



**UNIVERSITE PAUL SABATIER – TOULOUSE III  
FACULTE DE MEDECINE**

\*\*\*\*\*

**ANNEE 2014**

**N°**

**MEMOIRE  
POUR LE DIPLOME UNIVERSITAIRE  
D'IMPLANTOLOGIE CHIRURGICALE  
ORALE ET MAXILLO-FACIALE**

-----  
**Présenté et soutenu publiquement le 06/2014**

**A TOULOUSE**  
-----

**Par le Docteur Dalal El Moutawakkil  
Née le 30/ 05/ 1982**

**&**

**Par le Docteur Nabil Hacib  
Né le 11/04/ 1975 Au Maroc**  
-----

**Planification implantaire 3D et réalisation de guide chirurgical  
Avec des solutions open source**

**PRESIDENT : Monsieur le Professeur F. BOUTAULT**

**VICE PRESIDENT : Monsieur le Docteur J. PERISSE**

**ASSESEURS : Monsieur le Docteur J. BALLESTER  
Madame le Docteur H. BOUZEKRI ALAMI  
Monsieur le Docteur F. RAMOUL  
Madame le Docteur J. VALETTE MIFSUD  
Monsieur le Docteur Y. LAALOU**

**DIRECTEUR DE MEMOIRE : Monsieur le Docteur J. PERISSE**

**ANNEE** : 2014

**NOM ET PRENOM DE L'AUTEUR** : Nabil Hacib & Dalal El Moutawakkil

**DIRECTEUR DU MEMOIRE** : Monsieur le Docteur J. PERISSE

**TITRE DU MEMOIRE** : Planification implantaire 3D et réalisation de guide chirurgical  
Avec des solutions open source

**Résumé en français :**

Le développement des procédés d'acquisitions radiologiques, et des algorithmes de segmentation, permet d'aboutir à des reconstructions 3D plus précises.

L'Open Dental CAD (ODC) est un Add-on, Plug-in qui regroupe une collection d'outils open source écrits pour étendre les fonctionnalités de Blender. Ce script inclut des fonctions pour simplifier de nombreuses tâches de modélisation dentaire 3D, de planification implantaire et de conception de guide chirurgicaux. Il comprend également des modules pour faciliter la conception de prothèses dentaires.

L'utilisation de solutions open source offre aussi la possibilité de profiter d'une intelligence collective (développement, relecture du code, rédaction de documentation...), le tout avec un coût réduit.

La démocratisation de l'impression 3D grâce à l'open source ainsi que le développement des matériaux, permettent de repenser entièrement les modes de production des guides chirurgicaux et allègent le flux de travail.

**RUBRIQUE** : IMPLANTOLOGIE

**MOTS-CLES** :

- Segmentation, alignement, planification implantaire, guide chirurgical, guide radiologique
- chirurgie guidée, Meshlab, InVesalus, ITKsnap, Osirix, Blender, Open Dental CAD,
- meshes, CFAO, Add-on, maillage, 3D, Plug-in, scanner 3D, Cone Beam.
- Impression 3D, prototypage stéréolithographie, projet prothétique virtuel, Open Source,
- logiciel gratuit, script, chirurgie guidée.

# Remerciements

Ce travail a été le labeur d'une année intensive en 3D et n'aurait probablement jamais été mené à terme sans le soutien d'un grand nombre de personnes que nous tenons à très sincèrement remercier.

Nous commençons tout d'abord par remercier Dr Jean Perissé qui a été le premier à nous encourager d'aller dans cette voie pour explorer ses multiples possibilités.

Nous dédions aussi ce travail à Dr Thierry Lelièvre Alias Béotien qui nous a permis de faire partie de l'équipage de Be Open Plan, ton cadeau de Béotien nous a permis de découvrir le monde merveilleux de la 3D.

Nous tenons aussi à remercier Patrick Moore pour L'open Dental CAD, qui nous a permis de faire de la CFAO gratuitement, merci de l'avoir créé, merci de l'avoir développé, et surtout merci pour l'avoir mis en open source, ta générosité n'a d'égal.

Nous adressons nos remerciements à la communauté de Be-open Plan dans le forum Eugenol, nous citons entre autre : Marc-André; sans tes tutoriels l'usage d'Itk –snap n'aurait été possible, Jeff, Carambar, Ceel, Clio, Damdam, Inset, Esox, Growler, Horizon, Jeamba, PurEco, l'Adan, Oxibus, Pluton, Victorn et bien sur Béotien et Patmo141. Avec à vous les mots partage et générosité ont pris tous leurs sens. Merci pour cette belle leçon d'intelligence collective, merci pour cette belle aventure.

Sans oublier nos parents, frères et sœurs qui nous ont accompagnés tout au long de ce chemin et qui n'ont pas cessé de nous soutenir moralement et de nous encourager.

Ne pouvant malheureusement pas citer toutes les personnes que nous avons rencontrées durant notre parcours et qui ont contribué d'une façon ou d'une autre, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail, nous leur disons à toutes merci.

# **Plan**

## **Introduction**

## **I/ L'Open Source**

### **1/ Terminologie**

### **2/ Historique**

### **3/ Philosophie de l'open source**

## **II/ Flux de travail proposé**

## **III/ Segmentation et conversion en STL**

### **1/ Définition**

### **2/Classification selon la nature**

### **3/ Les différents logiciels de segmentation open source**

#### **3-1/ InVesalus**

#### **3-2/ Osirix :**

#### **3-3/ MiaLite**

#### **3-4/ ITK-Snap**

## **IV/ Nettoyage des segments 3D**

## **V/ L'alignement des coordonnées des objets 3D**

## **VI/ Planification du plan de traitement**

### **1/ Le Logiciel Blender**

### **2/ Principaux plug-ins**

### **3/ Le plug-in Open Dental Cad**

### **4/ La Visualisation 3d**

### **5/ L'inversion de la transparence et de la visibilité**

### **6/ Le découpage 3d**

### **7/ Mesure d'angles et de distances**

## **8/ La virtualisation du projet prothétique**

### **8-1/ Projet prothétique analogique**

### **8-2/ Projet prothétique numérique**

### **8-3/ Projet prothétique numérisé**

### **8-3-1/ Les moyens de la numérisation du projet prothétique :**

#### **A/ Par Imagerie numérique scanner ou cône beam**

#### **B/ Par scanner optique**

## **9/ Placement des implants et des piliers**

### **9-1/ La bibliothèque d'implants**

**9-2/ Le positionnement des implant**

**9-3/ Le choix des piliers**

**10/ La détection de collision**

**11/ Le comblement de sinus**

**12/ Le comblement de défauts osseux**

**13/ Les extractions virtuelles**

**14/ L'accessibilité et l'ouverture**

**15/ Le rapport du projet**

**VII/ la chirurgie guidée : le guide chirurgical**

**1/ Classification des guides chirurgicaux**

**1-1/ Le guide chirurgical à appui muqueux :**

**1-2/ Le guide chirurgical à appui dento-muqueux :**

**1-3/ Le guide chirurgical à appui osseux :**

**2/ Conception du Guide chirurgicale avec L'Open Dental Cad**

**2-1/La gouttière ou la base du guide**

**2-2/ les cylindres guides**

**2-3/ Trou de perçage (inner cylinder)**

**2-4/ L'édition du guide**

**2-5/ Les bagues chirurgicales ou sleeves**

**2-6/ Forets**

**3/ Guides chirurgicaux personnalisés**

**4/ L'export STL**

**5/ Le Bio-modèle ou modèle anatomique**

**VIII/ Impression 3D**

**1/ Le modelage par dépôt de matière en fusion**

**2/ Impression par injection de matière**

**2-1/ Impression par injection de cires**

**2-2/ impression par injection de résines**

**3/ Stéréolithographie**

**4/ Frittage laser sélectif**

**5/ Les matériaux d'impression**

**CONCLUSION**

**BIBLIOGRAPHIE**

## **Introduction**

L'implantologie assistée par ordinateur est une discipline alliant les possibilités de l'informatique et celles de la chirurgie implantaire.

Après avoir investi le champ de la prothèse sous la forme de la conception et la fabrication assistées par ordinateur (CFAO, en anglais CAD-CAM, computer-aided design and computer-aided manufacturing), l'informatique propose son aide à l'implantologie dans la planification, l'exécution du geste chirurgical et dans la préparation d'une prothèse de temporisation réalisée avant l'acte chirurgical.

L'utilisation de solutions open source permet une maîtrise du code source avec la possibilité d'avoir un effet moteur sur le projet, pour le faire aller dans le sens désiré en fonction des besoins des praticiens. Elle offre aussi la possibilité de profiter d'une intelligence collective (développement, relecture du code, rédaction de documentation...), le tout avec un coût réduit.

L'impression 3D considérée par certains comme la prochaine révolution industrielle, est entrain d'envahir le domaine médical, en ouvrant de nouvelles perspectives à l'implantologie. Avec le développement des procédés et des matériaux, l'impression 3D allège le flux de travail et révolutionne l'acte implantaire.

## **I/ L'Open Source**

### **1/ Terminologie**

- Le code source est un texte qui représente les instructions à exécutées par un microprocesseur. Il se matérialise sous la forme d'un fichier texte écrit dans un langage de programmation pouvant être édité, lu, et modifié par un informaticien
- Un logiciel libre, ou logiciel open source, est un programme dont le code source est distribué et peut être utilisé, copié, étudié, modifié et redistribué sans restriction.

### **2/ Historique**

Les ordinateurs des années 1960 étaient livrés avec des logiciels accompagnés de leurs sources que les clients pouvaient modifier et étendre. En effet Il aurait été impossible de vendre un ordinateur sans son logiciel d'accompagnement, et la plupart des clients estimaient trop aléatoire de faire fonctionner un logiciel dont ils ne pouvaient vérifier les caractéristiques internes.

C'est dans les années 70 que la pratique de ne pas diffuser les codes source des programmes s'est répandue. On pourrait retenir comme date marquante de la scission entre le logiciel libre et le logiciel propriétaire la réunion du *Homebrew Computer Club*, en 1976. Lors de cette réunion, Bill Gates et Paul Allen présentent un programme interpréteur de langage Basic. Les membres du club ont dupliqué et diffusé la bande perforée (disquette) représentant le programme. Bill Gates, furieux, écrira une lettre devenue fameuse, intitulée Lettre Ouverte aux Hobbyist [11], dans laquelle il explique que le travail des développeurs doit pouvoir être justement rémunéré, et que s'il ne l'est pas, c'est l'innovation qui sera étouffée. Le raisonnement était juste, et pourtant l'avenir montrera qu'il est également possible de réaliser de grands programmes en open source.

Le Logiciel Libre, en tant qu'idée politique, a été popularisé par **Richard Stallman** depuis 1984, année où il a créé la *Free Software Foundation* et son projet **GNU**. La prémisse de M. Stallman est que tout le monde devrait jouir de plus de liberté, et savoir apprécier cette dernière. Il a mis sur pied un ensemble de droits dont il estimait que tout utilisateur devait pouvoir en jouir, et les a codifiés au sein de la licence publique générale **GNU**, ou **GPL**.

M. Stallman a intitulé, non sans malice, cette licence **Copyleft** (gauche d'auteur). Ce terme est un double jeu de mots faisant référence au Copyright traditionnel, car au lieu d'interdire, elle donne le droit de copier [34].

