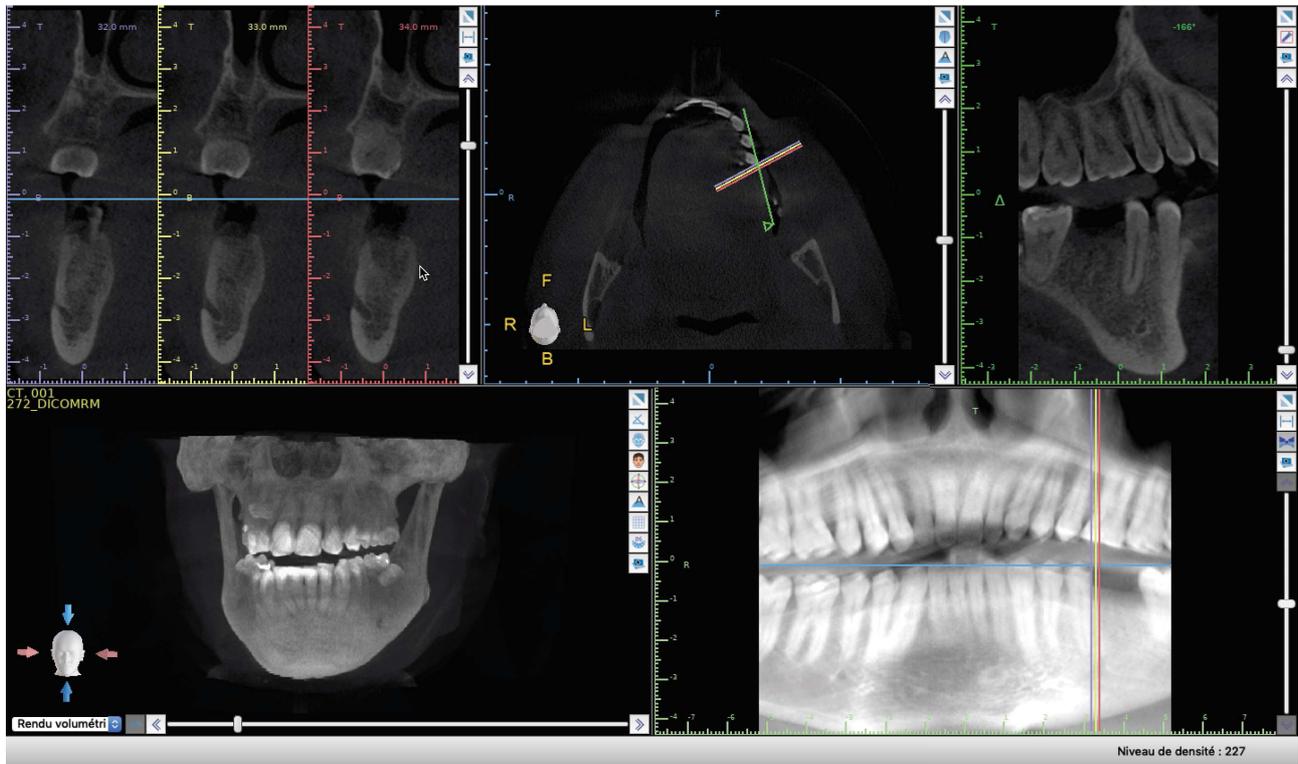


Figure 2.4 : exemple d'examen Cone Beam (Bluesky Plan)

Ces différents examens permettent donc de visualiser le volume osseux et sa qualité (cortical et spongieux), mais aussi la position et les dimensions des structures anatomiques normales. Certains de ces structures sont à risque et sont à considérer, comme les canaux mandibulaires (où cheminent les deux nerfs alvéolaires inférieurs), les foramina mentonniers (qui correspondent à la résurgence des nerfs mentonniers), le foramen et le canal incisifs (ou nano-palatins où cheminement l'artère palatine descendante et le nerf naso-palatin) et le plancher des fosses nasales. La forme et la dimension du sinus maxillaire sont aussi appréciables sur ces clichés et ils permettent de repérer une éventuelle affection sous-jacente ou la présence de débris radiculaires ou de dents incluses.

3. Choix de la longueur de l'implant

On va choisir la longueur de l'implant principalement en fonction de la quantité d'os disponible (22). En effet, en se basant sur la position coronno-apicale idéale du col de l'implant (en fonction du type d'implant, bone level, tissue level...) une mesure de la distance qui sépare ce col des structures nobles et du rebord osseux sera réalisée sur l'image radiologique. Une distance minimale de 2 mm entre ces structures et l'implant est à conserver.

4. Choix du diamètre de l'implant

Le choix du diamètre de l'implant va être conditionné par les structures voisines (dent, implant) et la distance vestiulo-linguale d'os crestal (22).

Dans le sens mésio-distal : 1 mm d'os mésial et distal minimum doit séparer un implant des dents voisines. A cette distance, il faut rajouter, en présence d'une dent, l'épaisseur du ligament parodontal dont l'épaisseur est de 0,25 mm. La distance retenue comme minimale est de 1,5 mm entre un implant et une dent.

Pour protéger les structures voisines et en utilisant un implant standard de 4 mm de diamètre, 7 mm d'espace dans le sens mésio-distal sont nécessaires. Entre 2 implants, 3mm d'os crestal sont nécessaires. Cette distance minimale permettra aussi un retour de la papille inter dentaire. (23) Dans le sens vestibulo-lingual : 1 mm d'os spongieux de chaque côté de l'implant est nécessaire pour assurer la stabilité de l'implant.

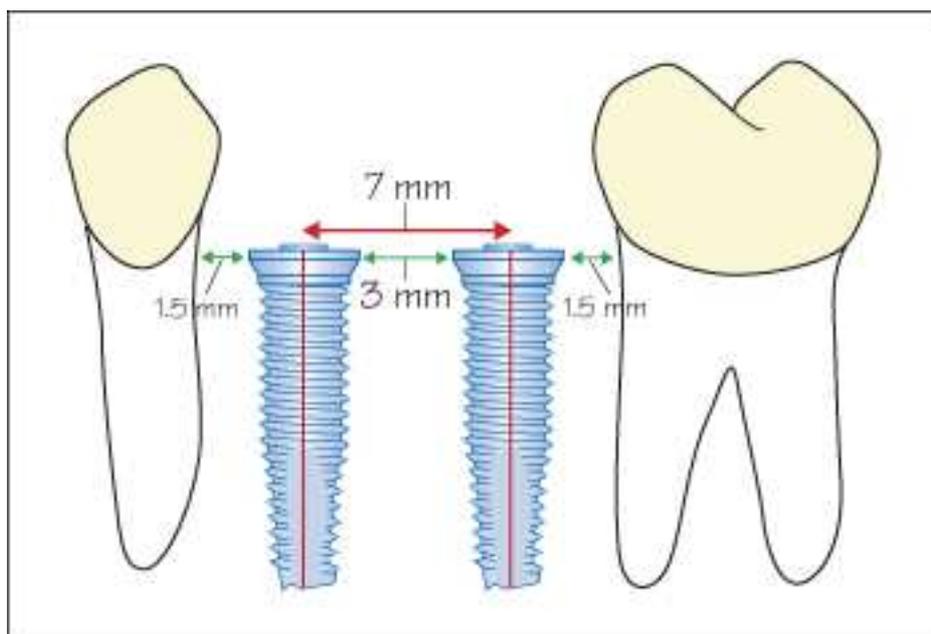


Figure 2.5 : distances à respecter lors d'une pose d'implant

5. Choix de l'axe de l'implant

L'axe de l'implant doit être choisi de manière à avoir un appui cortical sur toute la surface de l'implant. Par ailleurs, certaines caractéristiques anatomiques rendent parfois difficile le choix de cet axe (sinus maxillaire, foramen mentonnier...).

Dans les cas d'un édentement unitaire, l'axe dépendra en grande partie de la région concernée. En effet, dans le secteur esthétique, peu de contraintes masticatoires sont en présence et c'est la couronne qui dictera majoritairement l'axe de l'implant.

Dans les secteurs postérieurs, l'axe de l'implant devra être compatible avec l'axe des forces masticatoires afin d'exclure tout porte-à-faux.

Aujourd'hui, il est possible de poser un implant avec une certaine angulation qui sera rattrapée avec un pilier qui sera lui aussi angulé ou avec un puits de vissage angulé sur la restauration pour permettre une intégration optimale de la future prothèse. Les fabricants d'implants proposent une gamme de piliers angulés (par exemple 15° ou 20° pour la gamme d'implants Synocta RN de chez Straumann ou pour la gamme Aestetica+ de chez ETK) mais il existe également des piliers personnalisés qui seront usinés sur-mesure.



Figure 2.6 : pilier angulé (20°) et pilier droit de chez ETK

Pour conclure, une étude par la méthode des éléments finis parue en 2008 montre qu'un implant doit être posé dans l'axe des forces que subira la future prothèse afin d'obtenir une meilleure répartition des forces, mais aussi qu'une importance toute particulière doit être accordée à l'occlusion afin de diminuer les forces latérales sur l'implant. C'est bel et bien la prothèse qui va dicter la planification. (24).

6. Le type de chirurgie

La chirurgie implantaire à lambeaux est la méthode la plus employée aujourd'hui en implantologie. Elle consiste à inciser le sommet de la crête alvéolaire puis à récliner un lambeau muco-périosté pour exposer l'os sous-jacent.

Mais les progrès en implantologie incitent à s'orienter vers des actes de moins en moins invasifs, comme par exemple les chirurgie flapless (sans lambeaux), dans lesquelles une rondelle de tissus gingivaux de la taille du diamètre de l'implant est éliminée. Pour y parvenir, on effectue soit une mini incision crestale (de l'ordre de la taille de l'implant), soit un poinçonnage à l'aide d'un bistouri rond. L'ostéotomie implantaire est alors réalisée au centre de l'os exposé.

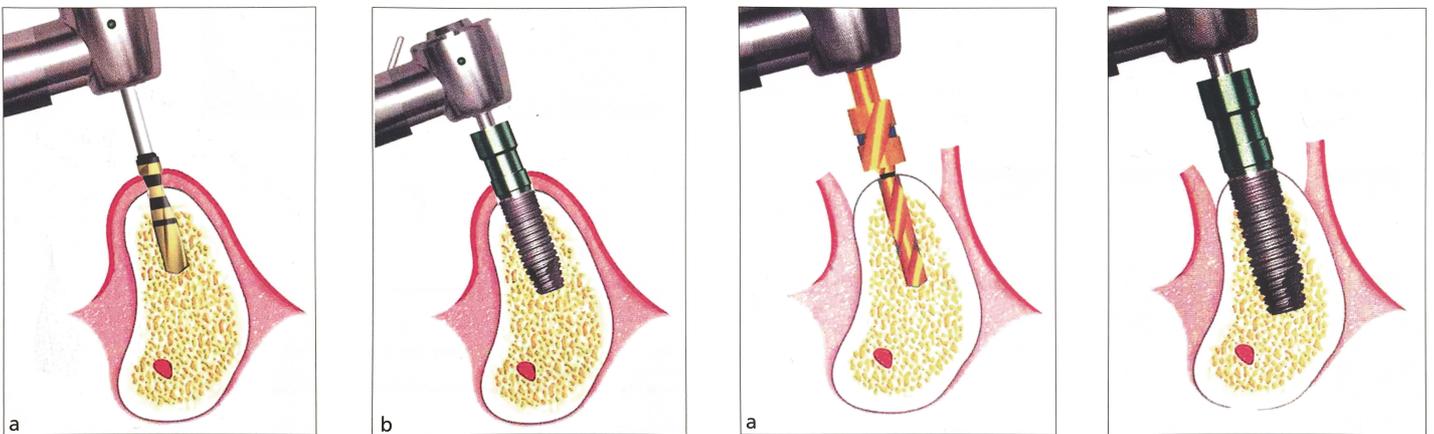


Figure 2.7 : schéma d'une chirurgie flapless et d'une chirurgie avec un lambeau

Byung-Ho Choi décrit ainsi les avantages et les inconvénients de ces deux types de chirurgies :

Avantages du flapless :

- la protection des tissus mous (pas de traumatisme chirurgical lors du lambeau, pas de risque de réouverture de l'incision),
- la protection des vaisseaux sanguins de la muqueuse péri-implantaire (300 à 500 μm de tissu conjonctif supra-supra-cristal est dépourvu de vaisseaux sanguins après une chirurgie à lambeaux (25;26;27),
- la protection de la santé de la muqueuse péri-implantaire (profondeur des sulcus péri-implantaire est moindre et permet donc une hygiène plus efficace) (28),
- la protection du périoste (le périoste n'est pas décollé et donc pas lésé),

- la protection de l'os péri-implantaire (résorption crestale au cours de la phase post chirurgicale précoce est plus importante après réclinaison d'un lambeau) (29),
- le maintien de la forme originale de la muqueuse (30).