### 3/ Philosophie de l'open source

#### Une liberté fondamentale

Pour Richard Matthew Stallman, le père de la Free Software Foundation (1985), le logiciel libre est avant tout une affaire de liberté. La liberté que doit avoir chaque individu d'utiliser, modifier, et redistribuer n'importe quel programme. Une liberté aussi fondamentale que la liberté d'expression et indissociable d'autres valeurs, d'éthique et de responsabilité sociale.

Dans cette logique, un logiciel non libre, « propriétaire », porte atteinte à cette liberté fondamentale. Le logiciel propriétaire est « privé » dans le sens où il prive de liberté, et il est dans ce sens intolérable. Le logiciel libre n'est donc pas une simple alternative, et encore moins le choix d'un business model parmi d'autres. Stallman, a créé un mouvement de pensée profonde, où la liberté va de pair avec des valeurs de droit, de solidarité sociale et d'entraide [34].

#### Gratuité

Donc dans la pratique, il faut retenir qu'*un logiciel open source est bel et bien gratuit*, d'acquisition comme d'utilisation, du point de vue de sa licence. Cela n'empêche pas qu'il soit accompagné d'une offre de services payants : intégration, support, formations, développements complémentaires, voire même assurance juridique [34].

Tous les logiciels utilisés pour aboutir à une planification implantaire et à la conception de guide chirurgical présentés dans ce travail sont open source.

## **II/ Flux de travail proposé**

Après l'élaboration et la validation du projet prothétique, le praticien procède à sa virtualisation et sa transposition à la planification implantaire. La virtualisation se fait par guide radiologique ou bien grâce un scan optique du projet prothétique analogique. L'examen radiologique 3D est effectué. Les fichiers DICOM obtenus sont segmentés en structures 3D isolées (os, nerf, gencive, dents, guide radiologique...) ces structures 3D seront ensuite nettoyées, alignées aux fichiers issus du Scanner optique, et importées dans le logiciel de modélisation 3D.

Dans ce dernier la planification démarre par la définition du projet prothétique virtuel, à la lumière duquel les implants seront positionnés. Une fois le positionnement validé, on procède à l'édition du guide chirurgical selon le support souhaité (muqueux, dentaire ou osseux).

A ce stade rien n'empêche le praticien de paralléliser les piliers implantaires et de concevoir la prothèse immédiate. Finalement, le guide chirurgical, le bio-modèle et la prothèse immédiate peuvent être exportés sous format STL, pour être imprimés en 3D, dans des centres d'usinage ou bien chez le praticien s'il dispose de l'outillage nécessaire.

Dans ce flux de travail le praticien peut s'arrêter au niveau de la chaîne numérique là où il le désire, c'est à dire de manière précoce au niveau de la segmentation en éditant un bio-modèle sur lequel il peut reconnaître son environnement chirurgical et simuler sa chirurgie. Comme il peut passer à la phase de planification et s'y arrêter, ou bien progresser vers la conception du guide chirurgical. Pour aboutir au tout numérique avec la conception de la prothèse immédiate en amont, pour les praticiens les plus experts. Figure 1.

## **III/ Segmentation et conversion en STL**

En imagerie médicale 3D qu'il s'agisse de la tomodensitométrie, du cone beam ou de l'imagerie par résonance magnétique, l'analyse visuelle et l'exploitation d'une grande quantité de données généralement sous forme d'une succession d'images, reste très difficile et requiert une grande dépense de temps et une bonne dextérité intellectuelle. Le praticien doit mentalement empiler les coupes pour se faire une représentation du volume des données observées. Cela conduit à une interprétation subjective des données.

L'informatique a permis d'optimiser l'exploitation des données radiologiques et a ouvert d'autres perspectives d'applications. Dans ce qui suit, nous allons survoler, d'une manière succincte, les différents logiciels de conversion STL et de segmentation de l'imagerie médicale couramment utilisées, après avoir évoqué quelques notions élémentaires sur ce principe de segmentation.



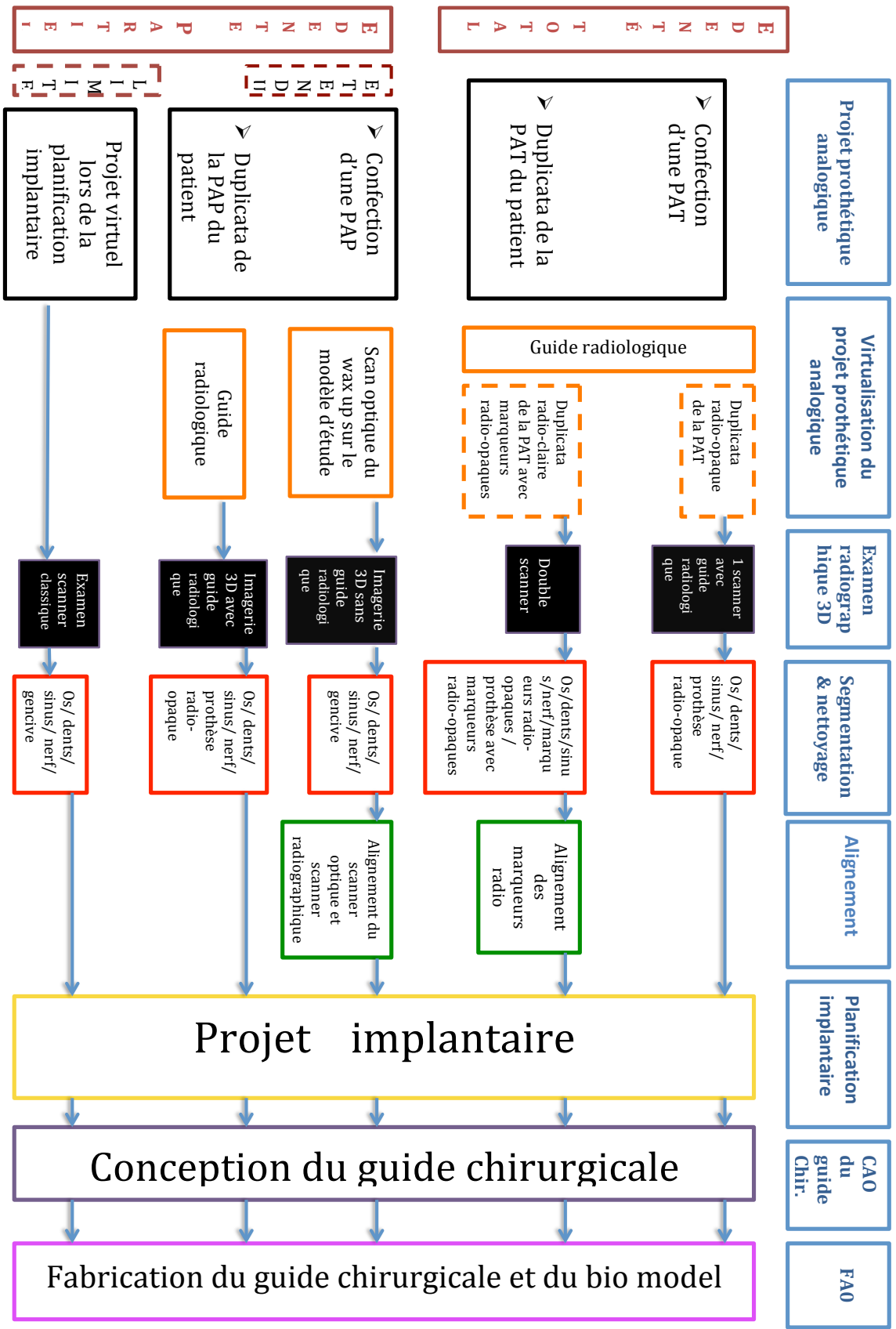


Figure 1 : Flux de travail proposé

## 1/ Définition

Classiquement, on peut définir la segmentation comme étant une partition d'une image  $I$  en un nombre  $N$  de sous-ensembles  $R$  appelés régions, homogènes dans le sens où chaque pixel doit être affecté à un niveau de gris, avec interconnexion des pixels appartenant à la même classe de gris.

Dans notre projet la segmentation consiste au découpage spatial des images en objets 3D sur lesquels vont porter la planification (Os, Dents, Nerf, Sinus, Gencive).

La segmentation a pour objectif de permettre l'exploitation du contenu numérique de l'image pour l'interprétation, le diagnostic, la planification, la reconnaissance et le contrôle robotique ainsi que le contrôle qualité et le suivi thérapeutique [8].

## 2/ Classification selon la nature

À ce jour, il existe de nombreux procédés de segmentation d'image, que l'on peut regrouper en quatre principales classes [8] :

- La segmentation fondée sur les régions ; elle correspond aux algorithmes d'accroissement de régions.
- La segmentation fondée sur les contours
- La segmentation fondée sur la classification ou le seuillage des pixels en fonction de leur intensité [7].
- La segmentation fondée sur la coopération entre les trois premières techniques, souvent utilisée en imagerie médicale [27].

Au milieu de ce spectre de techniques très large, qui peut aller d'une technique manuelle tranche par tranche jusqu'aux techniques automatiques qui intègrent des connaissances préalables sur la forme et l'intensité des structures d'intérêt, se trouvent des approches semi-automatiques (ITK, MiaLite, 3D slice) qui combinent haute efficacité, précision et reproductibilité avec une expertise et un contrôle de qualité qui ne peut venir que de la surveillance humaine.

Malgré les progrès de la segmentation automatique, de nombreux laboratoires de recherche bio-médicale s'appuient toujours sur la délimitation manuelle. Cette réticence à accepter l'automatisation peut être dû à une insuffisance de fiabilité.

Si on s'intéresse à la dimensionnalité on peut répartir la segmentation en deux groupes : la segmentation 2D et la segmentation 3D. La méthode de segmentation 2D vise à définir la région d'intérêt sur toutes les coupes séparément, sans tenir compte de la différence des résultats obtenus entre les coupes. La reconstruction 3D se fait par empilement des différentes coupes, ce qui forme un volume d'intérêt (qui est donc constitué par la superposition des régions d'intérêt). Ce type de segmentation offre des résultats relativement satisfaisants, cependant l'un de ces inconvénients est qu'il ne prend pas l'interaction spatiale exprimé par les pixels le long de la troisième dimension, ce qui peut conduire à une reconstruction d'un volume non homogène. Ce problème a été contourné en partie grâce à une exploitation de l'information volumique de l'organe initialement observé.

### **3/ Les différents logiciels de segmentation open source**

Il existe un bon nombre de logiciels gratuits et ouverts de segmentation, fonctionnant sur les différentes plateformes (Windows, Linux, MacOS), permettant tous à quelques différences près les fonctions suivantes [32]:

- La segmentation
- La délimitation manuelle des régions anatomiques d'intérêt,
- La visualisation 2D selon des Slicing View
- La reconstruction 3D volumique et surfacique
- La conversion des reconstructions surfaciques au format STL
- La possibilité d'intégrer des fonctions supplémentaires grâce à l'adjonction de plug-ins

Ces logiciels sont disponibles sous des codes ouverts en vertu desquels il n'existe aucune exigence de réciprocité, et de très rares restrictions sur l'utilisation, par contre aucune garantie de performance, sauf la version certifiée de Osirix par la FDA.

#### **3-1/ InVesalius**

Le nom du logiciel est un hommage au médecin Belge Andreas Vesalius (1514-1564), considéré comme le père de l'anatomie moderne.