Inconvénients du flapless :

- évaluation du volume osseux pendant l'ostéotomie et l'implantation (impossibilité de visualiser et d'évaluer le volume osseux pendant l'ostéotomie et l'implantation),
- évaluation de la direction du forage implantaire (forage à l'aveugle qui augmente le risque de perforation de l'os cortical),
- évaluation de la profondeur de forage (difficulté d'évaluer le sommet de la crête et donc la profondeur d'enfoncement des forets),
- évaluation de la situation du col de l'implant dans la crête alvéolaire (pas d'accès visuel à la crête),
- impossibilité de conserver la muqueuse kératinisée (l'utilisation de poinçon peut éliminer une grande quantité de gencive kératinisée, la mini-incision sera privilégiée dans les cas où peu de gencive kératinisée est disponible) (31),
- contamination de l'implant par un contact avec les tissus mous.

En 2012, une revue systématique Cochrane portant sur les techniques les plus efficaces pour la gestion des tissus mous en implantologie (32) compare entre autres les chirurgies avec lambeaux aux chirurgies sans lambeaux. Quelques faibles preuves démontrent qu'une chirurgie flapless entraîne moins de douleur post-opératoire, moins d'œdème et une utilisation plus faible d'anesthésique. Mais il n'y a pas de preuve qu'une différence entre ces deux types de chirurgie existe en matière de complications ou d'échec. Par contre, les patients ayant été implantés avec les deux procédures ont tendance à préférer la chirurgie sans lambeau.

Le principal inconvénient de la chirurgie flapless réside dans l'absence de visibilité du site à implanter et dans les conséquences que cela peut entraîner. L'utilisation d'un guide chirurgical va permettre au chirurgien-dentiste d'appréhender en amont de la chirurgie ces soucis et diminuer ainsi grandement les inconvénients de ce type de chirurgie. Le type de chirurgie influence donc la conception du guide en déterminant le moyen d'appui de ce dernier.

B. Les différents types de guides chirurgicaux

Dès le début de l'implantologie, il fallait prévoir les dimensions des implants à mettre en place. Les fabricants d'implants fournissent alors un calque avec les gabarits des différents implants existants, et ce, à différents grossissements (à corrélérer avec les grossissements des examens radiographiques) afin de poser ce calque sur les radiographies et d'estimer alors la position du futur implant. Ces premiers guides chirurgicaux ne donnaient qu'une information peu précise et en deux dimensions.

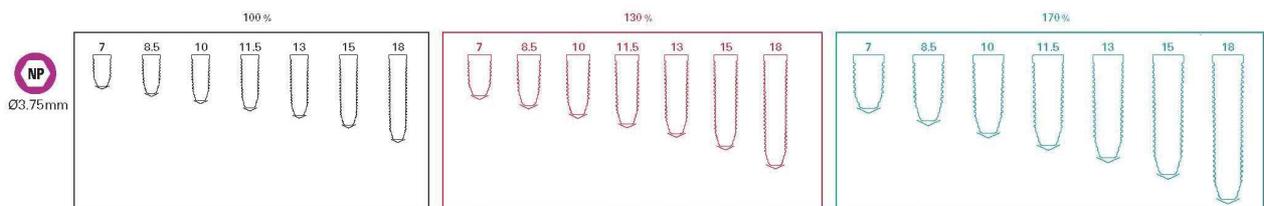


Figure 2.8 : gabarits radiographiques transparents pour implant NobelParallel (100 %, 130 % et 170 %)

Un guide chirurgical est défini aujourd'hui comme un dispositif médical qui va prendre appui sur une ou des structures de la cavité buccale, souvent en résine, et qui permettra de guider les différents forets et le porte implant.

Il existe deux classifications des guides chirurgicaux : en fonction de la surface d'appui, c'est-à-dire si le guide repose sur des dents (appui dentaire), sur la muqueuse (appui muqueux ou flapless) ou sur l'os (appui osseux) ; ou en fonction du système de guidage des forets implantaires, en passant uniquement par un foret pilote, en utilisant un système de manchon dans manchon ou à l'aide de troussees chirurgicales spécifiques.

1. Classement des guides chirurgicaux en fonction de la surface d'appui



Figure 2.9 : guides à appui osseux - muqueux - dentaire

i. Guide chirurgical à appui dentaire

Ce type de guide chirurgical prendra appui sur les dents restantes sur l'arcade, si possible bordant l'édentement. Il est principalement indiqué dans le cas d'édentement encastré, postérieur ou antérieur, unitaire ou plural. Dans des cas d'édentements postérieurs libres, ils peuvent aussi être utilisés, mais la zone édentée doit être réduite pour assurer une stabilité suffisante. En effet, si le guide a un appui mixte (dentaire et muqueux), il faut veiller à avoir une zone muqueuse la plus courte possible en raison de sa dépressibilité qui pourrait entraîner une bascule postérieure du guide. Il permet de réaliser des chirurgies avec ou sans lambeaux d'accès.

C'est le guide le plus simple à réaliser et à utiliser, ainsi que le plus précis car le moins mobile. Les dents restantes étant considérées comme non-mobiles, le guide est très stable une fois en place mais devra quand même être maintenu en place au contact des dents durant tout le temps chirurgical. Une instabilité en cas d'appui trop important sur le guide peut s'observer, due à la laxité du ligament alvéolo-dentaire. Dans le cas d'édentement postérieur libre, il faudra exercer un appui sur le guide au niveau des dents et pas au niveau de la muqueuse qui est dépressible.

ii. Guide chirurgical à appui muqueux

À l'inverse ce type de guide prendra appui sur la muqueuse buccale et aura donc comme indication les édentements complets ou postérieurs libres. Pour stabiliser ce type de guide, des vis de transfixations osseuses sont utilisées. De part la dépressibilité de la muqueuse, ce type de guide est moins précis que lorsque l'appui est dentaire ou osseux. Ce type de guide par définition ne permet de réaliser que des chirurgies flapless lors desquelles la gencive sera incisée ou ponctionnée pour permettre un accès à l'os crestal.

iii. Guide chirurgical à appui osseux

Par opposition, les guides à appui osseux nécessitent des lambeaux d'accès mucco-périostés de grande étendue afin de pouvoir prendre appui directement sur le maxillaire ou la mandibule. Ils sont indiqués pour les poses d'implants multiples (« All on four », « All on six »), de bridges complets sur implants, lorsqu'il y a besoin d'une greffe osseuse ou de ROG (régénération osseuse guidée) ou tout simplement, lorsque la visualisation de la crête osseuse est nécessaire (défauts osseux ou qu'elle est fine ou en lame de couteau).

	Guide a appui dentaire	Guide a appui muqueux	Guide à appui osseux
Indication	Édentement partiel	Édentement total	Édenteemnt total
Type de chirurgie	Avec ou sans lambeau	Flapless	Lambeau
Difficulté	-	+	++
Stabilité	++	-	+
Spécificité		Doit être stabilisé par des clavettes	Lambeau de grande étendue

Figure 2.10 : comparaison par type d'appui des différents types de guides

2. Classement des guides chirurgicaux en fonction du système de guidage

i. Les guides à manchon pilote

Ce sont des guides en résine dans lesquels une douille métallique (souvent en titane) standardisée est insérée, servant au guidage d'un seul foret, généralement le foret initial ou pilote (diamètre de 2 mm ou 2,3 mm chez la majorité des fabricants). Une fois le forage pilote réalisé, le guide sera retiré et la suite de la séquence instrumentale sera passée à main levée.

L'avantage de ce type de guide est qu'il est simple à réaliser et ne nécessite pas l'achat de matériel spécifique (cuillère, clé ou trousse de chirurgie guidée), juste une douille métallique adaptée au foret pilote du modèle d'implant utilisé. Ce type de guide permet de reproduire fidèlement les données de la planification implantaire en accord avec le projet prothétique uniquement pour le premier forage et n'élimine pas le risque de déviation lors du passage du reste de la séquence instrumentale.



Figure 2.11 : douille simple en titane

ii. Les guides manchon dans manchon

Les guides “manchon dans manchon” sont livrés avec une douille métallique large, solidarisée au guide pour chaque implant, ainsi que d'autres douilles métalliques de diamètres internes croissants, correspondant aux différents diamètres des forets de la séquence de forage. Ils permettent de guider plusieurs forets de diamètres différents, en insérant au fur et à mesure les douilles de diamètres différents sans avoir recours aux clés de guidage et forets spécifiques et donc à une trousse spécifique de chirurgie guidée. L'avantage principal de ce type de guides, est qu'il permet d'utiliser n'importe quel système d'implant avec sa trousse classique, mais aussi de gagner en précision par rapport au guide à manchon pilote en guidant plusieurs diamètres de forets.



Figure 2.12 : système de manchon dans manchon (Bredent)

iii. Les guides à trousse spécifique

Ces guides sont livrés avec des douilles métalliques propres au système implantaire qui les a développées et qui est doté d'une trousse de chirurgie guidée. Ce type de guide permet le guidage des différents forets de la séquence de forage, jusqu'à la pose de l'implant, lui-même dirigé à travers le guide. Le gain de précision est inégalable et le transfert du positionnement choisi en étape de planification est de l'ordre du micron. Selon les fabricants, il existe dans les trousse de chirurgie guidée des cuillères ou des clés correspondant au diamètre des différents forets qui viendront s'insérer directement sur le guide.



Figure 2.13 : guide pour foret de Nobel Biocare

C. Conception

1. Méthode conventionnelle

Cette méthode repose sur l'utilisation d'un guide radiologique qui permet d'établir des repères transposables entre la réalité et la radiographie en passant par une étude prothétique.

Après un wax-up ou un montage avec des dents du commerce, le projet prothétique est transposé sur articulateur. Un duplicata du projet est réalisé en résine et des éléments radio-opaques sont positionnés au niveau des futurs sites implantaire. Les éléments radio-opaques ne doivent pas entraîner d'artefact et sont par exemple de la gutta-percha, du sulfate de baryum ou des tiges en titane. C'est cette plaque en résine qui est portée par le patient lors de l'examen radiologique afin de permettre la prévisualisation des sites envisagés.

Il est alors possible d'apprécier sur ces examens la position du projet prothétique par rapport aux structures anatomiques et ainsi déterminer la position de l'implant.

Par la suite, il sera possible de transformer ou dupliquer ce guide radiologique en guide chirurgical en insérant des tubes métalliques de guidage calibrés.

2. Numérique

Aujourd'hui grâce au progrès de l'informatique, le guide radiologique devient optionnel (sauf dans le cas d'arcade édentée totalement) et la réalisation du projet prothétique, implantaire et du guide aura lieu uniquement sur un ordinateur.

En effet, grâce à certains logiciels, la pose d'implant sera réalisée virtuellement en se basant sur un projet prothétique numérique et permettra de concevoir le futur guide qui sera par la suite imprimé.

Toute la planification se réalisera sur un patient numérique dont il va falloir acquérir les différentes données (tissus durs, tissus mous et vaisseaux) et les superposer.

i. La numérisation de l'anatomie osseuse

L'imagerie à rayon X en particulier le CBCT sera l'examen de choix pour acquérir les volumes osseux de notre patient. Cet examen ne devra pas être réalisé en occlusion afin d'éviter des artéfacts et de pouvoir individualiser les 2 mâchoires plus facilement. Au terme de cette acquisition, le logiciel sort des reconstructions 2D selon les coupes verticales, transversales et sagittales. Le format de volume exportable est le DICOM (pour Digital Imaging COmmunication in Medicine), qui contient des images reconstruites dans le plan axial. DICOM est une norme ouverte et répandue pour la communication d'images médicales. L'avantage des voxels isotropiques est également d'obtenir une reconstruction dans un autre axe que celui de l'acquisition.

Le CBCT est par ailleurs de plus en plus présent dans les cabinets dentaires où il a un rôle en implantologie bien sûr, mais aussi en endodontie, en parodontologie, en orthopédie dento-faciale ou encore en diagnostic de lésion.

ii. La numérisation des dents et des tissus mous

Les tissus mous présents dans la cavité buccale sont peu radio-opaques et ne ressortent pas précisément sur un examen CBCT, il va donc falloir trouver un autre moyen d'acquérir ces données.

La méthode la plus traditionnelle consiste à réaliser une empreinte physique de l'arcade à l'aide d'un matériau à empreinte (généralement alginate ou silicone), de couler l'empreinte avec du plâtre. Ce modèle sera par la suite numérisé avec un scanner de laboratoire.

On peut aussi se passer de la coulée du modèle en plâtre et scanner directement dans le scanner de laboratoire l'empreinte en silicone ou en alginate et par une simple manipulation informatique obtenir le négatif de l'empreinte.

Une autre technique qui a fait ses preuves est l'utilisation d'un scanner CBCT dans lequel l'empreinte physico-chimique ou le modèle en plâtre sera placé. Le fichier DICOM obtenu sera alors converti en STL.

Si le cabinet est équipé d'un système d'empreinte optique, l'empreinte numérique de la cavité buccale sera réalisée directement.

Les dents, elles, sont radio-opaques et ressortent précocement sur un examen CBCT. La double acquisition de ces éléments va permettre d'obtenir des points de repères afin de superposer les deux fichiers. Cette méthode s'appelle la « smart fusion ».

De plus en plus de fabricants de scanners ou de systèmes d'empreinte optique permettent aujourd'hui d'exporter directement les images sous format .STL, format ouvert qui facilite les échanges (intercompatibilité) et les travaux ultérieurs.

Pour une arcade édentée, la méthode du double scannage est nécessaire (33). Le projet prothétique va être réalisé physiquement à partir d'une empreinte du patient. Une fois le projet validé sur articulateur, une clé de positionnement occlusale est réalisée en silicone. Ce projet est alors dupliqué en guide radiologique en résine sur lequel se placeront 6 à 8 repères radio-opaques (en gutta-percha ou en billes de sulfate de baryum). La position de ces marqueurs devra être à la fois vestibulaire et palatine/linguale et sur différents plans afin de faciliter le futur alignement.

Un premier examen radiologique (CBCT) est alors réalisé lors duquel le patient porte le guide radiologique et la clé en silicone, maxillaire et mandibule ne devant pas être en occlusion. Un second examen CBCT est par la suite réalisé du guide radiologique seul. Les repères radio-opaques permettent de superposer les deux images et de visualiser le projet prothétique et la muqueuse. Cette méthode peut aussi être utilisée avec une arcade dentée, mais elle est plus coûteuse (fabrication du guide radio) et nécessite deux examens radiologiques, c'est pourquoi la méthode smart fusion sera préférée dès la présence de dents.



Figure 2.14 : fichier STL d'un projet prothétique virtuel (Exocad)

iii. La superposition des différents fichiers

Une fois nos deux fichiers en notre possession, il va falloir les aligner (34). Avec la méthode du double scan, la position des repères radio-opaques sera indiquée dans les 2 fichiers et permettra de superposer précisément les deux fichiers. Avec la méthode smart fusion, les éléments repérables sur le fichier DICOM et le fichier STL, à savoir les dents, seront utilisés. La majorité des logiciels proposent aujourd'hui un système de matching automatique, mais en cas d'échec ou d'imprécision, un matching manuel sera réalisé. Ces points remarquables seront identifiés et marqués sur les deux fichiers (pointe cuspidienne, angle incisal) afin de procéder à l'alignement. Plus le nombre de points indiqué sera grand, plus l'alignement sera précis, mais plus le temps de calcul sera long.

iv. L'intégration du projet prothétique

La planification implantaire devant être dictée par la future prothèse, il faut intégrer le projet prothétique à notre logiciel. Si la méthode du double scan est utilisée, l'étape du projet prothétique se fait avant la numérisation des données. Les méthodes à suivre en cas d'acquisition smart fusion sont :

- une méthode physique : le prothésiste réalise un wax-up sur un modèle physique qui sera scanné par un scanner de laboratoire afin d'obtenir un fichier STL du projet prothétique. Ce fichier sera alors importé dans le logiciel comme une nouvelle surface qu'il faudra là aussi matcher avec les surfaces et volumes existants (avec la même méthode de smart fusion en sélectionnant des point remarquables ou à l'aide d'un matching automatique),
- une méthode virtuelle : les logiciels disposent aujourd'hui de bibliothèques de couronnes et de dents afin de pouvoir intégrer ces surfaces dans le projet. De nombreuses tailles et morphologies sont disponibles en tant que couronne ou qu'élément intermédiaire de bridge.

v. La planification implantaire

En fonction du niveau et du volume osseux, mais aussi en fonction de sa qualité et en accord avec les recommandations énoncées plus haut, l'implant le plus adapté au projet prothétique va être intégré virtuellement à notre planification. En fonction des

logiciels, une attention toute particulière sera à apporter au diamètre du futur tube de guidage qui se fera concomitamment au choix du diamètre de l'implant. C'est ce tube de guidage qui recevra la future douille métallique permettant de guider les forets.

vi. La conception du guide

Le design du guide va directement découler du type d'appui. Il doit être intimement en contact avec les dents restantes ou la muqueuse afin de coller au mieux à notre planification, ne pas présenter de contre-dépouille au niveau des dents (une légère contre-dépouille au niveau de la muqueuse peut permettre une meilleure stabilisation, comme en prothèse amovible) et être rigide. Pour ce faire, une épaisseur minimum de 3 mm est nécessaire. Un guide plus grand est plus stable, mais plus l'impression est grande, plus le risque d'erreur augmente. Un juste-milieu doit être trouvé, et ces sources d'erreur sont décrites plus loin dans cette thèse.

Il est intéressant de créer une fenêtre au niveau d'un secteur denté pour s'assurer du bon enfoncement du guide.

Les logiciels proposent de tracer le contour du futur guide, puis de modifier ce tracé jusqu'à entière satisfaction, le remplissage du guide est par la suite automatique.

vii. L'impression et le post-traitement du guide

Ces paramètres dépendent uniquement du modèle d'imprimante et du matériau choisi. Avec certaines résines stérilisables, il est important de noter que l'insertion de la gaine métallique doit se faire avant la stérilisation. Par ailleurs, pour les résines non stérilisables, il est admis comme pratique de faire tremper le guide dans une solution antiseptique (type Bétadine) plusieurs heures durant.

D. Critères de précision et sources d'erreurs

1. Sources d'erreurs en imagerie

Les études comparatives de Liang de 2010 (35) et de Davapranah (36) estiment que quelle que soit la technique d'acquisition, la précision de la mesure est de l'ordre du quart de millimètre. Par ailleurs, des artefacts peuvent survenir et altérer la qualité du cliché. Ces artefacts sont majoritairement métalliques dus aux interactions entre les rayons X et les différentes structures métalliques qui peuvent se retrouver en bouche (couronne, amalgames...) et cinétiques dus aux mouvements du patient durant l'acquisition (37). Ces différents facteurs sont à considérer lors de la planification et une marge de sécurité suffisante doit être prise en compte.

2. Précision en implantologie

La notion de précision en implantologie est obtenue par superposition de deux fichiers 3D (généralement des CBCT) reprenant l'un le projet implantaire et le second un cliché post-opératoire. 7 mesures peuvent être extraites de ce comparatif :

- la déviation angulaire (en degré),
- la déviation verticale à l'entrée (en millimètre),
- la déviation horizontale à l'entrée (en millimètre),
- la déviation globale à l'entrée (en millimètre),
- la déviation verticale à l'apex (en millimètre),
- la déviation horizontale à l'apex (en millimètre),
- la déviation globale à l'apex (en millimètre).

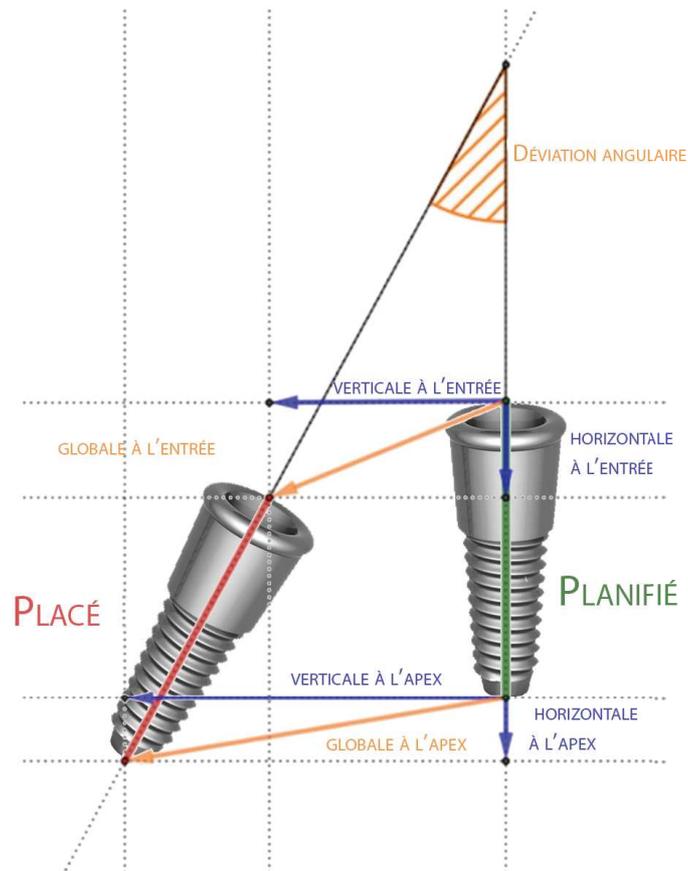


Figure 2.15 : les différentes déviations mesurées (réalisation personnelle)

Dans la majorité des études, ces mesures sont résumées en déviation à l'entrée, déviation à l'apex de l'implant, déviation d'axe et déviation de profondeur. Ce sont ces mesures qui se retrouvent dans les études qui suivent.

3. En fonction de l'appui

C'est dans cette catégorie que le plus d'études existent. La plus ancienne, de Ozan et al., date de 2009 (38). Elle montre que la précision de la chirurgie est la plus haute lorsque le guide a un appui dentaire, moins haute lorsque l'appui est osseux et la plus faible lorsque l'appui est muqueux. Des études plus récentes comme celles de Van Assche et al. en 2012 (39), Tahmaseb et al. en 2014 (40) et Raico Gallardo et al. (2017) (41) montrent des résultats différents : les appuis muqueux et dentaires sont comparables en terme de précision et supérieurs à l'appui osseux. Ils rajoutent aussi que les guides à appui dentaire doivent prendre appui sur un minimum de deux dents (42).

4. En fonction du système de stabilisation

Comme vu précédemment, la stabilité des guides peut être augmentée en utilisant des pins ou des clavettes de fixation. Van Assche et al. (43) et Cassetta et al. (44) indiquent que la précision augmente lors de l'utilisation de clavettes avec des guides à appui muqueux. En effet, elles permettent de compenser la dépressibilité de la muqueuse.

5. En fonction du type de chirurgie

Quatre méthodes différentes vont être comparées :

- full guided : tous les forets vont passer dans le guide, ainsi que le porte-implant,
- half guided : tous les forets vont passer dans le guide, mais la pose de l'implant va se faire à main levée,
- pilot-drill guided : seul le foret pilote va passer dans le guide,
- main levée : technique conventionnelle sans l'utilisation de guide.

Déjà en 2010, Arisan et al. (42) et Van Assche et al. (43) montrent un gain de précision entre une chirurgie à main levée et une chirurgie full guided. Depuis de nombreuses études ont été publiées sur le sujet, et toutes montrent un gain de précision en faveur de la chirurgie guidée.

En 2012, Van Assche (39) met en garde sur la chirurgie pilot-drill guided : en effet, peu d'études sont concluantes sur l'apport de cette technique et c'est la méthode que propose la majorité des grandes compagnies d'implant. C'est en 2014 que Vercruyssen et al. (45) montrent l'intérêt du forage pilote guidée dans leur étude.

AD, déviation angulaire (en degré) ; CVD, déviation verticale à l'entrée (en mm) ; CLD, déviation latérale à l'entrée (en mm) ; CGD, déviation globale à l'entrée (en mm) ; AVD, déviation verticale à l'apex (en mm) ; ALD, déviation latérale à l'apex (en mm) ; AGD, déviation globale à l'apex (en mm) ; SE, erreur standard

	Free-handed		Pilot-drill guided		Fully guided	
	Mean	SE	Mean	SE	Mean	SE
AD	6.99	0.87	5.95	0.87	2.30	0.92
CVD	0.53	0.09	0.68	0.09	0.43	0.09
CLD	1.27	0.11	0.79	0.11	0.55	0.11
CGD	1.45	0.10	1.12	0.10	0.73	0.10
AVD	0.50	0.09	0.68	0.09	0.43	0.09
ALD	1.97	0.19	1.14	0.20	0.81	0.21
AGD	2.11	0.18	1.43	0.18	0.97	0.19

Figure 2.16 : statistiques descriptives des résultats de Younes et al.

En 2018, la méta-analyse de Thamaseb et al. (46) conclut que la précision des chirurgies guidées, quelque soit le protocole utilisé, est acceptable cliniquement. La même année, Younes et al. (47) publient la conclusion suivante : quand la perfection de la position de l'implant est requise, la chirurgie full-guided devrait être le gold-standard. En effet, ils présentent les résultats suivant :

- la chirurgie full-guided est la méthode la plus précise (déviation apicale moyenne : 0,97mm, déviation apicale maximum : 1,98 mm)
- la chirurgie pilot-drill guided est moins précise (déviation apicale moyenne : 1,43 mm, déviation apicale maximum : 12,72 mm)
- la chirurgie à main levée possède les plus grandes déviation entre la position planifiée et la position réalisée de l'implant (déviation apicale moyenne : 2,11 mm, déviation apicale maximum : 4,84 mm)

6. En fonction de la localisation de l'implant

Van Assche et al. en 2012 (39) montrent que la position du futur implant a une influence sur la précision : plus l'implant est postérieur, plus elle diminue. Cette différence peut être expliquée par le fait que plus la chirurgie sera distale, plus l'accès sera compliqué.

7. En fonction de l'expérience du praticien

Cushen et al. (48) démontrent que l'expérience du praticien joue aussi sur la précision dans la pose d'un implant.

8. Autres avantages et limites de la chirurgie guidée

En plus des avantages liés à la précision de la pose d'implant, la littérature montre d'autres avantages liés à l'utilisation d'un guide chirurgical, mais présente aussi ses limites.