InVesalius a été développé depuis 2001 au CTI (Renato Archer Technology of Information Center) un institut Brésilien de recherches scientifiques et technologiques, pour assister les demandes des hôpitaux brésiliens publics, afin de promouvoir l'inclusion sociale des personnes ayant des malformations faciales graves. Toutefois, il a été utilisé dans divers domaines ; la dentisterie, la médecine, la médecine vétérinaire, la paléontologie, l'anthropologie et la recherche. InVesalius est disponible gratuitement sur la page d'accueil du portail Brésilien publique dédié au logiciel [39] figure 2.

#### **3-2/ Osirix :**

Développé par deux radiologues genevois, le Dr Antoine Rosset et le Dr Osman Ratib, dans le but de s'affranchir des solutions commerciales onéreuses. Il fonctionne uniquement sur la plateforme Macintosh [35].

Ce logiciel régulièrement mis à jour est devenu de plus en plus performant. Il est actuellement utilisé dans de nombreux centres de recherches ou hôpitaux dans le monde [35].

Il permet, en plus, la fusion d'image 4D et l'endoscopie virtuelle 5D par rapport à ses analogues. C'est le logiciel qui compte le plus de disponibilité de plug-in [2-35] figure 3.

### **3-3/ MiaLite**

MiaLite apporte des outils de segmentations plus intelligents à la clinique grâce à l'utilisation d'un nouveau Algorithme de niveaux de surface. En comparaison avec ses homologues il est environ 10 à 50 fois plus rapide sans perte de précision de la segmentation [6].

Il est maintenant intégré à Osirix sous forme de plugin gratuit. Il permet d'envoyer directement les données d'image de MiaLite à OsiriX.

Cependant il ne permet pas encore l'enregistrement des coordonnées spatiales entre les différents segments issus de la même acquisition. Ceci se traduit par une orientation arbitraire des différents organes STL segmentés sur les logiciels CAO, figure 4.

### **3-4/ ITK-Snap**

ITK fournit des outils à la fois manuels, semi-automatiques et automatiques pour la délimitation des structures anatomiques [12-23],

Il a été développé en premier lieu par une équipe sous la direction de Guido Gerig professeur à l'Université de Caroline du Nord à Chapel Hill. Actuellement son développement est géré par Paul Yushkevich aidé par Hui Zhang dans le Laboratoire d'Informatique et de la Science d'image de l'Université de la Pennsylvanie. Le logiciel dispose d'une bibliothèque de vidéos tutorielles sur son site internet [40].figure 5

## **IV/ Nettoyage des segments 3D**

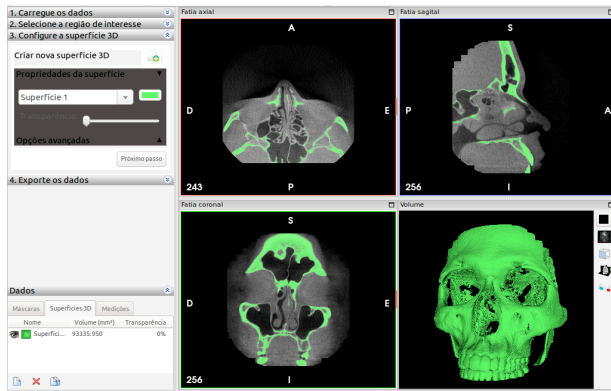
Après la segmentation des images radiographiques, le nettoyage du maillage est nécessaire pour aboutir à des modèles 3D propres, car les défauts de segmentation ainsi que les artefacts métalliques, altèrent les reconstitutions 3D.

En effet Il est difficile de segmenter séparément une structure anatomique nette, sans qu'elle soit accompagnée d'un nombre important de débris des autres structures voisines Figure 6, 7 et 8.

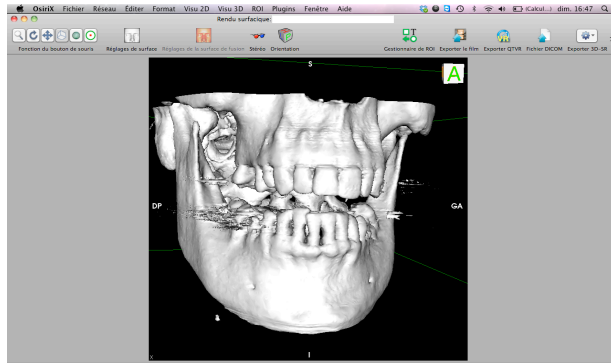
Quand aux prothèses comportant du métal, elles s'expriment après la conversion en STL par les des bandes blanches, situées strictement à la hauteur des couronnes du fait de l'orientation du faisceau, généralement parallèle au plan occlusal.

Ces artefacts de couronnes prothétiques sont cependant peu ou pas gênants en implantologie car ils se situent à distance de la crête osseuse et des procès édentés et se traduisent en reconstruction 3D par une projection de meshes centripètes ou centrifuges sous forme d'un plan horizontal facilement nettoyable.

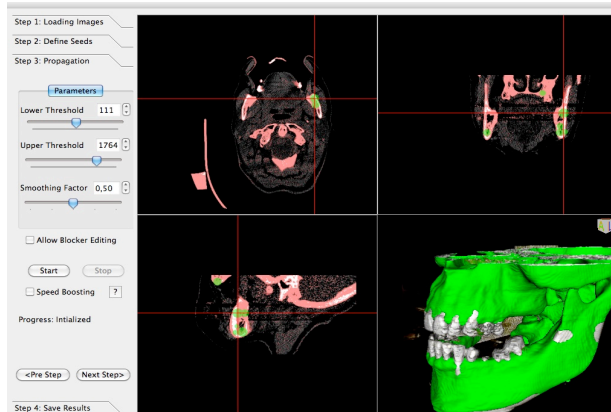
Nous effectuons le nettoyage de ces altérations de maillage grâce au logiciel MeshLab. C'est est un logiciel libre de traitement de maillage 3D. Il à été développé par l'Institut des Sciences et Technologies d'Informations en Italie et le Conseil national Italien de la recherche depuis 2005, il fournit un outil généraliste pour la manipulation et l'édition de modèles 3D conséquents, provenant de scans 3D [1-39-21].



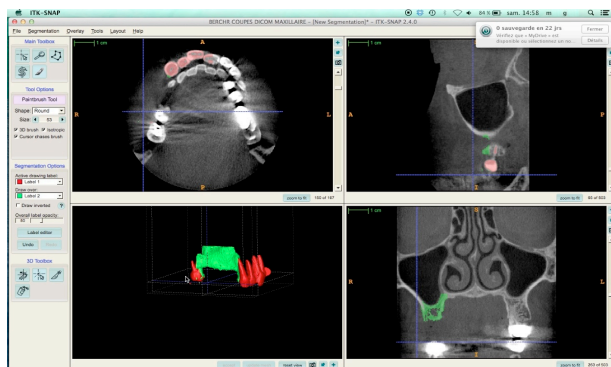
**Figure 2 : interface InVesalius**



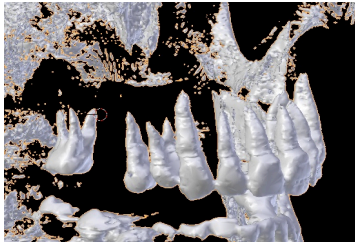
**Figure 3 : Interface de Osirix**



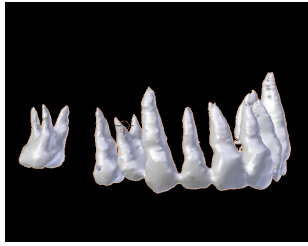
**Figure 4 : Interface de MiaLite**



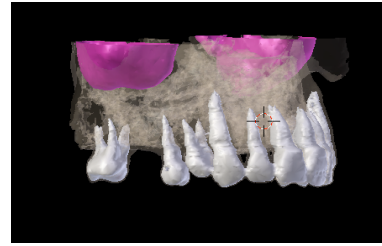
**Figure 5 : Interface de ITK-Snap**



**Figure 6 : Débris autour des dents segmentées**



**Figure 7 : Dents après Nettoyage**



**Figure 8: Dents, Sinus et l'Os en mode transparent**

Il propose différents filtres de nettoyage du maillage (suppression des vertex non référencés par exemple), des outils de re-maillage (simplification, subdivision, reconstruction de surfaces...) et des fonctions de suppression de bruits (adoucissement, etc...).

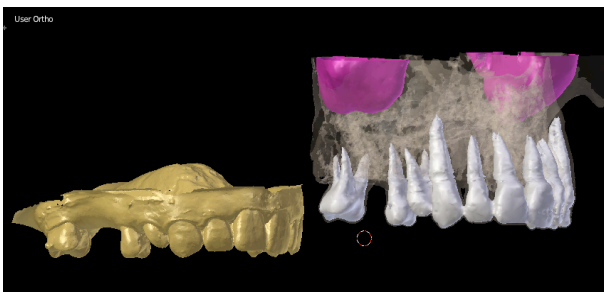
Il est disponible sous différentes plates-formes, dont Windows, Linux et Mac OS X. MeshLab est utilisé dans de nombreux domaines de recherche universitaires, tels que la microbiologie, la gestion du patrimoine culturel, la reconstruction de surfaces, et maintenant en dentisterie dans le nettoyage des artefacts radios et alignement des modèles [1].

## **V/ L'alignement des coordonnées des objets 3D**

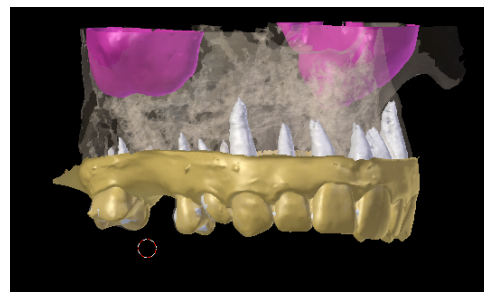
L'alignement consiste en une création de coordination entre les maillages anatomiques issus de la segmentation (Os, Dents...) et d'autre maillages issus d'un autre scannage (scanner optique de l'arcade ou scanner radio du guide radiologique utilisé dans la méthode du double scanner)

La coordination se doit d'être la plus précise possible surtout dans la réalisation d'un guide dento-muqueux, où nous réalisons un alignement des coordonnées des données du scanner radiographique avec celles du scanner optique

Nous effectuons l'alignement sur le logiciel MeshLab grâce à la combinaison entre un travail manuel de correspondances d'un minimum de 3 points, et la fusion automatique des maillages pour réduire la marge d'erreur [1-21].



**Figure 9: Position aléatoire du maillage du Scanner Optique par rapport aux autres structures segmentées**



**Figure 10: Coordination des structures après alignement sur MeshLab**

## **VI/ Planification du plan de traitement**

La planification de cas se fait dans le logiciel Blender grâce au Plug-in Open Dental Cad. Elle débute par l'import des structures segmentées sous le format STL (os, dents, sinus, nerf dentaire inférieur, trou palatin...etc). Avec l'habitude, la visualisation 3D des éléments squelettiques devient rapide. La reconnaissance des sites à traiter procure une assurance et une sécurité accrue dans le geste chirurgical.

### **1/ Le Logiciel Blender**

Blender est un logiciel libre de modélisation, d'animation et de rendu 3D. Il est disponible dans de nombreuses langues, sur plusieurs plates-formes telles que Microsoft Windows, Mac Os X, GNU/Linux. De plus, c'est un programme extensible (ajout de scripts) à l'aide du langage Python.