Ainsi, Wismeijer et al. (49) dans une revue systématique de la littérature mettent en avant une amélioration en terme de douleur/inconfort, un bénéfice économique et une diminution des complications opératoires en faveur de la chirurgie guidée. Ils mettent néanmoins en garde quant à l'utilisation de techniques flapless qui doivent être utilisées avec la plus grande attention.

Katsoulis et al. (50) dans une étude in-vitro montrent un gain de temps significatif en faveur d'une chirurgie full-guided flapless par rapport à une chirurgie avec un guide juste pour le foret pilote, et par rapport à une chirurgie à main levée.

Enfin, dans une étude de 2019, Younes et al. (51) calculent un rapport entre précision de la pose d'implant et coût de l'intervention. Cette étude montre un coût supplémentaire de 8,29 % (176,54 €) pour un forage pilote guidé et 10,45 % (222,52 €) pour une chirurgie full guided. Corrélé au gain de précision apporté par l'utilisation d'un guide (en fonction de la déviation angulaire), ils notent un surcoût de 5,48 € par pourcentage de précision gagné en forage pilote guidée et 4,12 € pour une chirurgie full guided, et concluent que le surcoût est acceptable et justifié.

Mais la chirurgie guidée a aussi ses limites. La première et la plus fréquemment citée chez les praticiens est le manque de visibilité. Une fois le guide en place, l'accès à la zone opératoire est limité, à moins de retirer le guide, ce qui entraîne une perte de temps et une imprécision dans le remplacement de celui-ci. La sensation tactile est aussi diminuée lors de ce genre de chirurgie, et la perception de la qualité osseuse s'en voit modifiée.

Par ailleurs, une des principales contre-indications à l'utilisation de guides chirurgicaux est l'accès. Une trop petite ouverture buccale ou un site très postérieur empêchent le passage des instruments qui sont plus longs que lors d'une intervention conventionnelle (et doivent

entrer perpendiculairement au guide) et l'épaisseur du guide ne fait que diminuer l'espace disponible.

Eriksson et Albrektsson ont montré qu'au-delà d'une exposition d'une minute à 47 °C, l'os n'est plus capable de se régénérer, les ostéoblastes et les ostéocytes entrent en apoptose voire en nécrose, et il se forme une matrice d'adipocytes en lieu et place de l'ancien tissu osseux. (52). Or, une étude de Frösch (53) et al. montre que l'échauffement de l'os est modifié lors de l'utilisation d'un guide. En effet, le guide « encombre » l'accès de l'irrigant au site implantaire. Il faut donc prendre des précautions particulières pour assurer une bonne irrigation et diminuer l'échauffement lors de l'utilisation de guides chirurgicaux (irrigation supplémentaire avec une seringue, irrigation interne aux forets, forage intermittent ou diminution du nombre de forets).

Enfin, la multiplication d'étapes intermédiaires et le passage du virtuel vers le physique engendrent la multiplication d'erreurs potentielles : les erreurs en imagerie, les erreurs dans la planification, les erreurs dans la conception et l'impression du guide s'additionnent. Il convient donc de limiter au maximum ces erreurs et d'en prévoir les conséquences, par exemple en s'assurant toujours d'une marge d'erreur (54).

IV. Présentation du protocole Blue Sky Plan et cas cliniques

De nombreux logiciels de planification implantaire existent aujourd'hui et la majorité d'entre eux permettent de designer un guide chirurgical. Néanmoins, la plupart de ces logiciels sont des logiciels propriétaires (NobelClinician chez Nobel Biocare, Implant Studio chez 3shape, CoDiagnostiX chez Straumann...) et leur prix est conséquent. Pour ce travail de thèse, c'est le logiciel Blue Sky Plan de chez Blue Sky Bio, qui sera principalement utilisé. Il est gratuit et permet le visionnage de fichier d'imagerie, la planification prothétique et implantaire et le design de guide chirurgical. Seul l'export du fichier STL pour l'impression est payant.

Nombre d'export	Prix	Prix/export (US\$)	Prix/export (€)
5 + 1 offert	125,00 \$US	20,83 \$US	18,54 €
10 + 2 offerts	230,00 \$US	19,17 \$US	17,06 €
50 + 3 offerts	1000,00 \$US	18,87 \$US	16,79 €
100 + 5 offerts	1800,00 \$US	17,14 \$US	15,26 €
200 + 10 offerts	3200,00 \$US	15,24 \$US	13,56 €
300 + 15 offerts	4200,00 \$US	13,33 \$US	11,87 €
500 + 25 offerts	6000,00 \$US	11,43 \$US	10,17 €

Figure 3.1 : prix des exports blue sky plan (taux du 7 avril 2019)

A. La numérisation du patient

Une fois l'indication implantaire posée après anamnèse, examen clinique et radiographique, la première étape est l'acquisition des différentes données du patient, à savoir :

- l'anatomie des bases osseuses grâce à un CBCT (format DICOM),
- l'anatomie des tissus mous grâce à une empreinte optique ou par le scannage d'une empreinte physico-chimique ou d'un modèle en plâtre (format STL).

Il existe un dernier fichier, optionnel, qui doit être importé s'il existe, c'est la numérisation du projet prothétique s'il est réalisé physiquement (wax-up). Le modèle sera scanné à l'aide d'un scanner de laboratoire (au format STL).

Le logiciel Blue Sky plan sera alors lancé.

B. Acquisition dans le logiciel

Une fois le logiciel ouvert, il faut commencer par créer un nouveau projet puis importer les données DICOM du patient. Le volume concerné peut alors être délimité plus précisément, ce qui permet de diminuer la taille du fichier et donc de faciliter les calculs du logiciel, ainsi qu'être aligné.

Les clichés issus de l'imagerie 3D sont dès lors visualisables sur le logiciel et il est possible tracer des courbes panoramiques et d'observer le rendu volumique. Une des premières choses à faire si la planification a lieu à la mandibule, c'est localiser le ou les nerfs alvéolaires inférieurs : il suffit de localiser sur une des vues le canal mandibulaire ou le foramen mentonnier. Le logiciel perçoit ces éléments comme des vides. Le panneau « liste des nerfs » permet d'ajouter les nerfs automatiquement en sélectionnant « détecter nerf » et puis en cliquant dans le canal mandibulaire ou le foramen mentonnier. Il est aussi possible de réaliser un ajout manuel en sélectionnant « ajouter nerf » et en cliquant sur différents points du canal mandibulaire.

Dans un deuxième temps aura lieu l'import du fichier STL de l'arcade du patient. Commence ensuite l'étape du matching (superposition des deux fichiers pour qu'ils coïncident). Le logiciel propose alors différentes méthodes :

- un matching automatique ou il suffit d'indiquer l'arcade concernée (mandibule ou maxillaire)
- un matching point par point où il faudra sélectionner manuellement des points remarquables et concordants sur le fichier d'imagerie DICOM et sur le fichier de volume 3D STL.

Quelle que soit la méthode utilisée, il faudra vérifier sur l'image panoramique le bon ajustement des 2 images. Cet ajustement pourra toujours être modifié par la suite dans le panneau « alignement du modèle ».

Si le fichier du projet prothétique (wax up physique scanné ou projet numérique réalisé par le prothésiste) a été importé, c'est à ce moment qu'il faut l'importer comme une 3e surface et la superposer aux autres par le même système de matching.

Dans le cas contraire, le projet prothétique peut être réalisé directement sur le logiciel grâce à une bibliothèque de dents virtuelles. Celle-ci se retrouve dans l'onglet « dents virtuelles » où il faut alors sélectionner la ou les dents à placer sur notre modèle virtuel.

Différents ensembles de dents sont disponibles pour répondre à toutes les situations comme par exemple en cas de bridge si une dent est un élément pontique.

C. Planification implantaire

Dans l'onglet « implant - ajouter implant », il faut alors sélectionner le système, le type puis le modèle d'implant (taille et plateforme) ainsi que sa localisation (mandibulaire ou maxillaire). Si le système d'implant n'est pas disponible dans la bibliothèque d'implants du logiciel, il est possible de sélectionner un implant personnalisé et de définir sa longueur, son diamètre apical et son diamètre occlusal pour reproduire l'implant souhaité. Il n'est en revanche pas possible de créer sa propre bibliothèque d'implant, cette étape sera donc à réitérer à chaque utilisation d'un implant qui n'est pas dans la base de données du logiciel. Cette base de données est par ailleurs régulièrement incrémentée.

Il est aussi possible d'indiquer la présence ou non d'un futur pilier implantaire. Sa visualisation sur le logiciel est par ailleurs très utile, car il apparaît comme un prolongement de l'axe de l'implant et permet de faciliter la planification. C'est à ce niveau là que sont définies les dimensions et la position du tube de guidage en fonction du type de chirurgie. Le diamètre de ce dernier devra correspondre au diamètre externe de la douille correspondant au plus large instrument qui aura à cheminer dans le guide, du foret pilote au porte-implant en cas de chirurgie full-guided.

Si l'intervention est réalisée à l'aide de broches de fixation osseuses transmuqueuses pour stabiliser le guide, c'est aussi dans la partie « ajouter nouvel implant » que la planification de ces broches aura lieu.

En cliquant approximativement au niveau de la zone du futur implant, il apparaîtra sur les différentes vues. Sa position sera par la suite modifiée pour positionner notre futur implant de manière optimale par rapport au volume osseux et à la future prothèse.

D. Design du guide

Une fois l'implant dans la bonne position, il est conseillé de la verrouiller pour être sûr de ne pas la modifier par accident par la suite, et vient ensuite la phase de design du guide.

Dans le panneau « fabrication du guide », il faut dessiner à main levée le contour du futur guide. Ce dernier devra être suffisamment étendu pour être stable et éviter les contre-dépouilles pour pouvoir s'insérer sur l'arcade. L'épaisseur du guide sera modifiable (3 mm par défaut) ainsi que le tracé. Une fois le guide satisfaisant, vient l'étape d'exportation du guide, seule étape payante sur Blue Sky Plan, qui permet l'obtention du fichier STL du futur guide.

Ce guide pourra par la suite être encore amélioré grâce à des logiciels de modélisation 3D comme Meshmixer, SketchUp ou Exocad. Cette étape de finition de la modélisation du guide permet par exemple d'obtenir des contours plus fins, de modifier l'épaisseur du guide et d'optimiser son impression. Une ouverture au niveau d'une dent est conseillée afin de valider le bon enfoncement du guide.

E. Impression et post traitement

Une fois le design du guide achevé, commence alors la phase d'impression. La plupart des imprimantes possèdent un logiciel propriétaire pour planifier cette impression (PreForm pour Formlabs par exemple). Dans ces logiciels, il faudra définir les paramètres d'impression que sont le choix de l'imprimante, le choix du matériau et l'épaisseur des couches. Plus une couche sera fine, plus l'impression sera précise, mais plus elle sera longue. Le choix de l'imprimante permet principalement de définir la taille du plateau d'impression.

Une fois l'objet importé dans le logiciel, il va falloir le positionner sur le plateau et placer les supports d'impression (ils sont souvent générés automatiquement par le logiciel d'impression). Une fois l'impression terminée, les étapes de post-traitement liées au matériau seront à réaliser (rinçage à l'alcool et post-polymérisation) puis le guide sera prêt à recevoir les douilles.



Lien vers la vidéo

Tutoriel Blue Sky Plan

https://youtu.be/sZ8XKbZ_q7k

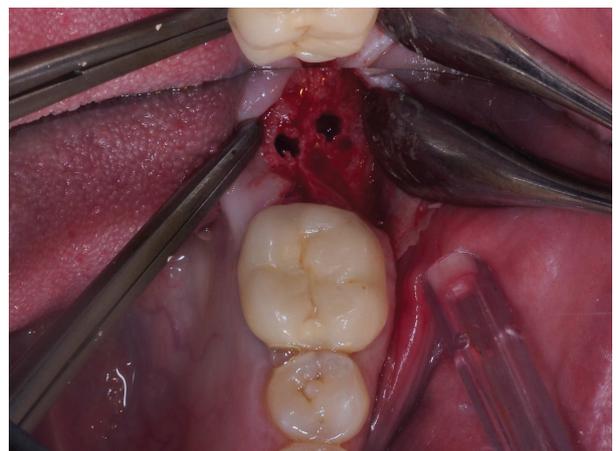
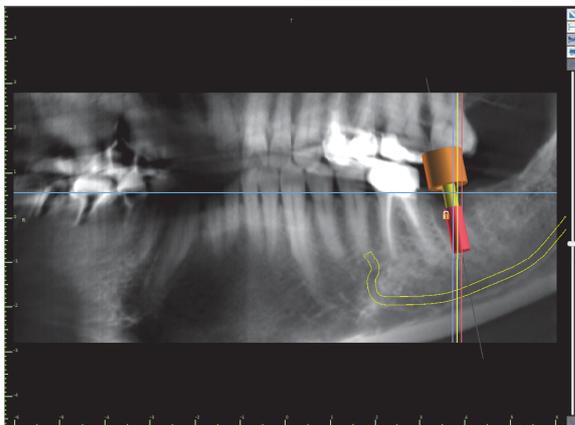
F. Cas cliniques

1. Cas unitaire - full guided - BlueskyPlan - Formlabs

Monsieur H.M., 40 ans, sans problèmes médicaux. Suite à l'extraction de sa 37 le 02/03/2019 pour cause de perforation, la décision de réaliser la pose d'un implant unitaire en 37 a été retenue.