Le 18 juillet 2002, Ton Roosendaal parvint à négocier le rachat des droits d'auteur de Blender contre 100 000 euros, en vue de la création d'une fondation Blender et de la diffusion du logiciel sous la licence libre GPL. En moins d'une semaine, la communauté des utilisateurs avait déjà rassemblé près de la moitié de la somme. Et le 7 septembre, tomba l'annonce de l'ouverture du code de Blender, supervisé par la Fondation Blender. Son passage à l'Open Source lui a donné un élan très important. Il se transforme continuellement grâce à l'enthousiasme de l'équipe de développeurs, et il n'est pas rare de voir apparaître des fonctionnalités importantes en quelques jours seulement [30].

### **2/ Principaux plug-ins**

La relation de longue date avec le langage Python a permis de constituer une importante base de greffons (*plug-in*) qui ont fait de Blender un véritable logiciel de conversion de formats. Ces outils ont été écrits par des auteurs aussi enthousiastes que bénévoles. Bon nombre d'entre eux sont regroupés et distribués dans un paquet qui accompagne actuellement le logiciel [30].

### **3/ Le plug-in Open Dental Cad**

L'Open Dental CAD (ODC) est un Add-on, Plug-in ou greffon qui regroupe une collection d'outils open source écrits pour étendre les fonctionnalités de Blender. C'est un script open source de création dentaire 3D. Il inclut des fonctions pour simplifier de nombreuses tâches de modélisation dentaire 3D, de planification implantaire et de conception de guides chirurgicaux. Il comprend également des modules pour faciliter la conception de prothèses et de bridges dentaires [22].

L'open Dental Cad a été créé par Patrick Moore en 2011, alors étudiant en troisième de médecine dentaire à la faculté de Boston. Il a commencé à utiliser Blender en 2009. Le dessin des contours des couronnes unitaires grâce à l'open dental cad s'est fait entre janvier 2011 et mars 2011, celui des bridges en juin 2011, et celui des guides chirurgicaux en septembre de la même année. Il a réécrit la majorité du script en mai 2013 avec une amélioration nette de la qualité de l'architecture du guide chirurgical [22].

Destiné à la base aux universitaires, l'add-on a environ 50 utilisateurs occasionnels et des supporters dans 9 pays. A ce jour, c'est la seule solution open source de conception assistée par ordinateur en dentisterie [22].

Thierry Lelievre est le premier utilisateurs français de l'add-on, il a testé le module du guide chirurgical de l'Open dental Cad depuis octobre 2011. Il a élargi le cercle des utilisateurs de l'add-on grâce à la plate forme du forum eugenol.com, ou il a constitué en compagnie de Patrick Moore et d'autres utilisateurs de nationalités différentes une communauté appelée Be open Plan pour échanger, partager des tutoriels, tester et faire évoluer le plug-in en améliorant ses fonctionnalités [3].

La première rencontre de la communauté Be Open Plan a eu lieu le 27 janvier 2014 à Paris. L'add-on a été réécrit par Patrick Moore à plusieurs reprises soit pour apporter des améliorations soit pour s'adapter aux nouvelles versions de Blender [3-22].

L'Open Dental Cad comporte quatre principaux modules, un premier module relatif aux dents, un deuxième module relatif à la création de bridges, un troisième pour les implants, et un quatrième pour le guide chirurgical. Chaque module comporte des menus qui lui sont spécifiques [22].

## **4/ La Visualisation 3d**

La fenêtre de vue 3D permet de visualiser la scène selon n'importe quel point de vue, et cela en temps réel. De plus, elle permet d'éditer de manière totalement interactive la forme et certaines caractéristiques des objets. La vue 3D donne un aperçu du travail en cours. Il est évidemment possible de tourner autour des objets pour les voir sous plusieurs angles de manière interactive. L'objet peut être visualisé en vue normale (normal view) ou en vue de coupe selon les trois plans (slice view) [30].

## **5/ L'inversion de la transparence et de la visibilité**

Dans le logiciel Blender, on peut rendre le maxillaire 3D opaque ou transparent et alterner entre les deux. On peut inverser aussi la visibilité, c'est-à-dire rendre les masques 3D que l'on désire, visibles ou invisibles. Figure 11



## **6/ Le découpage 3d**

Le découpage 3D est un processus permettant de couper un objet 3D le long d'un plan (vestibulo-lingual ou axial) et de cacher ensuite la partie complète de l'objet d'un côté du plan. Cela permet de visualiser l'intérieur d'un objet. Grâce à cette technique, il est possible de mettre en place et de manipuler un implant dans un volume osseux. Figure 24

## **7/ Mesure d'angles et de distances**

Grâce à l'outil réglet/protracteur du logiciel Blender, il est possible de calculer des angles ou des longueurs, en manipulant des segments de droite librement tracés. Ceci est particulièrement utile pour des contrôles des axes dent-implant, des distances inter-implants, ou la distance entre l'extrémité d'un implant et le trajet d'un nerf.

## **8/ La virtualisation du projet prothétique**

La virtualisation du projet prothétique permet :

- de visualiser les volumes entre le sommet de la crête et la base des dents. Ceci est important pour déterminer le choix du type de prothèse : fixe ou amovible stabilisée, et l'utilisation ou non de fausse gencive sur la prothèse
- de déterminer la hauteur des tissus mous au dessus de la crête.

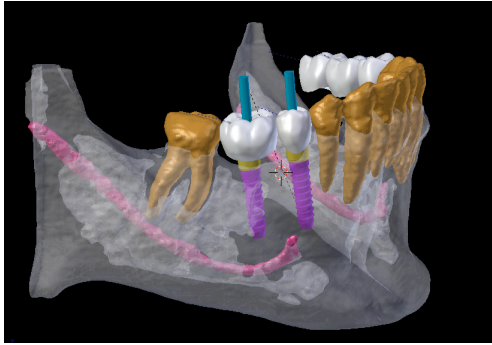
Selon le type d'endement, le projet prothétique peut d'être d'emblée numérique, ou bien il peut passer par des phases analogiques (laboratoire et clinique) avant d'être numérisé [15].

### **8-1/ Projet prothétique analogique**

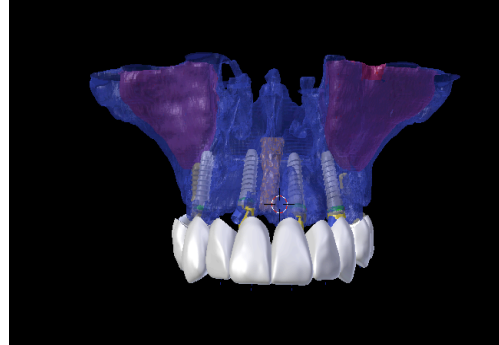
Lors de l'examen clinique pré-implantaire, des modèles d'étude sont réalisés. Sur ceux-ci, un projet prothétique est élaboré à partir d'un wax-up ou d'un montage directeur de dents prothétiques. Ce projet est confectionné en tenant compte de la position des dents, de leurs dimensions et des rapports intermaxillaires. Il préfigure ainsi la prothèse sur implant au niveau des dents absentes.

### **8-2/ Projet prothétique numérique**

Grace à la bibliothèque intégrée de dents, le plug-in Open Dental Cad permet de créer des dents virtuelles, permettant de positionner les implants en tenant compte de l'enveloppe prothétique. Le volume des dents virtuelles et leur positionnement dans les trois plans de l'espace sont délimités par les dents adjacentes. La situation la plus aisée étant la dent unitaire absente ; en effet, les dents adjacentes guident parfaitement la mise en place du projet prothétique virtuel. Le projet prothétique virtuel doit combler l'espace disponible au niveau de la zone à implanter. Figure 11



**Figure 11 : Projet prothétique numérique**



**Figure 12 : Projet prothétique numérisée à partir d'un guide radiologique**

### **8-3/ Projet prothétique numérisé**

La numérisation du projet prothétique analogique est nécessaire pour :

- Transposer les objectifs prothétiques au niveau de la planification et de les confronter aux volumes osseux disponibles.
- Créer virtuellement un projet qui tient compte des rapports intermaxillaires du patient dans les cas de l'édentement total. Figure 12

#### **8-3-1/ Les moyens de la numérisation du projet prothétique**

##### **A/ Par Imagerie numérique scanner ou cône beam**

Elle est réservée pour les cas de l'édentement étendu ou total où il est nécessaire d'établir les rapports inter-maxillaires, elle consiste à numériser le guide radiologique, de deux manières :

- Soit par la segmentation du guide radiologique radio-opaque conçu en disilicate de barium préfigurant la future prothèse
- Soit par la méthode du double scanner et superposition des points repères.

##### **\*\*La méthode du double scanner (NobelGuide®)**

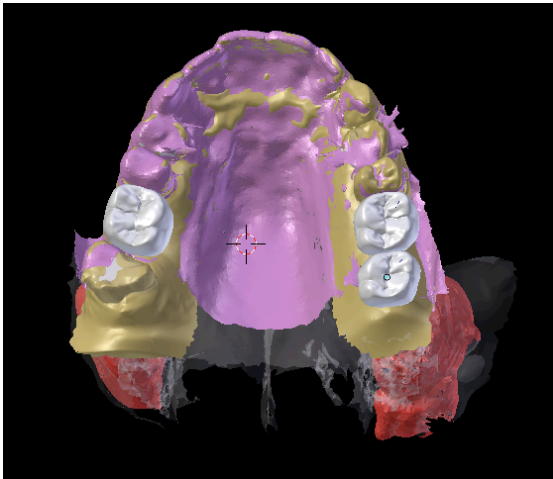
La spécificité du concept initialement introduit par NobelGuide® repose sur le principe d'un double scanner X. Le guide radiologique, dans cette utilisation précise, est fait en résine non radio-opaque mais Il comporte des marqueurs de gutta percha, au nombre de six à huit non alignés et ne figurant pas dans le même plan.

La densité du guide radiographique (définie en unités Hounsfield) est proche de celles des tissus mous, rendant donc compliquée la segmentation des données sur une image unique. La technique de double scannage permet de résoudre ce problème. La segmentation du guide radiologique devient facile grâce au deuxième scanner. La superposition ou l'alignement des marqueurs radio-opaques des deux scanners, permet de fusionner de manière précise les deux clichés [17].

## **B/ Par scanner optique**

Elle est réservée aux cas présentant un édentement partiel. Le wax up est scanné grâce un scanner optique, le nuage ou maillage obtenu est aligné à la planification en prenant comme repères les dents restantes.

Au final le projet prothétique numérique ou numérisé permet de s'affranchir du guide radiologique sauf pour les cas d'édentement totale. Dans ces cas le guide radiologique est utilisé à des fins de conversion numérique où il joue le rôle de virtualisation du projet prothétique. Figure 13



**Figure 13:** le modèle en plâtre scanné en jaune est aligné aux dents et à la gencive en rose.



**Figure 14 :** pilier personnalisé selon l'intrados de la prothèse

## **9/ Placement des implants et des piliers**

### **9-1/ La bibliothèque d'implants**

Les logiciels de planification implantaire possèdent une bibliothèque d'implants, soit d'un seul et même fabricant tel le NobelClinician®, soit de plusieurs fabricants, comme SimPlant®, EasyGuide® [10].

Le plug-in Open Dental Cad dans Blender permet l'intégration de bibliothèques d'implants, de plusieurs fabricants sans aucune limite. Dans le cas d'une planification implantaire seule, la marque de l'implant utilisée n'est pas d'une grande importance. Ce qui importe au praticien c'est la dimension et le diamètre de l'implant. Une bibliothèque « ouverte » et comprenant de nombreux fabricants est nécessaire lorsque l'on veut réaliser un guide chirurgical ou une mise en charge immédiate.

## 9-2/ Le positionnement des implant

Le positionnement des implants peut se faire de manière libre avec la commande *place implant*, ou en suivant l'axe prothétique avec la commande *place implant from crown*, ainsi l'implant se positionnera de façon optimale par rapport à l'axe prothétique de la dent qu'il remplace.

Selon le besoin du praticien l'implant choisi peut se positionner avec ou sans les piliers correspondants. Une fois placé, l'implant peut être visualisé immédiatement dans les trois plans de l'espace. L'utilisateur peut le faire pivoter, le déplacer, modifier ses dimensions (diamètre et longueur).

## 9-3/ Le choix des piliers

Le logiciel permet de choisir le pilier le plus adapté parmi une bibliothèque de piliers mais aussi de concevoir des piliers personnalisés sur mesure. Figure 14

Grâce au projet prothétique virtuel, le praticien peut anticiper les caractéristiques du pilier, en choisissant sa hauteur trans-gingivale et son degré d'angulation.

## 10/ La détection de collision

Un autre outil aussi intéressant est la détection des collisions. Avec le plug-in Open dental CAD dans Blender, il est possible de détecter les proximités entre deux implants et entre un implant et les structures anatomiques à éviter (sinus, nerf, dents... etc). Les valeurs numériques d'alerte sont paramétrables.

## 11/ Le comblement de sinus

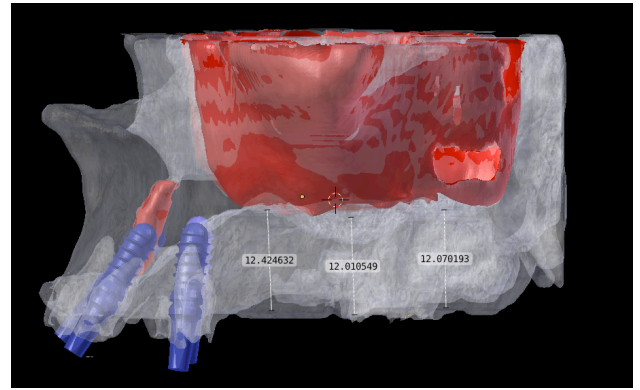
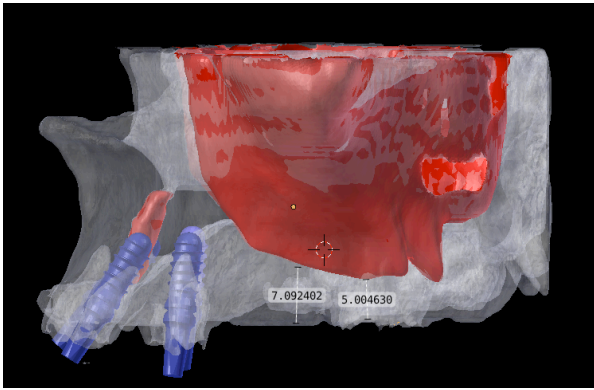
La simulation du sinus lift est possible avec le logiciel puisque le sinus devient un maillage modifiable. Ainsi le praticien peut repousser la membrane sinusienne dans les trois sens de l'espace, mesurer la quantité de déplacement de celle-ci et évaluer la qualité de son sinus lift ainsi que le rapport avec l'implant. Figures 15 et 16

## 12/ Le comblement de défauts osseux

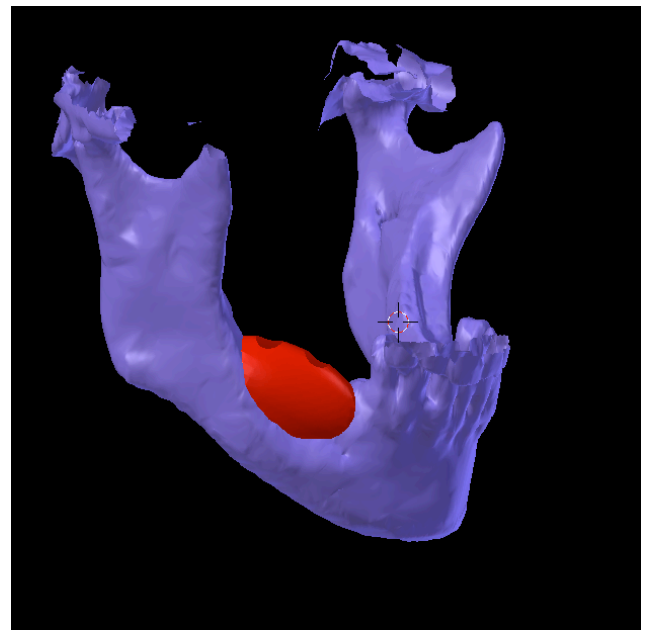
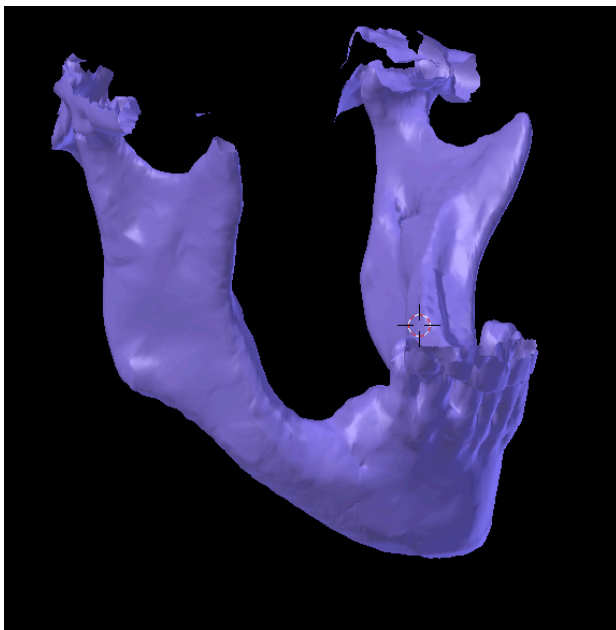
Blender permet d'effectuer un tracé de volume qui s'adapte à un maillage (objet). Ce volume représente la quantité de défaut osseux à combler. La visualisation en préopératoire du volume à réparer permet un choix plus précis et mieux raisonné de la technique d'augmentation, une anticipation des sites de prélèvement, la quantité de biomatériaux nécessaire, voire la faisabilité intrinsèque de cette augmentation. Cette option ouvre des perspectives d'impression 3D de greffons Figure 17 et 18.

## 13/ Les extractions virtuelles

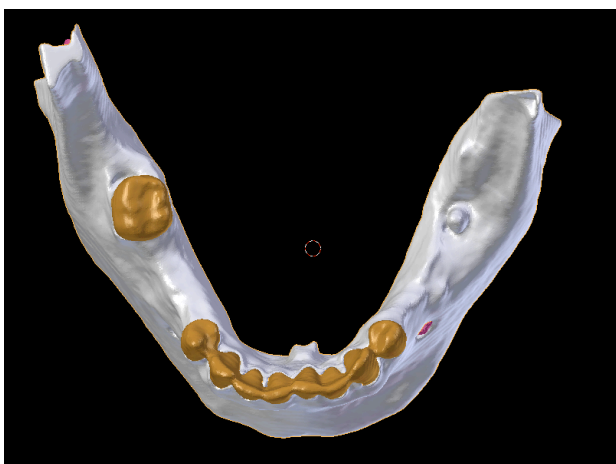
Dans les cas d'extraction implantation immédiate, la dent est toujours sur l'arcade lorsqu'on fait la planification. On simule virtuellement alors l'extraction de la dent en rendant invisible les dents segmentées; figures 19 et 20.



**Figures 15 et 16 : simulation du sinus lift**



**Figures 17 et 18: comblement de défauts osseux**



**Figures 19 et 20: extractions virtuelles**

## **14/ L'accessibilité et l'ouverture**

L'Open Dental Cad profite de l'avantage de l'open source, il est de ce fait compatible avec toutes les marques d'implants. De plus il permet l'import et l'export de formats ouverts dans un but d'interopérabilité, de telle sorte que les fichiers peuvent être exploités par d'autres logiciels 3D. En comparaison, le NobelClinician® est dit «fermé», il est uniquement réservé aux implants Nobel Biocare®, de plus l'export en format STL est payant dans tous les logiciels de planification implantaire, il s'agit d'un inconvénient majeur : le système rend le praticien captif de l'ensemble de la chaîne.

## **15/ Le rapport du projet**

Avec l'Open Dental Cad il est possible d'éditer un rapport du projet implantaire résumant les diamètres et les longueurs des implants utilisés, les diamètres des trous de forages, le diamètre des sleeves et des forets choisis pour tout projet implantaire [13].

## **VII/ la chirurgie guidée : le guide chirurgical**

Les premières générations de guides chirurgicaux stéréolithographiques nécessitaient une séquence de plusieurs guides consécutifs, chacun avec des cylindres de guidage de diamètre croissant. La difficulté majeure était d'ajuster chaque guide exactement à la même position. De nos jours, un guide unique est utilisé.

### **1/ Classification des guides chirurgicaux**

Il existe trois types de guides chirurgicaux (figure 31) en fonction de la base avec laquelle il entre en contact : le guide dentaire, muqueux et osseux. Ils sont réalisés « sur mesure » à l'anatomie du patient et vont permettre de reproduire la planification implantaire [13].

#### **1-1/ Le guide chirurgical à appui muqueux**

Il se pose directement sur la muqueuse et peut comporter des dents qui serviront de cales dans le sens vertical, pour verrouiller l'occlusion. Sa mise en place nécessite une clé d'occlusion et la pose de vis de contention afin d'assurer une bonne stabilité. Sa précision est inférieure au guide chirurgical à appui osseux, mais à l'avantage de ne pas nécessiter de lambeau périosté [13].

Sa réalisation demande une extrême rigueur notamment au niveau des empreintes. Dans ces situations, il n'est pas possible de s'affranchir d'une empreinte secondaire réalisée avec un porte-empreinte individuel. En effet, l'empreinte doit être précise et enregistrer le caractère mucostatique de la muqueuse péri-implantaire [13].

Lors de la chirurgie, une pression exagérée est à exclure car elle risque de déformer la muqueuse qui lui sert de soutien. Cela engendre donc un mauvais placement implantaire [13]. Figure 21

### **1-2/ Le guide chirurgical à appui dento-muqueux**

Pendant la chirurgie, le guide est positionné directement sur les dents présentes sur l'arcade. Il est indiqué dans les édentations partielles unitaires ou plurales, lorsqu'une chirurgie avec ou sans lambeau est souhaitée [13].

Lorsqu'il est utilisé, il est nécessaire d'envoyer au fabricant du guide chirurgical le modèle en plâtre de l'arcade du patient, afin qu'il le scanne et l'aligne aux informations de l'examen radiographique. En effet, du fait de la non-déformation des dents, le guide ne peut souffrir d'approximation et doit être le plus précis possible [13]. (Figure 21)

Lors de la chirurgie, il doit être maintenu au contact des dents. Cependant, une pression trop exagérée déforme le ligament alvéolo-dentaire, en enfonçant les dents adjacentes au site à implanter et donc nuit à la précision du transfert des points repères. Il en est de même lorsque l'édentement est terminal ; à cet endroit, le guide entre en contact avec la muqueuse et les quelques millimètres de gencive participant au support sont susceptibles de se déformer élastiquement [13].