Un cone beam a été réalisé (ProMax 3D Classic de Planmeca) le 23/04/2019 et l'empreinte optique (caméra PlanScan de Planmeca) le 14/05/2019. La planification implantaire a été réalisée en parallèle sur les logiciels BlueSky Plan, à l'aide d'un projet prothétique virtuel réalisé sur Exocad.

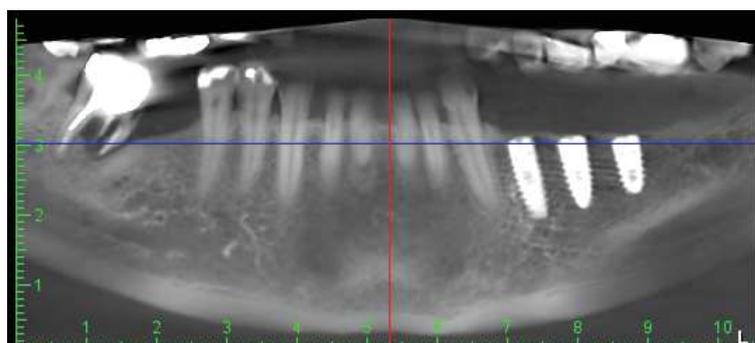
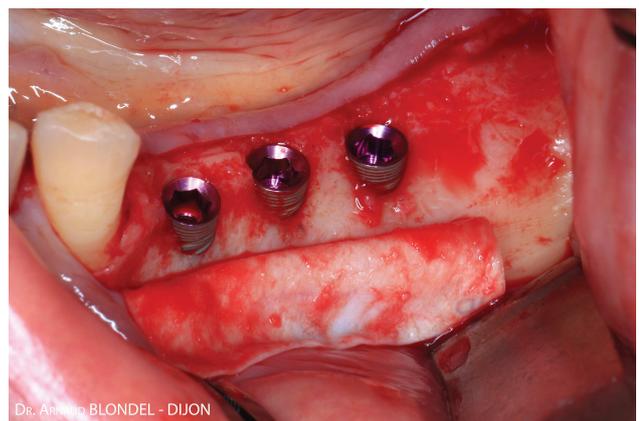
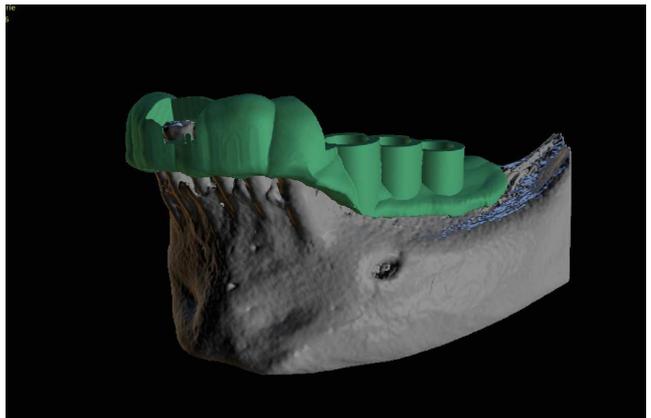
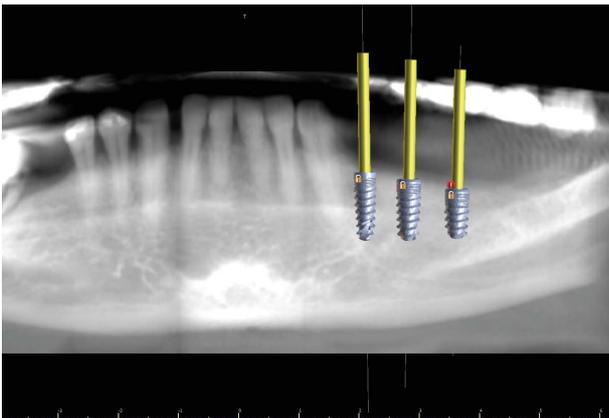
La pose d'un implant BlueSky de chez Bredent (4x10 mm) et le guide pour forage full guided a été imprimé avec une Form2 (Formlabs) en résine DentalSG. Le jour de l'intervention, la stabilité initiale du guide est validée en bouche, mais l'espace disponible pour permettre au foret pilote de le traverser est limitée. Il est alors décidé de réaliser une intervention flapless en insérant d'abord le foret dans le guide puis en insérant l'ensemble en bouche. Le praticien n'étant pas sûr de l'insertion optimale du guide, il décide à ce moment de lever un lambeau après la réalisation du forage pilote. Ce dernier étant beaucoup trop vestibulaire, il décide de réaliser la suite de l'intervention à main levée.



2. Cas multiple 3 implants - Bluesky Plan - Formlabs

Madame V.P., 40 ans, sans antécédent médicaux. Edentée depuis une dizaine d'années sans appareillage, elle consulte pour 3 implants en secteur 3.

Il a été décidé de poser 3 implants SEVEN de chez MIS. La planification et le guide ont été réalisés sur BlueSky Plan, et le guide pour forage pilote et pose de l'implant à travers le guide imprimé sur une imprimante Formlabs à l'aide de la résine DentalSG (Formlabs). La planification de la prothèse puis des implants a permis de mettre en évidence que, bien que le volume osseux soit satisfaisant, une partie des implants allait être non enfouie. La patiente a donc été prévenue en amont de l'intervention, son consentement pour les protocoles et les matériaux ainsi que le devis ont été signés avant l'intervention. Le comblement osseux (50 % os particulaire, 50 % bio-os Geistlich) a donc été réalisé après la mise en place des implants, et maintenu par une membrane Bioguide Geistlich et des pins Geistlich.

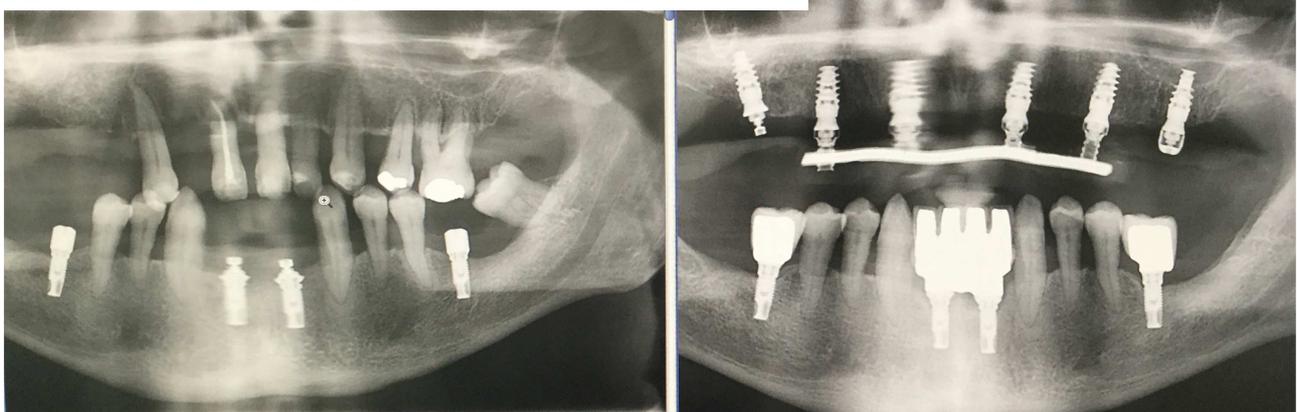
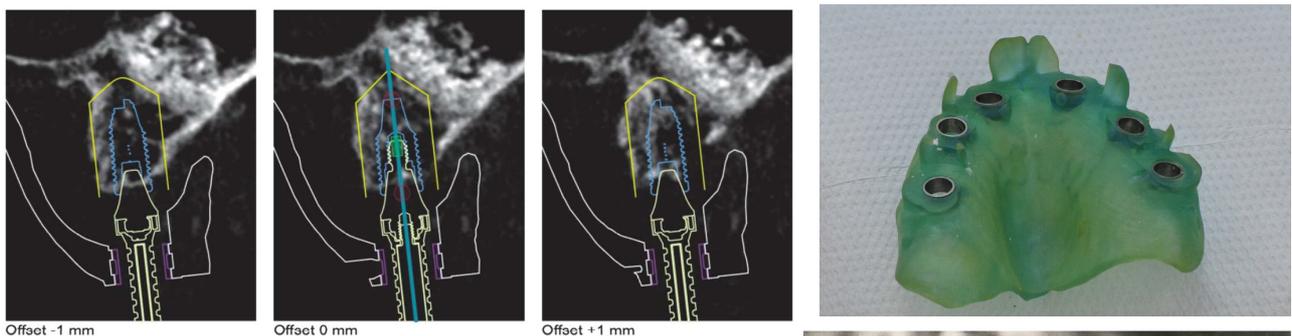
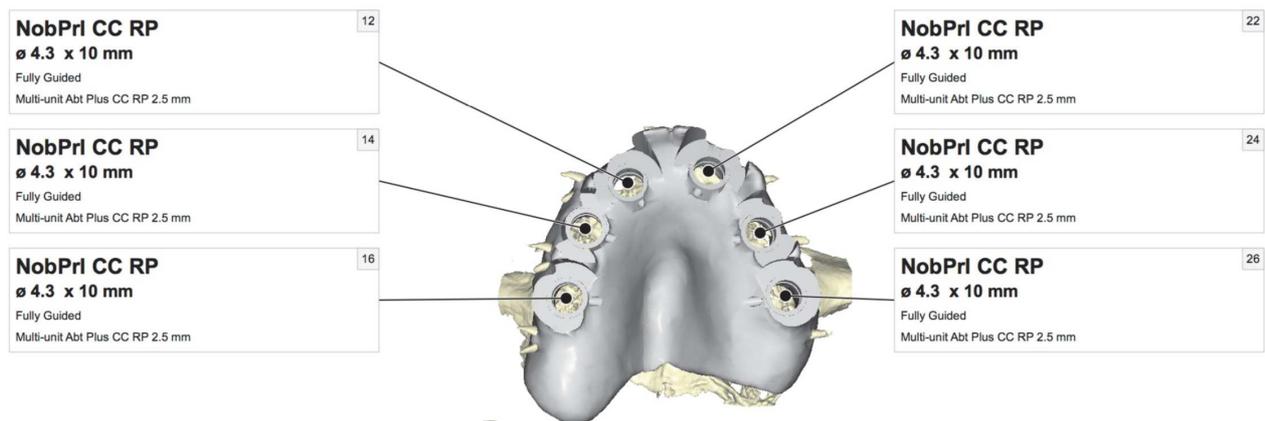


Photos du Dr.BLONDEL

3. Cas complet - All on 6 maxillaire - forage pilote - dental clinician- Bego

Ici, en présence d'un édentement total maxillaire, la méthode du dual scan a été utilisée. Après avoir validé le projet prothétique avec une prothèse amovible complète, un duplicata de cette dernière a été réalisé pour servir de guide radiologique. Le CBCT et la planification (disponible en annexe) ont été envoyés au service Nobel Procera qui a par la suite réalisé l'impression 3D du guide chirurgical pour 6 implants. Le guide radiologique a aussi été évidé dans le couloir prothétique afin de l'utiliser comme un second guide pour vérifier le parallélisme des implants.

Lors de l'intervention, le guide imprimé a été utilisé en flapless uniquement pour les forages pilotes en raison de l'ouverture buccale insuffisante pour utiliser correctement le système Nobel de cuillère qui s'avère être bien plus encombrant qu'un système douille dans douille. En raison d'une stabilité primaire insuffisante sur les deux implants les plus distaux, ils n'ont pas été mis en charge immédiatement.



Illustrations personnelles

V. L'impression 3D de guides chirurgicaux : un investissement ?

Il existe aujourd'hui de nombreux moyens d'obtenir un guide chirurgical. La plupart des grandes marques d'implants proposent aujourd'hui des produits visant à « simplifier » la chirurgie guidée. Elles permettent au praticien d'envoyer ses données (CBCT et scan de l'empreinte) sur une plateforme web, puis lui proposent une planification implantaire. Le praticien n'a plus qu'à modifier ou valider cette planification et il recevra le guide chez lui. Mais il est toujours possible pour le chirurgien-dentiste de réaliser lui-même les différentes étapes, jusqu'à la façon la plus « complète » où le praticien réalise tout de A à Z. Bien entendu, des coûts s'appliquent à ces différentes étapes.

A. Matériel nécessaire à la chirurgie guidée

En raison de l'épaisseur du guide, les forets classiques de chirurgie implantaire sont trop courts et n'atteignent pas la profondeur de forage souhaitée. Les fabricants ont donc mis au point une gamme de forets longs (jusqu'à 42 mm de long chez Straumann par exemple) qui permettent le passage des différents forets et porte-implants à la longueur souhaitée. En fonction du système de guidage utilisé (douille dans douille ou bien cuillère de perçage), les fabricants ont là aussi mis à jour leur gamme. Certains vendent des douilles propriétaires, d'autres fournissent des douilles de tierce entreprise et certains indiquent les dimensions nécessaires pour une commande par le praticien. Les cuillères sont toujours des pièces propriétaires vendues par l'industriel. Enfin, certains fabricants commercialisent des trousse de chirurgie guidée plus ou moins complètes réunissant dans la même caisse tout le matériel nécessaire.

Tout ce matériel est réutilisable et stérilisable, néanmoins les douilles apparaissent plus comme du consommable du fait de la manipulation fréquente et du fait qu'il arrive de les coller au guide afin d'assurer leur bonne tenue. Chez Biosummer 3D, le lot de 10 douilles coûte entre 7,56 € et 11,88 €.

ETK propose par exemple une trousse de chirurgie guidée simplifiée contenant un foret pour clavette d'ancrage et 3 clavettes, deux découpeurs gingivaux et leurs guides (diamètre 4,1 mm et 4,8 mm) ainsi que 5 forets pilotes de diamètre 2,2 mm à butée (longueurs 6, 8, 10, 12 et 14 mm) au prix de 690 €. Il faudra ajouter à cette trousse les bagues en titane à positionner sur le guide. Cette trousse contient donc l'essentiel du

matériel pour réaliser un forage pilote. Une trousse de chirurgie traditionnelle du système utilisé devra bien sûr être en possession du praticien pour réaliser la pose de l'implant.

B. Les services disponibles

Il existe des entreprises spécialisées et des industriels de l'implantologie qui proposent de fabriquer des guides chirurgicaux. Elles fonctionnent en leur envoyant le fichier DICOM du patient et le fichier STL de l'empreinte, et elles proposent par la suite un plan de traitement. Une fois ce plan de traitement validé, ils réalisent la conception du guide, l'impriment et l'envoient. Voici quelques acteurs de ce marché :

- 3DCelo : jeune entreprise française qui propose différentes offres sur son site internet. Ses tarifs sont par exemple 100 € pour un implant unitaire en full guided, 159 € pour 3 implants en full guided ou encore 309 € pour un guide pour un all on 6 en full guided. Cette entreprise propose aussi 2 forets pilotes (diamètre 2 mm, 19 et 20 mm de long) à 140€,
- Surgical Implant 3D, une entreprise basée à Metz, propose 3 offres : découverte (assistance à la planification dans leurs locaux à Metz + impression d'un guide) 298 €, pro (licence SMOP valide 1 an + 10 guides) 2 980 € et expert (licence SMOP valide 1 an + 40 guides) 9 520 €, hors frais de port, soit une moyenne de 268 € le guide,
- LyraGuide, une plateforme de la société Lyra ne propose pour l'instant que des guides pour forage pilote : 150 € pour un implant sans clavette, 263 € pour 6 implants sans clavette (supplément de 45 € pour les clavettes),
- la plateforme Simplant de Dentsply Sirona peut imprimer un guide aux tarifs suivants : 345 € pour un implant en forage pilote guidé, 397,18 € pour un implant en full guided ou encore 912,69 € pour 6 implants en full guided,
- Dentsply Sirona toujours, propose depuis le mois de juin la solution Azento : pour les cas unitaires, Azento est un kit comprenant un guide, les forets, l'implant, la vis de couverture/cicatrisation et en option le pilier et la couronne provisoire.
- le laboratoire CROWN ceram dans le Haut-Rhin propose une offre avec un prix de base à partir de 203 € le guide.

D'après nos recherches, le prix médian d'achat d'un guide et de la planification implantaire est d'environ 350 €.

La seconde solution proposée par les industriels est l'impression seule du guide. Le praticien réalise sa planification lui-même et envoie le fichier STL du guide pour impression. Il existe par exemple les offres suivantes :

- 3DCelo propose l'impression du guide pour 40 € et 9 € de frais de port,
- le fabricant d'implant suisse Thomenn propose l'impression d'un guide pour 200 €,
- Dentsply Sirona via sa plateforme Simplant propose des impressions aux tarifs suivants: 205 € pour un guide pilote pour un implant, 257,18 € pour un implant full guided et jusqu'à 462,69 € pour 6 implants en full guided,
- LyraGuide : 99 € pour un implant sans clavette, 222 € pour 6 implants sans clavette (supplément de 30 € pour les clavettes),
- Crown Ceram propose une impression à 76,10 €,
- Nobel Biocare propose un clic à 50 € pour l'export du fichier STL de son logiciel DTX implant studio.

Par ailleurs, si notre laboratoire de prothèse dentaire possède une imprimante 3D, il peut lui aussi imprimer ledit guide. Les tarifs moyens sont d'une cinquantaine d'euros.

C. Offre logiciel

On retrouve sur le marché de nombreux logiciels qui proposent de réaliser notre planification implantaire et de designer notre guide. En voici quelques-uns :

Blue Sky Plan de Blue Sky Bio, utilisé plus tôt dans cette thèse est gratuit à l'utilisation, mais demande de régler l'export du fichier STL du guide afin de l'imprimer. Les tarifs se retrouvent au début du quatrième chapitre de cette thèse.

Romexis de Planmeca : c'est au départ un logiciel d'imagerie, mais qui possède un module implant planning pour la planification implantaire et un module guide design pour la conception de guides chirurgicaux. Ce dernier module permet d'exporter gratuitement le fichier STL du guide pour sa future impression, mais il coûte néanmoins près de 5 000 €.

Le fabricant 3shape propose deux solutions :

- Implant planner au prix de 1 200 € et une licence annuelle de 180 € dans laquelle le praticien réalise uniquement sa planification implantaire et un laboratoire partenaire réalise le guide.

- Implant studio au prix de 5 400 € et 480 € de licence annuelle, logiciel complet pour la planification implantaire, la conception du guide.

L'entreprise Dentsply/Sirona a elle aussi son logiciel de planification implantaire : SImplant. La licence complète, pour environ 5 000 €, permet la planification et la conception de guides chirurgicaux. Il est possible alors d'exporter le STL ou bien de commander une impression. C'est aujourd'hui le seul fabricant à proposer des guides à appui osseux.

DentiQ est un logiciel d'imagerie coréen de la société 3dii qui permet aussi de réaliser des guides chirurgicaux. Ce logiciel ouvert coûte 300 US\$ (268,04 €) et il faut, comme dans BlueSky Plan, payer les exports STL (20 US\$ soit 17,87 €)

Dentral Wings est une société canadienne spécialisée dans la dentisterie numérique. Elle commercialise le logiciel Codiagnostix spécialisé dans la planification implantaire et la conception de guides chirurgicaux : son tarif 4 500 € et 600 € l'année de licence (la première année de licence est offerte). Pour la conception d'un guide, il existe un surcoût de 60 € le clic.

Le fabricant d'implant suisse Nobel Biocare dispose de son propre logiciel, DTX studio implant (anciennement Nobel Clinician) pour la planification implantaire et la conception de guides chirurgicaux. Le logiciel, au prix de 4 900 € hors taxe est très souvent offert lors de l'achat d'une trousse de chirurgie ou d'implants. Là aussi, un surcoût de 60 € le clic existe pour l'export du fichier STL.

Exocad est le logiciel de conception assistée par ordinateur dentaire le plus utilisé par les laboratoires de prothèse dans sa version DentalCAD. Il existe aussi une version chairside pour les praticiens, ChairsideCAD qui possède depuis peu le module payant Exoplan pour la planification implantaire et la conception de guide chirurgicaux.

Le logiciel ChairsideCAD est disponible pour 190 € par mois et le logiciel DentalCAD pour 230,40 € par mois (4 000 € pour la version complète). Le module exoplan quant à lui est disponible à 340 € le premier mois puis 50 € par mois pour un engagement de 12 mois, et 150 € le premier mois puis 50 € par mois pour un engagement de 36 mois.

Il existe donc de nombreux logiciels pour concevoir son guide chirurgical à des tarifs très différents. Si le praticien qui souhaite réaliser lui-même cette opération possède déjà un logiciel d'imagerie ou de CAO, l'ajout d'un module supplémentaire devient intéressant financièrement. BlueSky Plan reste cependant le choix le plus rentable.

D. Offre imprimantes et matériaux

Le marché de l'impression 3D est en pleine expansion et l'offre disponible aujourd'hui est énorme. Certains industriels ont joué la carte du dentaire pour proposer des machines, mais aussi des matériaux et un service après-vente adaptés. C'est le cas Formlabs qui depuis la Form1 en 2012 cible ce secteur. Avec la Form2, c'est aujourd'hui l'une des imprimantes les plus présentes dans le domaine de l'impression de guides chirurgicaux avec la technologie SLA. On la retrouve sur le site du fabricant sous deux packages, le basic à 2 699 € et le complet (avec form cure, form wash et 1 an d'assistance) à 4 299 €. Au niveau de la résine, un litre de résine SG se trouve au prix de 270 € chez le fabricant et une résine pour imprimer des modèles comme la Dental Model à 135€ le litre. Nextdent est la filiale dentaire du géant Américain 3DSystems et elle propose deux modèles :

- la FabPro 1000, une imprimée DLP au prix de 3 500 €,
- la ND5100, une imprimante DLP plus haut de gamme au prix de 12 000 €.

L'entreprise commercialise aussi un mélangeur de résine (350 €) et une chambre UV de post-polymérisation (1 800 €). Enfin, il est bon de préciser que c'est Nexdent qui fabrique les résines Formlabs, elle possède donc elle aussi une résine spécifique aux guides chirurgicaux, la résine SG au prix de 276 € le litre et une résine pour les modèles, la Model 2.0 au prix de 216 € le litre.

Il existe aussi des imprimantes qui sont plus orientées vers les laboratoires : elles possèdent une surface d'impression plus importante, une vitesse augmentée et une plus grande variabilité de matériaux, par exemple les MED 610 et Object 30 Prime de chez Stratasys qui coûtent entre 48 000 € et 150 000 €, ou la Varseo S de chez BEGO pour 13 000 €.

Mais il est aussi possible d'opter pour une imprimante 3D non-orientée dentaire, mais qui en contrepartie n'aura peut être pas de matériaux adaptés ou de service après-vente spécialisé. La Robox Dual par exemple, une imprimante FDM qui possède un filament en polyester sans styrène à usage alimentaire et qui peut être au contact du corps humain.

On peut retrouver cette imprimante pour 1 740 € sur le site biosummer3D. Un autre modèle existant, la Zotrax Inkspire avec laquelle nous avons eu l'occasion de travailler pour l'impression de modèle, une imprimante LCD au prix de 1 690 €, mais qui n'a pas encore de résine biocompatible.

E. Choix le plus rentable et retour sur investissement

i. Matériel et méthode

Pour se procurer un guide chirurgical, différentes options existent et il est pertinent de savoir laquelle semble être la plus intéressante et s'il est rentable pour un cabinet dentaire de s'équiper d'une imprimante 3D.

Ici, deux cas seront comparés où le chirurgien-dentiste se place dans deux situations diamétralement opposées :

- il souhaite être le seul maître à bord donc souhaite tout réaliser de A à Z, n'a pas peur de la technologie et est en accord avec une la notion de courbe d'apprentissage (Il est prêt à perdre du temps au début mais sait que ce temps va diminuer avec le nombre de guides fabriqués. Il investit donc dans une imprimante 3D et va réaliser sa planification implantaire et son guide sur BlueSky Plan (situation 1),
- il ne souhaite pas s'occuper de la planification numérique et de la conception du guide, il envoie simplement à un prestataire son fichier DICOM du patient et une empreinte (situation 2). La moyenne est de 350 € par guide.

Pour la situation 1, il faut poser l'hypothèse que le praticien acquiert un package Formlabs comprenant une imprimante 3D Form2, un bac de rinçage automatique et un four de post-polymérisation et un an d'assistance au prix de 4 299 € et que le volume moyen de résine pour l'impression d'un guide est de 11 mL, ce qui revient à un coût de matière première à 4,60 € (11 mL de résine Dental SG et l'utilisation du bac de résine correspondant). Ces tarifs proviennent du site de Formlabs. Il est estimé que le temps moyen passé sur BlueSky Plan par le praticien pour concevoir son guide diminue avec le temps ; que le premier cas va durer une heure et qu'il va gagner 5 minutes sur chaque cas suivant jusqu'à atteindre un temps plateau de 15 minutes à partir du dixième cas (temps estimé à partir de notre expérience personnelle) et que le temps passé pour le post-traitement du guide est de 15 minutes. Ces temps ont été corrélés au salaire horaire moyen de 45 €/h d'un chirurgien-dentiste (salaire moyen de 6 100 € par mois et en moyenne 1 600 heures

de travail par an (58)(59). Les tarifs utilisés des exports sont ceux indiqués plus haut au début du paragraphe IV.

ii. Résultats

À partir du 10ème guide, c'est à dire le guide à partir duquel le tarif des exports STL varie et où le chirurgien-dentiste est efficace dans sa conception, le prix de revient d'un guide est de 44,16 € (4,60€ de résine, 17,06 € d'export STL pour 10 exports achetés et 30 minutes de temps de travail soit 22,50 €) et 6,89 € de moins soit 37,27 € si on achète les 500 exports.