### **1-3/ Le guide chirurgical à appui osseux**

Pendant la chirurgie, le guide est positionné sur l'os du patient. Il s'adresse à des patients édentés partiels ou complets et permet de visualiser l'acte chirurgical en s'appuyant sur l'os résiduel, assurant ainsi une meilleure précision pour le positionnement du guide. Contrairement aux autres guides chirurgicaux, une pression excessive durant la chirurgie ne présente pas de risque d'imprécision due à une déformation élastique [13]. (Figure 21)

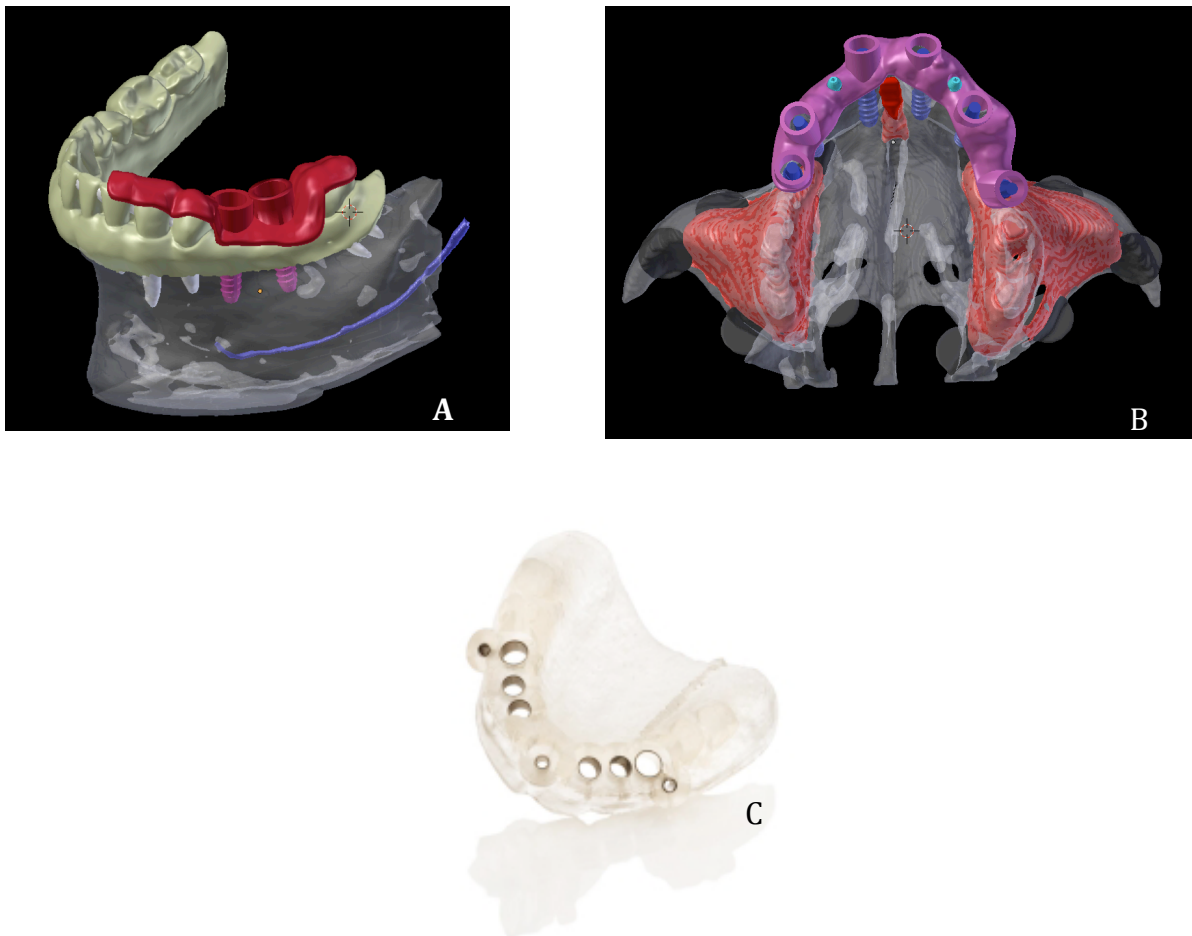


Figure 21 : Les différents types de guides chirurgicaux : A. Dento-muqueux, B. Osseux et C. muqueux

## 2/ Conception du Guide chirurgicale avec L'Open Dental Cad

Selon le support choisi dans le menu des maillages segmentés: os/ gencive / dent, on peut choisir d'avoir un guide à appui osseux, muqueux ou dentaire.

### **2-1/La gouttière ou la base du guide**

Une fois le support choisi, dans le menu splint (gouttière), on démarre le dessin du guide grâce à une courbe Bézier que l'on transforme en gouttière en personnalisant son épaisseur.



## **2-2/ les cylindres guides**

Chaque cylindre guide (ou guide cylinder dans le menu) est relatif à un implant, on les ajoute en sélectionnant guide cylinder dans le menu implant. Cet ajout peut se faire implant par implant si on veut individualiser le diamètre et la hauteur de chaque cylindre guide. Comme on peut les ajouter avec une seule commande si les cylindres guides ont le même diamètre et la même hauteur.

## **2-3/ Trou de perçage (inner cylinder)**

L'inner cylinder correspond au trou de perçage qui permettra le passage des forets. Chaque implant a son propre trou de perçage ou inner cylinder. Le diamètre peut être personnalisé au grès de chaque praticien pour chaque implant.

## **2-4/ L'édition du guide**

Une fois le diamètre des cylindres guides et des inner cylinder (trous de perçage) défini, le praticien édite le guide dans le menu splint.

Le logiciel étant ouvert, le praticien peut adjoindre une barre transversale pour rigidifier le guide, des puis de vissage pour la stabilisation du guide par des vis d'ostéosynthèse.

## **2-5/ Les bagues chirurgicales ou sleeves**

Le plug-in Open Dental CAD de Blender, permet un large choix de sleeves ou bagues grâce à une bibliothèque pré-établie. Dans cette bibliothèque le praticien peut choisir la bague qui correspond à ses forets, et éditer un guide avec une partie femelle correspondant à la bague. De telle sorte à ce que la bague s'intègre au guide après sa fabrication. Figure 21.

La chirurgie guidée impose l'utilisation de trousse chirurgicale adaptée, l'investissement est conséquent. Avec Blender le praticien peut s'affranchir en concevant des bagues personnalisées correspondant à ses forets, voire même concevoir des forets personnalisés [24]. Figure 22

Blender est un logiciel de modélisation par excellence, le praticien peut modéliser ses propres bagues qui correspondent à sa séquence de forage, et les faire fabriquer, et sur la base de ces mêmes bagues concevoir son guide. Figure 25 et 26

## 2-6/ Forets

L'add on de OPEN DENTAL CAD propose une bibliothèque de foret adaptés à la chirurgie guidée avec une butée déterminant une longueur donnée. Figure 23

Le praticien peut faire fabriquer ces forets comme il peut les modifier à sa guise avant de lancer leur fabrication.

Il peut aussi grâce au foret simuler le passage de ce dernier dans le trou de perçage et déceler une quelle conque collision ou interférence. Figure 24

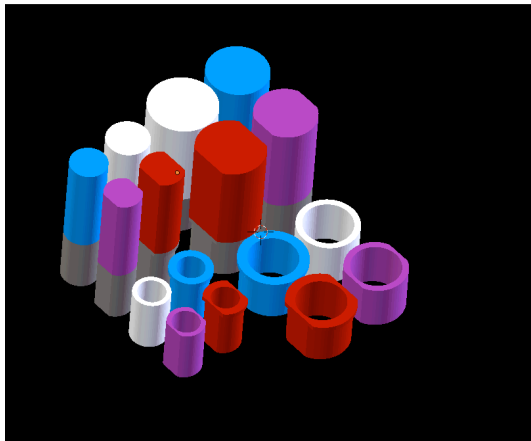


Figure 21 : Bibliothèque de bagues dan l'Open Dental CAD

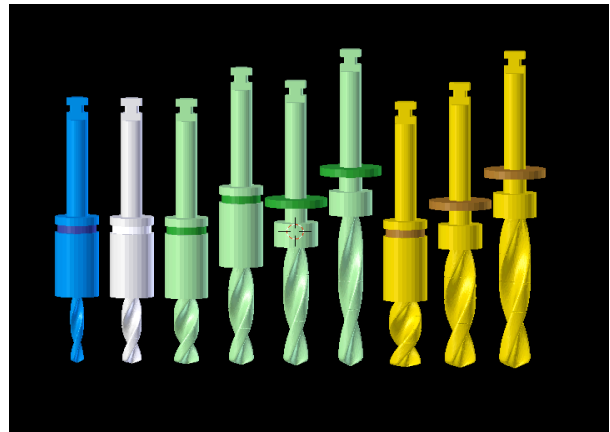


Figure 23: Bibliothèque de forets

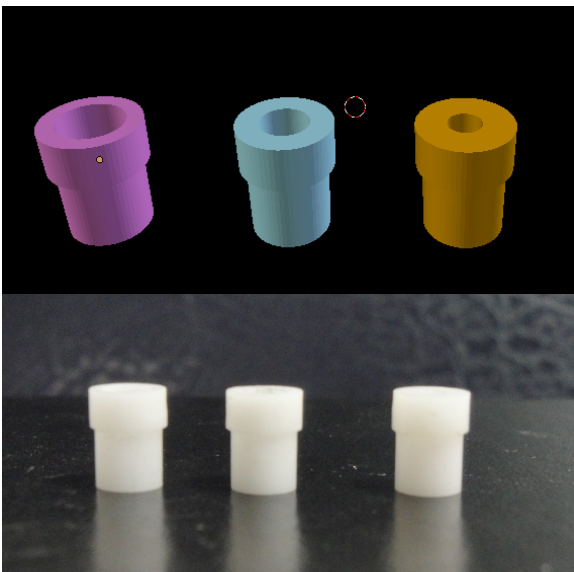


Figure 22: Bagues Personnalisées virtuelles et réelles pour les forets Atoll grâce à Blender

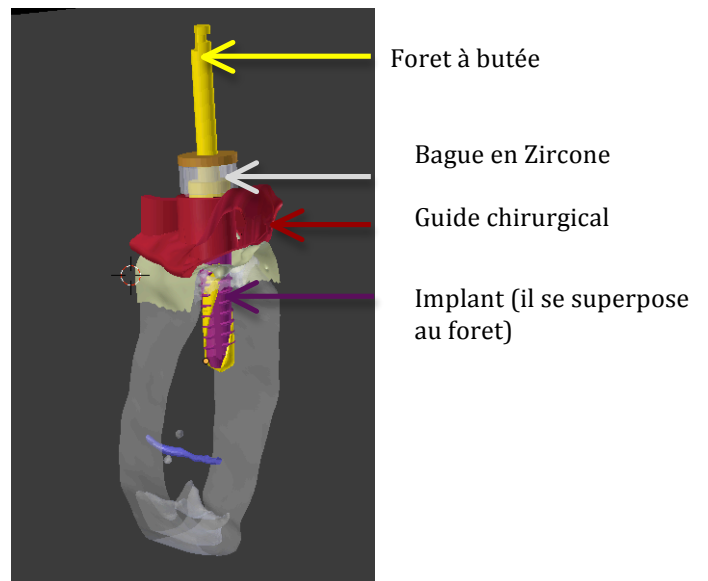
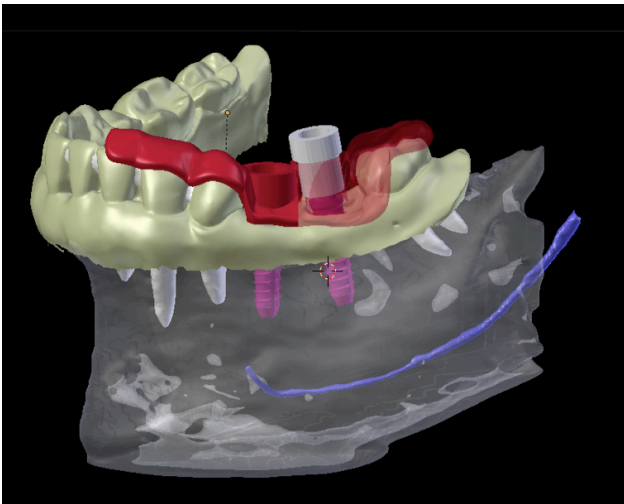