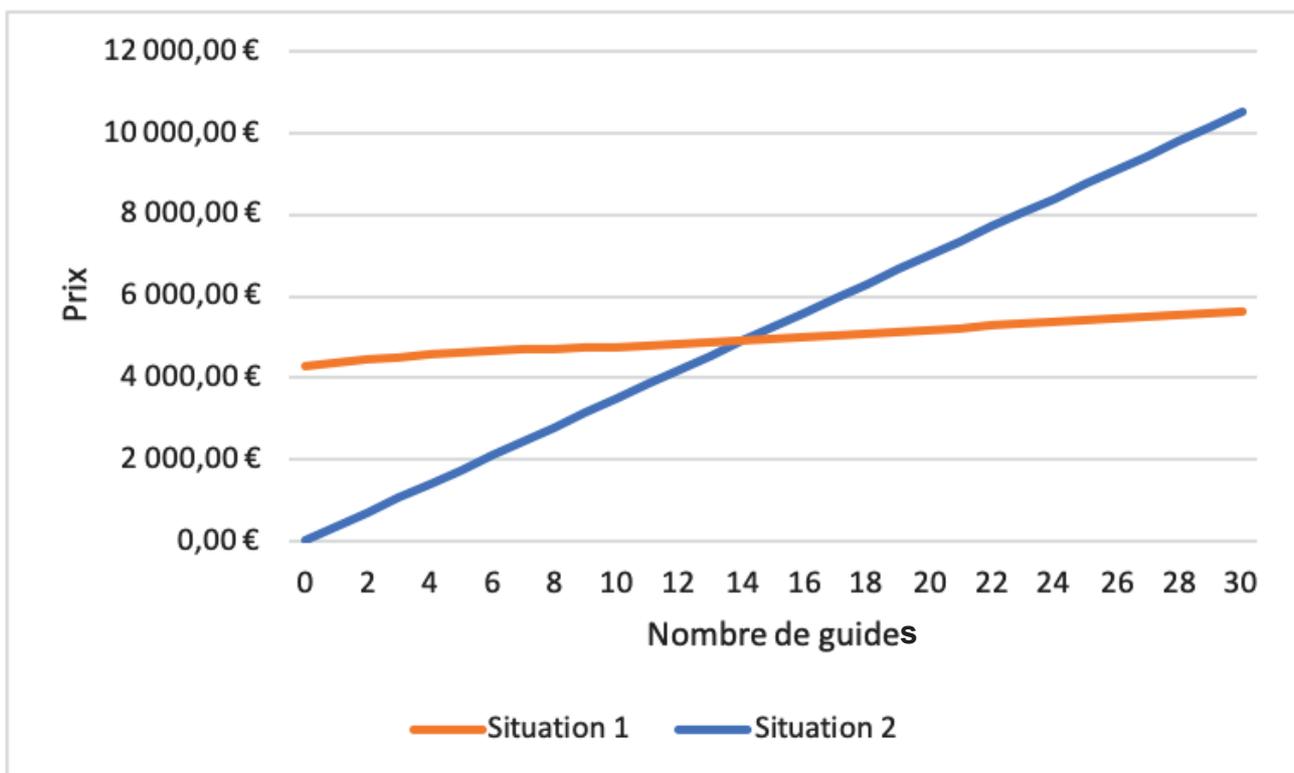


Figure 4.1 : graphique de l'investissement en fonction du nombre de guides

L'équation à résoudre pour savoir à partir du combienième guide, il est intéressant d'investir dans une imprimante 3D est la suivante :

$$350x = 44.16x + 4299$$

$$350x - 44.16x = 4299$$

$$305.84x = 4299$$

$$x = \frac{4299}{305.84}$$

$$x \approx 14,056369343448$$

Il est donc possible de conclure qu'il devient intéressant d'avoir sa propre imprimante 3D pour imprimer ses guides chirurgicaux au bout de 15 guides.

iii. Discussion

Les deux cas présentés ici sont les cas les plus extrêmes. Pour déterminer le prix moyen, la moyenne entre le guide le moins cher (classiquement pour le forage pilote d'un implant, sans clavette et à appui dentaire) et le guide le plus cher (six implants en full guided, avec des clavettes et un appui muqueux ou osseux) a été calculée chez chaque fabricant. Par la suite, c'est la moyenne de tous ces tarifs qui a été calculée.

Il existe néanmoins une alternative à ces deux situations, à savoir réaliser la planification soi-même et faire imprimer le guide, soit par un laboratoire de prothèse, soit par un prestataire spécialisé. Là aussi, les prix varient énormément, mais pour un tarif de 100 € le guide, l'achat d'une imprimante 3D devient rentable à partir de 78 guides. Par ailleurs, certains laboratoires de prothèse proposent des guides au prix de 50 € (dans ce cas là, il est théoriquement rentable d'acheter sa propre imprimante à partir de 737 guides). Le facteur le plus important dans ces tarifs est le temps de travail en amont de l'impression et lors du post-traitement. Ces tarifs seront revus à la baisse si c'est par exemple une assistante dentaire qualifiée ou un prothésiste dentaire qui s'occupaient du post-traitement. De plus, les laboratoires de prothèse dentaire s'équipent de plus en plus d'imprimante 3D bien plus performantes qu'une Form2 qui disposent de résine compatibles à l'impression du guide. Il est donc pertinent que ces laboratoires proposent l'impression de guides aux praticiens.

VI. Conclusion

Younes et al. concluent leur essai randomisé contrôlé de 2018 (47) que « la chirurgie full guided en implantologie devrait être le gold standard ». En effet, il a été démontré au travers de cette thèse que l'utilisation d'un guide procure des avantages précieux que dès lors qu'il est accepté l'idée du paradigme d'implantologie dirigée par la prothèse :

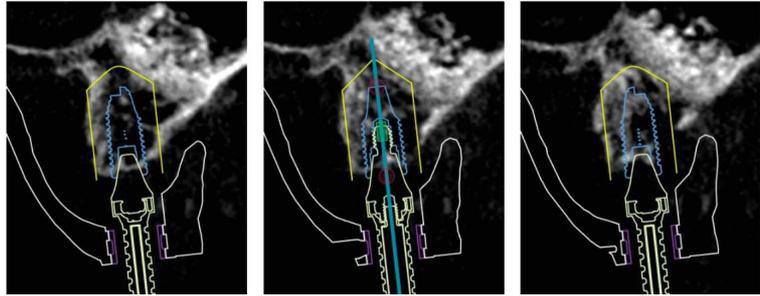
- gain de précision,
- gain de temps,
- confort pour le patient.

L'impression 3D, en particulier grâce aux technologies utilisant la photopolymérisation comme avec les imprimantes SLA, DLP et LCD, permet d'obtenir rapidement et à un coup réduit des guides avec une précision suffisante. Les industriels ont conscience de ces avancées technologiques et proposent aujourd'hui une très importante gamme d'imprimantes, de matériaux, dont certains bio-compatibles, et de solutions variées pour permettre aux praticiens d'accéder à la chirurgie guidée. Ce sera en fonction du système implantaire utilisé, du nombre de guides souhaité et de la motivation à embrasser les nouvelles technologies que le choix se portera. Néanmoins, l'impression 3D ayant des emplois plus nombreux dans un laboratoire de prothèse que dans un cabinet dentaire, ces technologies seront sûrement plus utilisées par les prothésistes qui pourront imprimer ces guides sur des machines très performantes que par les chirurgien-dentistes directement.

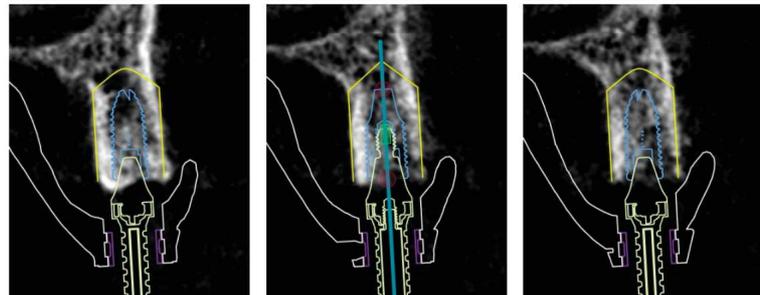
ANNEXE

Planification Nobel Procera

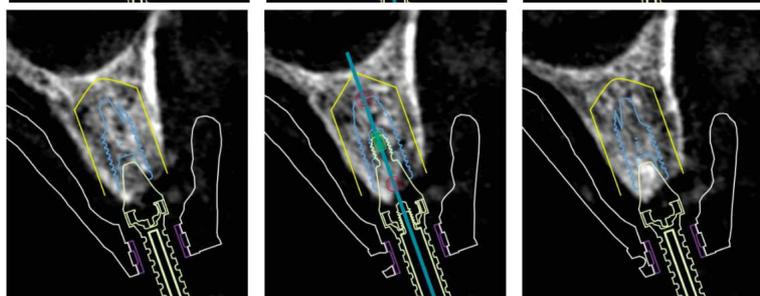
16 : NobelParallel Conical
Connectoion, RP, 4,3 x 10 mm



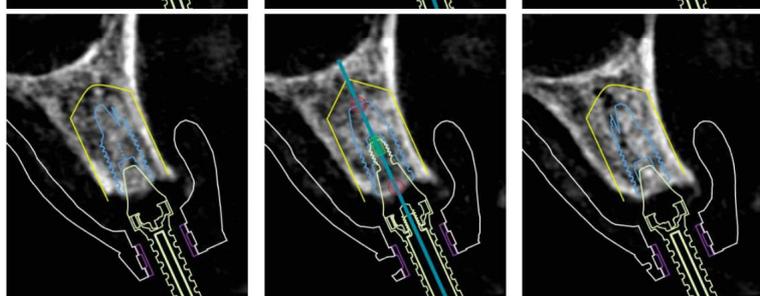
14 : NobelParallel Conical
Connectoion, RP, 4,3 x 10 mm



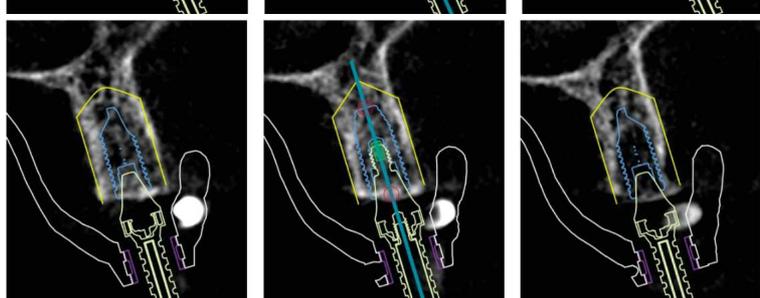
12 : NobelParallel Conical
Connectoion, RP, 4,3 x 10 mm



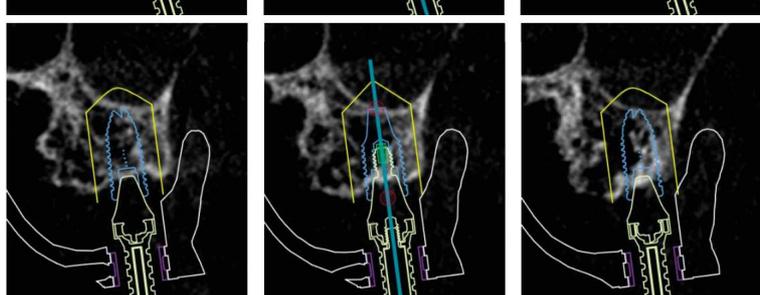
22 : NobelParallel Conical
Connectoion, RP, 4,3 x 10 mm



24 : NobelParallel Conical
Connectoion, RP, 4,3 x 10 mm



26 : NobelParallel Conical
Connectoion, RP, 4,3 x 10 mm



Offset -1 mm

Offset 0 mm

Offset +1 mm

Références bibliographiques

1. Andre J-C, Mehaute AL, Witte OD. Dispositif pour realiser un modele de piece industrielle [Internet]. FR2567668A1, 1986
2. Hull CW. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography [Internet]. US4575330A, 1986
3. Hornbeck LJ. Spatial light modulator and method [Internet]. US5061049A, 1991
4. Gothait H. Apparatus and method for three dimensional model printing [Internet]. US6259962B1, 2001
5. Maruo S, Nakamura O, Kawata S. Three-dimensional microfabrication with two-photon-absorbed photopolymerization. Opt Lett, OL. 15 janv 1997;22(2):132-4.
6. Deckard CR. Method and apparatus for producing parts by selective sintering [Internet]. US4863538A, 1989
7. Larson R. Method and device for producing three-dimensional bodies [Internet]. US5786562A, 1998
8. Sachs EM, Haggerty JS, Cima MJ, Williams PA. Three-dimensional printing techniques [Internet]. US5340656A, 1994
9. Crump SS. Apparatus and method for creating three-dimensional objects [Internet]. US5121329A, 1992
10. MacCormack C, MacCormack F. Adhesive dispensing device [Internet]. US20110094441A1, 2011
11. Daalkhajav U, Yirmibesoglu OD, Walker S, Mengüç Y. Rheological Modification of Liquid Metal for Additive Manufacturing of Stretchable Electronics. Advanced Materials Technologies. 2018;3(4):1700351
12. Wang YM, Voisin T, McKeown JT, Ye J, Caltà NP, Li Z, et al. Additively manufactured hierarchical stainless steels with high strength and ductility. Nature Materials. janv 2018;17(1): 63-71