Figure 24 : Coupe simulant le passage du foret à butée dans la douille positionnée dans le guide



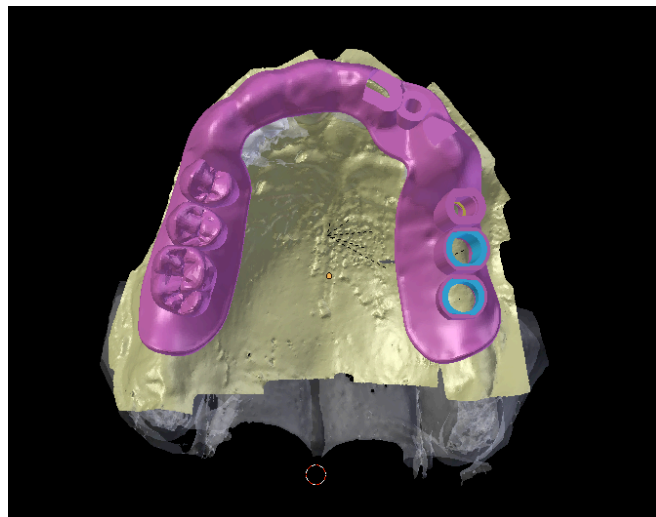
**Figure 25 : Guide chirurgical avec bague en Zircone personnalisé conçu sur le modèle en plâtre scanné**



**Figure 26: bagues modélisée qui s'adapte au guide chirurgical**

### 3/ Guides chirurgicaux personnalisés

L'utilisation de Blender laisse au praticien la liberté de personnaliser ses guides chirurgicaux en fonction de son propre flux de travail; s'il est amené à utiliser des sleeves ou bagues de perçage, il pourrait à cette étape faire correspondre le diamètre du trou de perçage au diamètre externe de la bague de perçage. Aussi le praticien peut utiliser le projet prothétique comme guide de perçage [24]. Figure 27



**Figure 27: Guide personnalisé utilisant le projet prothétique à droite et les bagues à gauche**

### 4/ L'export STL

Enfin, le praticien se réserve le droit d'exporter le guide et l'os sous le format STL ou tout autre format 3D ouvert, pour pouvoir le prototyper soit en interne s'il dispose d'une imprimante 3D, soit dans un centre de prototypage 3D.

## **5/ Le Bio-modèle ou modèle anatomique**

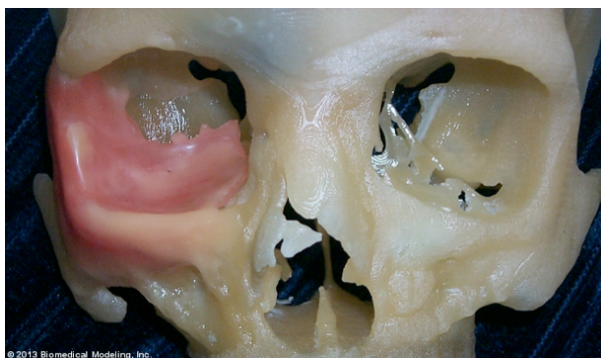
Le prototypage rapide stéréolithographique est l'une des solutions proposées pour transférer la planification implantaire à la chirurgie. Il est connu dans le domaine industriel comme un procédé de fabrication rapide, et économique pour obtenir des prototypes [26].

Son application dans le domaine médical a permis la visualisation des grandes lésions osseuses, ainsi que l'analyse préopératoire des stratégies réparatrices [32-33].

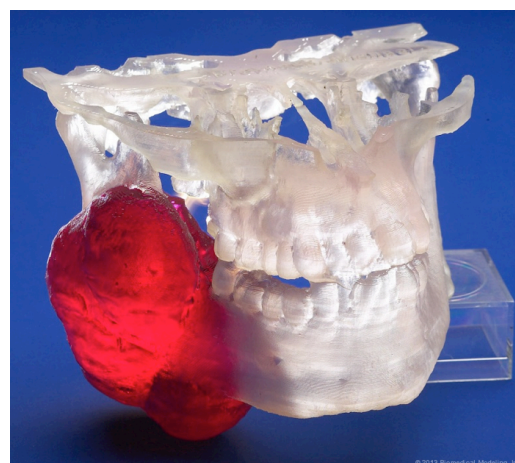
Le rapport de Santler et Coll, [25] portant sur plus de 300 cas de cancers et de traumatismes, a démontré l'avantage du modèle 3D dans la préparation des grandes reconstructions chirurgicales [20].

L'utilisation d'un modèle anatomique a également été suggérée pour l'étude des élévations de sinus [35], pour la préparation d'implants périostés [5] et pour la conception des tissus mous pour les prothèses du visage. Choi et Col [5] ont évalué la précision de ces modèles en effectuant des mesures linéaires de multiples modèles et ont constaté qu'il était de l'ordre de 0,5mm [39] Erickson et col [19] ont interrogé les chirurgiens qui ont utilisé des modèles anatomiques personnalisés pour le choix des reconstructions chirurgicales et le prélèvement d'implant adaptés. Ils ont constaté que la majorité des cliniciens ont changé leur approche chirurgicale et gagné du temps avec l'utilisation de ces modèles [40-26].

Dans le cadre de l'implantologie, le bio-modèle est obtenu par prototypage de fichiers STL exportés à partir du projet implantaire. L'intérêt d'un système ouvert permettant l'export en STL revêt ici toute son importance. Le bio-modèle peut être personnalisé selon les besoins du praticien et peut être mono ou polychrome. Il peut servir à simuler l'acte implantaire sur le site avant la chirurgie, évaluer la proximité par rapport au nerf dentaire inférieur, au sinus ou aux dents adjacentes. Il peut même servir pour le choix des piliers et la fabrication de la prothèse immédiate avant l'acte chirurgicale, sous réserve d'intégrer dans le bio-modèle les répliques d'implants [4-2]. Figures 28 et 29



**Figure 28: Bio-modèle avec un wax-up d'un implant orbitaire**



**Figure 29 : Bio-modèle montrant une masse tumorale colorée en rouge**

## VIII/ Impression 3D

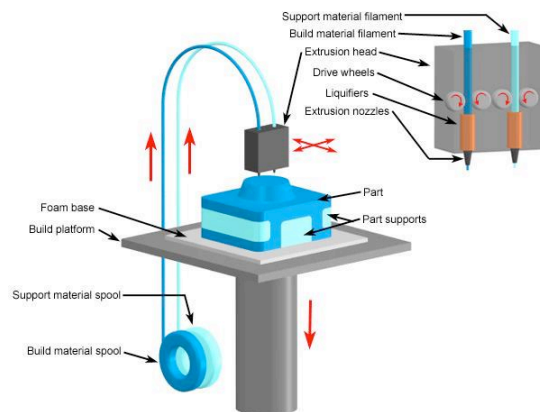
L'impression tridimensionnelle est une technique de fabrication additive. Trois technologies principales coexistent [38]:

- Le modelage par dépôt de matière en fusion ou en injection
- La stéréolithographie (SLA)
- Le frittage sélectif par laser (un laser agglomère des couches de poudre).

### 1/ Le modelage par dépôt de matière en fusion

La technique de dépôt de matière fondue (FDM) consiste à faire fondre un filament de matière synthétique (généralement du plastique type ABS ou PLA) à travers un ou plusieurs extrudeuses chauffés à une température variant entre 160 et 270 °C. Un petit fil de plastique en fusion, d'un diamètre de l'ordre du dixième de millimètre, en sort. Ce fil est déposé en ligne et vient se coller par re-fusion sur ce qui a été déposé au préalable [26]. Figure 30

L'intérêt du FDM est de permettre de créer des pièces en matière disposant de caractéristiques mécaniques, thermiques et d'une stabilité identique aux pièces thermoplastiques injectées [26].



**Figure 30 : Les différents composants d'une imprimante FDM**

### 2/ Impression par injection de matière

#### **2-1/ Impression par injection de cires**

Des couches successives (de 10 à 70  $\mu\text{m}$ ) sont créées par injection simultanée de deux cires, celle du modèle et une autre qui sert de support de construction. Un surfacage par fraisage est réalisé après chaque génération de couche pour obtenir une bonne planéité et améliorer la précision des pièces obtenues. La cire support est éliminée par dilution dans un bain de solvant élevé en température. Ce procédé peut être utilisé pour la réalisation de guides chirurgicaux en Métal par procédé de cire perdu [33].

## 2-2/ impression par injection de résines

Des couches successives (de 10 à 30  $\mu\text{m}$ ) sont créées par injection simultanée de deux résines, celle du modèle et une autre qui sert de support de construction. A chaque couche déposée, une source UV est utilisée pour solidifier par polymérisation la résine photo- sensible.

La résine support est éliminée par dilution dans un bain de solvant élevé en température ou par jet d'un solvant. Les objets finis sont ensuite nettoyés puis mis au four pour finaliser la polymérisation. Cette technique est très utile pour le prototypage de bio-modèle Osseux ou dento-muqueux issus de la segmentation.

## 3/ Stéréolithographie

La Stéréolithographie est considérée comme étant à l'origine des procédés d'impression 3D, avec le premier modèle breveté en 1986 par Charles Hull et la première machine commerciale développée par 3D Systems en 1988 [37].

Ce procédé, connu sous le nom de SLA, utilise le principe de photo-polymérisation pour fabriquer des modèles, en résine acrylate ou époxy et en ABS, pour construire couche par couche des pièces tridimensionnelles très précises de géométries complexe [37].

La fabrication d'un objet ou d'un ensemble d'objets nécessite la construction de supports pour que les parois ne s'effondrent pas. Ces supports sont réalisés sous forme de tiges dans le même matériau que les pièces, ce qui nécessite de les enlever manuellement [37].