13. <http://contourcrafting.com>
14. Mirani B, Pagan E, Shojaei S, Duchscherer J, Toyota BD, Ghavami S, et al. A 3D bioprinted hydrogel mesh loaded with all-trans retinoic acid for treatment of glioblastoma. *Eur J Pharmacol.* 5 juill 2019;854:201–12
15. Lemoine MD, Mannhardt I, Breckwoldt K, Prondzynski M, Flenner F, Ulmer B, et al. Human iPSC-derived cardiomyocytes cultured in 3D engineered heart tissue show physiological upstroke velocity and sodium current density. *Scientific Reports.* 14 juill 2017;7(1):5464
16. <https://www.tctmagazine.com/3d-printing-news/3d-systems-redefine-digital-dentistry-nextdent-5100/>
17. https://nextdent.com/downloads/ifu/IFU_NextDent_SG_INSG201704UK.pdf
18. Buser D, Martin W, Belser UC. Optimizing esthetics for implant restorations in the anterior maxilla: anatomic and surgical considerations. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 2004;19 Suppl: 43–61
19. Canullo L, Tallarico M, Radovanovic S, Delibasic B, Covani U, Rakic M. Distinguishing predictive profiles for patient-based risk assessment and diagnostics of plaque induced, surgically and prosthetically triggered peri-implantitis. *Clin Oral Implants Res.* oct 2016;27(10): 1243–50
20. Brånemark PI, Adell R, Breine U, Hansson BO, Lindström J, Ohlsson A. Intra- osseous anchorage of dental prostheses. I. Experimental studies. *Scand J Plast Reconstr Surg.* 1969;3(2):81–100
21. Verhoeven JW(1), Cune MS. Radiographic planning and the evaluation of implant treatment. *Ned Tijdschr Tandheelkd.* 2003 Mar;110(3):113-9
22. Grunder U, Gracis S, Capelli M. Influence of the 3-D bone-to-implant relationship on esthetics. *The International journal of periodontics & restorative dentistry.* 2005;25(2):113–9
23. Kan JYK, Rungcharassaeng K, Umezu K, Kois JC. Dimensions of peri-implant mucosa: An evaluation of maxillary anterior single implants in humans. *J Periodontol* 2003;74:557-562
24. Lin C-L, Wang J-C, Ramp LC, Liu P-R. Biomechanical response of implant systems placed in the maxillary posterior region under various conditions of angulation, bone density, and loading. *Int J Oral Maxillofac Implants.* févr 2008;23(1):57–64.

25. Abrahamsson I, Berglundh T, Wennstrom J, Lindhe J. The peri-implant hard and soft tissues at different implant systems. A comparative study in the dog. *Clin Oral Implants Res.* sept 1996;7(3):212-9
26. Berglundh T, Lindhe J, Ericsson I, Marinello CP, Liljenberg B, Thomsen P. The soft tissue barrier at implants and teeth. *Clin Oral Implants Res.* juin 1991;2(2):81-90.
27. Buser D, Weber HP, Donath K, Fiorellini JP, Paquette DW, Williams RC. Soft tissue reactions to non-submerged unloaded titanium implants in beagle dogs. *J Periodontol.* mars 1992;63(3):225-35.
28. Becker W, Becker BE, Newman MG, Nyman S. Clinical and microbiologic findings that may contribute to dental implant failure. *Int J Oral Maxillofac Implants.* 1990;5(1):31-8.
29. Jeong S-M, Choi B-H, Li J, Kim H-S, Ko C-Y, Jung J-H, et al. Flapless implant surgery: an experimental study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* juill 2007;104(1):24-8.
30. You T-M, Choi B-H, Li J, Xuan F, Jeong S-M, Jang S-O. Morphogenesis of the peri-implant mucosa: a comparison between flap and flapless procedures in the canine mandible. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* janv 2009;107(1):66-70.
31. Misch CE. *Contemporary Implant Dentistry - E-Book.* Elsevier Health Sciences; 2007. 1121 p.
32. Esposito M, Maghaireh H, Grusovin MG, Ziounas I, Worthington HV. Soft tissue management for dental implants: what are the most effective techniques? A Cochrane systematic review. *Eur J Oral Implantol.* 2012;5(3):221-38.
33. An X, Yang H-W, Choi B-H. Digital Workflow for Computer-Guided Implant Surgery in Edentulous Patients with an Intraoral Scanner and Old Complete Denture. *Journal of Prosthodontics* [Internet]. [cité 19 mai 2019];0(ja). Disponible sur: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jopr.13073>
34. Arcuri L, De Vico G, Ottria L, Condo R, Cerroni L, Mancini M, et al. Smart fusion vs. Double scan: A comparison between two data-matching protocols for a computer guided implant planning. *La Clinica terapeutica.* 1 mai 2016;167:55-62.
35. Liang X, Lambrichts I, Sun Y, Denis K, Hassan B, Li L, et al. A comparative evaluation of Cone Beam Computed Tomography (CBCT) and Multi-Slice CT (MSCT). Part II: On 3D model accuracy. *Eur J Radiol.* août 2010;75(2):270-4.

36. Davarpanah M, Szmukler-Moncler S, Davarpanah K, Rajzbaum P. Implantologie assistée par ordinateur [Internet]. Cahiers de prothèses éditions; 2010. (Collection JPIO).
37. Schulze R, Heil U, Groß D, Bruellmann D, Dranischnikow E, Schwanecke U, et al. Artefacts in CBCT: a review. *Dentomaxillofac Radiol.* juill 2011;40(5):265–73.
38. 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.* févr 2009;67(2):394–401
39. Van Assche N, Vercruyssen M, Coucke W, Teughels W, Jacobs R, Quirynen M. Accuracy of computer-aided implant placement. *Clin Oral Implants Res.* oct 2012;23 Suppl 6:112–23.
40. 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 Suppl: 25–42.
41. Raico Gallardo YN, da Silva-Olívio IRT, Mukai E, Morimoto S, Sesma N, Cordaro L. Accuracy comparison of guided surgery for dental implants according to the tissue of support: a systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Implants Res.* mai 2017;28(5):602–12.
42. Arisan V, Karabuda ZC, Ozdemir T. Accuracy of two stereolithographic guide systems for computer-aided implant placement: a computed tomography-based clinical comparative study. *J Periodontol.* janv 2010;81(1):43–51.
43. Van Assche N, Quirynen M. Tolerance within a surgical guide. *Clin Oral Implants Res.* 1 avr 2010;21(4):455–8.
44. Cassetta M, Giansanti M, Di Mambro A, Stefanelli LV. Accuracy of positioning of implants inserted using a mucosa-supported stereolithographic surgical guide in the edentulous maxilla and mandible. *Int J Oral Maxillofac Implants.* oct 2014;29(5):1071–8.
45. Vercruyssen M, Cox C, Coucke W, Naert I, Jacobs R, Quirynen M. A randomized clinical trial comparing guided implant surgery (bone- or mucosa-supported) with mental navigation or the use of a pilot-drill template. *J Clin Periodontol.* juill 2014;41(7):717–23.
46. Tahmaseb A, Wu V, Wismeijer D, Coucke W, Evans C. The accuracy of static computer-aided implant surgery: A systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Implants Res.* oct 2018;29 Suppl 16:416–35.

47. Younes F, Cosyn J, De Bruyckere T, Cleymaet R, Bouckaert E, Eghbali A. A randomized controlled study on the accuracy of free-handed, pilot-drill guided and fully guided implant surgery in partially edentulous patients. *J Clin Periodontol*. 2018;45(6):721–32.
48. Cushen SE, Turkyilmaz I. Impact of operator experience on the accuracy of implant placement with stereolithographic surgical templates: an in vitro study. *J Prosthet Dent*. avr 2013;109(4): 248–54.
49. Wismeijer D, Joda T, Flügge T, Fokas G, Tahmaseb A, Bechelli D, et al. Group 5 ITI Consensus Report: Digital technologies. *Clin Oral Implants Res*. oct 2018;29 Suppl 16:436–42.
50. Katsoulis J, Katsoulis K. Duration of implant surgery comparing free-hand and template-guided approaches. A controlled study. *Clinical Oral Implants Research*. 2018;29(S17):389–389.
51. Younes F, Eghbali A, Bruyckere TD, Cleymaet R, Cosyn J. A randomized controlled trial on the efficiency of free-handed, pilot-drill guided and fully guided implant surgery in partially edentulous patients. *Clinical Oral Implants Research*. 2019;30(2):131–8.
52. Eriksson AR, Albrektsson T. Temperature threshold levels for heat-induced bone tissue injury: a vital-microscopic study in the rabbit. *J Prosthet Dent*. juill 1983;50(1):101–7.
53. Frösch L, Mukaddam K, Filippi A, Zitzmann NU, Kühl S. Comparison of heat generation between guided and conventional implant surgery for single and sequential drilling protocols—An in vitro study. *Clinical Oral Implants Research*. 2019;30(2):121–30.
54. Vercruyssen M, Hultin M, Van Assche N, Svensson K, Naert I, Quirynen M. Guided surgery: accuracy and efficacy. *Periodontol 2000*. oct 2014;66(1):228–46.
55. <https://www.cidj.com/metiers/chirurgien-dentiste-chirurgienne-dentiste>
56. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichIDCC.do?idSectionTA=KALISCTA000005695623&cidTexte=KALITEXT000005649140&idConvention=KALICONT000005635655>

Liste des figures

1.1 : Tintin et le Lac aux requins. [film]. France: Associated Artists; 1972.

1.2 : https://formlabs.com/media/upload/_thumbs/Graphic_1_1-01_copy.png.1790x0_q80_crop-smart.png

1.3 : https://formlabs.com/media/upload/_thumbs/SLA-v-DLP-process-graphic.jpg.1790x0_q80_crop-smart.jpg

1.4 : Polyjet technology applications for rapid tooling - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-PolyJet-printing-process_fig1_318112255 [accessed 4 Apr, 2019]

1.5 https://www.photonics.com/images/Web/Articles/2006/10/1/LZH_Fig1.jpg

1.6 : <https://blog-assets.pinshape.com/blog/wp-content/uploads/2016/06/30082638/SLS1.jpg>

1.7 : <http://www.arcam.com/wp-content/uploads/schematic-ebm-setup.jpg>

1.8 : https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-3DP-process_fig1_228987139

1.9 : <https://blog-assets.pinshape.com/blog/wp-content/uploads/2016/06/30082523/FDM1.jpg>

1.10 : https://www.3dnatives.com/wp-content/uploads/DSC_9818.jpg

1.11 : réalisation personnelle

1.12 : <http://www.lego.com>

1.13 : <https://www.makershop.fr/filament-pet/313-pet-taulman-3d-t-glase-bleu-175mm.html>

1.14 : <https://www.makershop.fr/filament-pet/313-pet-taulman-3d-t-glase-bleu-175mm.html>

1.15 : <https://formlabs.com/materials/>

1.16 : <https://sinterex.com/wp-content/uploads/2018/09/blog1.jpeg>

1.17 : http://sinkhacks.com/wp-content/uploads/2014/04/JWE_0468.jpg

1.18 : <https://formlabs-media.formlabs.com/>

1.19 : <https://formlabs-media.formlabs.com/>

1.20 : <https://formlabs-media.formlabs.com/>

1.21 : https://www.voco.dental/fr/portaldata/1/resources/products/folders/gb/solflex-170_350_650_fol_gb.pdf

2.1 : réalisation personnelle

2.2 : réalisation personnelle

2.3 : réalisation personnelle

2.4 : réalisation personnelle

2.5 : <https://pocketdentistry.com>

2.6 : <https://www.etk.dental/fr/>

2.7 : Choi B-H. Implantologie flapless. Paris, France: Quintessence International; 2011. 332 p.

2.8 : <https://store.nobelbiocare.com/fr/fr/>

2.9 : http://ifu.straumann.com/content/dam/internet/straumann_ifu/brochures/152.753_low.pdf

2.10 : réalisation personnelle

2.11 : <https://biosummer3d.com/produit/douille-simple-d-300-d-200-l5/>

2.12 : <http://www.bredent-medical.com/fr/medical>

2.13 : <https://store.nobelbiocare.com/international/en/guided-drill-guide-rp-to-o-3-6-mm>

2.14 : réalisation personnelle (Exocad)

2.15 : réalisation personnelle d'après Younes et al.

2.16 : Younes F, Cosyn J, De Bruyckere T, Cleymaet R, Bouckaert E, Eghbali A. A randomized controlled study on the accuracy of free-handed, pilot-drill guided and fully guided implant surgery in partially edentulous patients. J Clin Periodontol. 2018;45(6):721–32.

3.1 : réalisation personnelle, d'après les informations disponibles sur <https://www.blueskyplan.com/exports>

4.1 : réalisation personnelle (Microsoft Excel)