La stéréolithographie est la technique idéale pour l'impression de guides chirurgicaux, car dispose d'un grand choix de résines photosensibles dont les résines biocompatibles, et permet une impression très soignée [37]. Figure 31

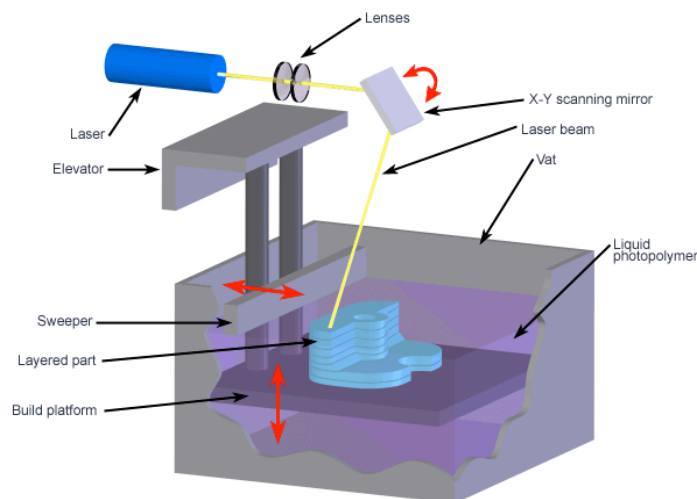


Figure 31 : Les différents composants d'une imprimante par stéréolithographie

## **4/ Frittage laser sélectif**

Le frittage laser sélectif ou FSL est similaire en partie à la stéréolithographie. Il utilise la matière première sous forme de poudre au lieu d'un photopolymère liquide. Un laser puissant, contrôlé par un système optique, solidifie localement la surface de poudre et l'agglomère aux couches précédentes par un frittage sélectif, selon les paramètres géométriques prédéfinis par un fichier CAO (MAYA, BLENDER...). Une nouvelle couche de poudre est ensuite étalée et le processus recommence [31].

Grâce à la variété des matériaux pouvant être utilisés par ce procédé, une large gamme d'applications en dentisterie est possible; guide chirurgicaux en tout matériau, chapes prothétiques, supra-structures implantaires, implants dentaires.

Encore assez rare, ce type d'imprimantes devrait se démocratiser puisqu'un brevet sur le processus de fabrication d'objet par FSL est tombé dans le domaine public en 2014. Si des projets open sources s'en emparent, le prix de ces imprimantes 3D devrait rapidement être abordable [31-29].

## **5/ Les matériaux d'impression**

Après avoir présenter les différents procédés d'impression 3D, il convient de citer brièvement quelques matériaux d'impression utiles pour ce travail. L'Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), le Polylactic Acid (PLA), les résines acryliques et époxy. Ces matériaux peuvent nous servir pour la réalisation de bio-modèles de démonstration et de planification prothétique.

En ce qui concerne l'impression des guides chirurgicaux, il est essentiel d'opter pour des matériaux biocompatibles évalués conformément à la norme DIN EN ISO 10993-1.

Il existe sur le marché des photopolymères biocompatibles destinés à l'impression par stéréolithographie d'artifices médicaux, dont les guides chirurgicaux, pour un contact avec l'os et les membranes muqueuses allant jusqu'à 24 heures.

Ces photopolymères biocompatibles peuvent notamment être utilisés sur des imprimantes de bureau par procédé de stéréolithographie, notamment :

- Le Somos® BioClear de la société DSM [29].
- Le photopolymère biocompatible (MED610) de la Société Stratasys [16].

L'impression en Métal (acier inoxydable, titane, chrome cobalt) reste le choix idéal de biocompatibilité, elle avait l'inconvénient pendant très longtemps d'être onéreuse, cependant avec l'avènement des imprimantes 3D de bureau elle devient de plus en plus accessible. En effet une Start-Up anglaise vient de lancer son imprimante compacte de métal très abordable [18].

## CONCLUSION

Le développement des procédés d'acquisitions radiologiques, et des algorithmes de segmentation, permet d'aboutir à des structures 3D plus précises.

L'Open Dental Cad avec ses bibliothèques de dents et d'implants, permet un processus complet de planification implantaire et de conception de guides chirurgicaux.

L'utilisation de scanner optique permet d'alléger le flux de travail en éliminant certaines étapes dont la prise d'empreinte, la coulée et la réalisation de wax-up [31-32]. Dans l'avenir, l'intégration des articulateurs virtuels, permettra une planification virtuelle plus sophistiquée [28-33-36].

Le prototypage 3D permet le transfert de la position virtuelle de l'implant grâce à un guide chirurgical. Actuellement, la fabrication du guide chirurgical et ou du bio-modèle nécessite une logistique faisant intervenir des centres de prototypages spécialisés ou bien un investissement élevé pour une fabrication centralisée au cabinet dentaire.

Cependant avec l'évolution des technologies et des matériaux (l'imprimante 3D de bureau par exemple), une distribution plus large des unités de fabrication est possible impliquant une réduction considérable des coûts. A moyen terme, les dentistes et les patients vont bénéficier de coûts de productions plus faibles et d'un flux de travail plus efficient.

Dans l'avenir, en combinant les technologies de scanner optique, d'imagerie 3D, de CAO-FAO notamment l'impression par fusion laser de métal, il sera possible de produire des guides chirurgicaux après une seule consultation clinique avec le patient [28].



## **BIBLIOGRAPHIE**

1. About meshlab.<http://meshlab.sourceforge.net/>.
2. Antoine Rosset MD, Luca Spadola MD, Osman Ratib MD, PhD . OsiriX: An Open-Source Software for Navigating in Multidimensional DICOM Images. September 2004, Volume 17, Issue 3, pp 205-216.
3. Béotien. Un cadeau de beotien. [http://www.eugenol.com/sujets/394159-un-cadeau-de-beotien?page=7#post\\_697195](http://www.eugenol.com/sujets/394159-un-cadeau-de-beotien?page=7#post_697195).
4. Biomedical modelling. Applications in Dentistry. [http://www.biomodel.com/dental\\_apps.html](http://www.biomodel.com/dental_apps.html).
5. Choi JY, Choi JH,. Analysis of errors in medical rapid prototyping models. Int J Oral Maxillofac Surg 2002 Feb;31(1):23-32.
6. Chunliang Wang. New ultra-fast level-set algorithm may bring more intelligent segmentation tools to the clinic. ECR Today 2012 Sunday 4 March 2012 Technology Focus.
7. Corinne Vachier . Extraction de caractéristiques, segmentation d'image et morphologie mathématique these ; l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris 1995.
8. Faicel Chamroukhi.méthodes de classification pour la segmentation d'image. 2012 module in1, master 1 sis.ustv, Isis UMR CNRS 6168. <http://chamroukhi.univ-tln.fr/courses/Chamroukhi-coursimage-seg.pdf>
9. Gary Orentlicher, DMD, Marcus Abboud, DMDc .Guided Surgery for Implant Therapy. Dent Clin N Am 55 (2011) 715–744.
10. Georgel Stéphanie. La chirurgie implantaire guidée assistée par ordinateur. Université de Lorraine / 25-05-2012.
11. Hobbyist N. Benkeltoun, Open source: Sortir des idées reçues [,ParisTech Review, Paris, 2011.
12. ITIKASNAP. What is ITK-SNAP. <http://www.itksnap.org/pmwiki/pmwiki.php>.
13. Jérémie Rulliere. Interets des logiciels de planification et de la chirurgie guidée. 2013 these n° 2013 LYO 1d 004.
14. K. Davarpanah et al. Implantologie assistée par ordinateur.Rev Stomatol Chir Maxillofac 2012;113:259-275.
15. Kathleen M D'souza, Meena A Aras. Applications of computer-aided design/ computer assisted manufacturing technology in dental implant planning. Journal of Dental Implants | Jan - Jun 2012 | Vol 2 | Issue 1.
16. Lior Zonder & Nadav Sella. Precision prototyping the role of 3d printed molds in the injection molding industry. <http://www.stratasys.com/~media/Main/Files/White%20Papers/SSYS-WP-InjectionMolding-9-23-13.pdf>N20
17. Margossian P., Mariani P., Laborde G. Guides radiologiques et chirurgicaux en implantologie. EMC (Elsevier Masson SAS, Paris), Odontologie, 23-330-A-05, 2009.
18. Newton 3D . Newton 3D The Desktop Metal 3D Printer. <http://newton3d.com/what-would-you-3d-print-with-newton-3d>.
19. Olszewski R, Tranduy . Innovative procedure for computer-assisted genioplasty: three-dimensional cephalometry, rapid prototyping model and surgical splint. Int J Oral Maxillofac Surg 2010 Jul;39(7):721-724.

20. Olszewski Raphael. Three-dimensional rapid prototyping models in cranio maxillofacial surgery: systematic review and new clinical applications. 2013 P Belg Roy Acad Med Vol. 2:43-77
21. P. Cignoni, M. Callieri, MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool. Eurographics Italian Chapter Conference 2008.
22. Patrick moore. Dental design tools for belnder. <https://sites.google.com/site/blenderdental/about>.
23. Paul Yushkevich, Joseph Piven. User-Guided Level Set Segmentation of Anatomical Structures with ITK-SNAP. Department of Radiology, University of Pennsylvania. <http://researchgate.com>.
24. Perisse Jean. Evolution du guidage chirurgical. Lettre de la Stomatologie 41-Mars 2009.
25. Santler G, Karcher H, Ruda C. Indications and limitations of three-dimensional models in cranio-maxillofacial surgery. J Craniomaxillofac Surg 1998 Feb;26(1):11-16.
26. Sarment David P. Accuracy of Implant Placement with a Stereolithographic Surgical Guide,. ORAL MAXILLOFAC IMPLANTS 2003;18:571–577).
27. Shadi AlZu'bi, Abbes Amira. 3DMedical Volume Segmentation Using Hybrid Multiresolution Statistical Approaches. Hindawi Publishing Corporation Advances in Artificial Intelligence. Volume 2010, Article ID 520427, 15 pages doi:10.1155/2010/520427.
28. Tabea Viktoria . Three-Dimensional Plotting and Printing of an Implant Drilling Guide: Simplifying Guided Implant Surgery.. J Oral Maxillofac Surg 71:1340-1346, 2013.
29. wcom. Le futur imprime l'avenir : l'impression 3D. <http://blog.wcom.fr/?p=236.N19>
30. Wikibooks. Blender 3D: du débutant au pro. [http://fr.wikibooks.org/wiki/Blender\\_3D:\\_du\\_d%C3%A9butant\\_au\\_pro/La\\_fen%C3%AAtre\\_de\\_vue\\_3Dwikipedia](http://fr.wikibooks.org/wiki/Blender_3D:_du_d%C3%A9butant_au_pro/La_fen%C3%AAtre_de_vue_3Dwikipedia).
31. Frittage sélectif par laser. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Frittage\\_s%C3%A9lectif\\_par\\_laser](http://fr.wikipedia.org/wiki/Frittage_s%C3%A9lectif_par_laser).
32. Wikipédia. List of open-source healthcare software. <http://chamroukhi.univ-tln.fr/courses/Chamroukhi-cours-image-seg.pdf>.
33. Wikipedia. Modelage à jets multiples. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Modelage\\_%C3%A0\\_jets\\_multiples](http://fr.wikipedia.org/wiki/Modelage_%C3%A0_jets_multiples).
34. Wikipedia. Open source. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Open\\_source#Histoire](http://fr.wikipedia.org/wiki/Open_source#Histoire)
35. Wikipédia. OsiriX. <http://fr.wikipedia.org/wiki/OsiriX>.
36. Wikipedia. Prototypage rapide. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Prototypage\\_rapide](http://fr.wikipedia.org/wiki/Prototypage_rapide).
37. Wikipedia. Stéréolithographie. <http://fr.wikipedia.org/wiki/St%C3%A9r%C3%A9olithographie>.
38. Wikipedia. Impression tridimensionnelle. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Impression\\_tridimensionnelle](http://fr.wikipedia.org/wiki/Impression_tridimensionnelle).
39. Wikipedia. InVesalius. <http://en.wikipedia.org/wiki/InVesalius>.
40. Yang Liu. Polyaffine . transformation model using region trajectory. April 11, 2014. <http://picsl.upenn.edu/polyaffine-transformation-model-using-region-trajectory>.