

UNIVERSITE TOULOUSE III – PAUL SABATIER
FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

ANNEE 2014

2014 TOU3 3036

THESE

POUR LE DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement

par

Jean RIEUX

le 24 Novembre 2014

APPORT DE LA PLANIFICATION NUMÉRIQUE EN IMPLANTOLOGIE

Directeur de thèse : Pr Serge ARMAND

Co-Directeur : Dr Olivier LE GAC

JURY

Président :	Pr Serge ARMAND
1er assesseur :	Dr Philippe CAMPAN
2ème assesseur :	Dr Pierre BARTHET
3ème assesseur :	Dr Olivier LE GAC



UNIVERSITE TOULOUSE III – PAUL SABATIER
FACULTE DE CHIRURGIE DENTAIRE

ANNEE 2014

2014 TOU3 3036

THESE

POUR LE DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement

par

Jean RIEUX

le 24 Novembre 2014

APPORT DE LA PLANIFICATION NUMÉRIQUE EN IMPLANTOLOGIE

Directeur de thèse : Pr Serge ARMAND

Co-Directeur : Dr Olivier LE GAC

JURY

Président :	Pr Serge ARMAND
1er assesseur :	Dr Philippe CAMPAN
2ème assesseur :	Dr Pierre BARTHET
3ème assesseur :	Dr Olivier LE GAC



Faculté de Chirurgie Dentaire



➔ DIRECTION

ADMINISTRATEUR PROVISOIRE

Mr Hugues CHAP

ASSESEURS DU DOYEN

• ENSEIGNANTS :

Mr CHAMPION Jean

Mr HAMEL Olivier

Mr POMAR Philippe

• PRÉSIDENTE DU COMITÉ SCIENTIFIQUE

Mme GRIMOUD Anne-Marie

• ÉTUDIANT :

Mr HAURET-CLOS Mathieu

CHARGÉS DE MISSION

Mr PALOUDIER Gérard

Mr AUTHER Alain

RESPONSABLE ADMINISTRATIF

Mme GRAPELOUP Claude

➔ HONORARIAT

DOYENS HONORAIRES

Mr LAGARRIGUE Jean †

Mr LODTER Jean-Philippe

Mr PALOUDIER Gérard

Mr SOULET Henri

➔ ÉMÉRITAT

Mme GRÉGOIRE Geneviève

Mr PALOUDIER Gérard

➔ PERSONNEL ENSEIGNANT

56.01 PÉDODONTIE

Chef de la sous-section :

Mr VAYSSE

Professeur d'Université :

Mme BAILLEUL-FORESTIER

Maîtres de Conférences :

Mme NOIRRIT-ESCLASSAN, Mr VAYSSE

Assistants :

Mme GÖTTLE

Chargés d'Enseignement :

Mme BACQUÉ, Mr TOULOUSE

56.02 ORTHOPÉDIE DENTO-FACIALE

Chef de la sous-section :

Mr BARON

Maîtres de Conférences :

Mr BARON, Mme LODTER, Mme MARCHAL-SIXOU, Mr ROTENBERG,

Assistants :

Mme ELICEGUI, Mme OBACH-DEJEAN, Mr PUJOL

Chargés d'Enseignement :

Mr GARNAULT, Mme MECHRAOUI, Mr MIQUEL

56.03 PRÉVENTION, ÉPIDÉMIOLOGIE, ÉCONOMIE DE LA SANTÉ, ODONTOLOGIE LÉGALE

Chef de la sous-section :

Mr HAMEL

Professeur d'Université :

Mme NABET, Mr PALOUDIER, Mr SIXOU

Maître de Conférences :

Mr HAMEL, Mr VERGNES

Assistant :

Mlle BARON

Chargés d'Enseignement :

Mr DURAND, Mr PARAYRE

57.01 PARODONTOLOGIE

Chef de la sous-section : Mr BARTHET
Maîtres de Conférences : Mr BARTHET, Mme DALICIEUX-LAURENCIN
Assistants : Mr MOURGUES, Mme VINEL
Chargés d'Enseignement : Mr. CALVO, Mr LAFFORGUE, Mr PIOTROWSKI, Mr SANCIER

57.02 CHIRURGIE BUCCALE, PATHOLOGIE ET THÉRAPEUTIQUE, ANESTHÉSIOLOGIE ET RÉANIMATION

Chef de la sous-section : Mr CAMPAN
Professeur d'Université : Mr DURAN
Maîtres de Conférences : Mr CAMPAN, Mr COURTOIS, Mme COUSTY
Assistants : Mme BOULANGER, Mme CROS, Mr EL KESRI
Chargés d'Enseignement : Mr FAUXPOINT, Mr GANTE, Mr L'HOMME, Mme LABADIE, Mr PLANCHAND, Mr SALEFRANQUE

57.03 SCIENCES BIOLOGIQUES (BIOCHIMIE, IMMUNOLOGIE, HISTOLOGIE, EMBRYOLOGIE, GÉNÉTIQUE, ANATOMIE PATHOLOGIQUE, BACTÉRIOLOGIE, PHARMACOLOGIE

Chef de la sous-section : Mr KEMOUN
Professeurs d'Université : Mme DUFFAUT
Maîtres de Conférences : Mme GRIMOUD, Mr KEMOUN, Mr POULET
Assistants : Mr BARRAGUÉ, Mme DUBOSC, Mme PESUDO, Mme SOUBIELLE
Chargés d'Enseignement : Mr BARRÉ, Mr SIGNAT, Mme VALERA

58.01 ODONTOLOGIE CONSERVATRICE, ENDODONTIE

Chef de la sous-section : Mr GUIGNES
Maîtres de Conférences : Mr DIEMER, Mr GUIGNES, Mme GURGEL-GEORGELIN, Mme MARET-COMTESSE
Assistants : Mr ARCAUTE, Mlle DARDÉ, Mme DEDIEU, Mme DUEYMES, Mr MICHETTI
Chargés d'Enseignement : Mr BALGUERIE, Mlle BORIES, Mr ELBEZE, Mr MALLET, Mlle PRATS,

58.02 PROTHÈSES (PROTHÈSE CONJOINTE, PROTHÈSE ADJOINTE PARTIELLE, PROTHÈSE COMPLÈTE, PROTHÈSE MAXILLO-FACIALE)

Chef de la sous-section : Mr CHAMPION
Professeurs d'Université : Mr ARMAND, Mr POMAR
Maîtres de Conférences : Mr BLANDIN, Mr CHAMPION, Mr ESCLASSAN, Mme VIGARIOS
Assistants : Mr CHABRERON, Mr DESTRUHAUT, Mr GALIBOURG, Mr HOBEILAH, Mr KNAFO
Chargés d'Enseignement : Mr ABGRALL, Mr FLORENTIN, Mr FOLCH, Mr GHRENASSIA, Mme LACOSTE-FERRE, Mme LASMOLLES, Mr LUCAS, Mr MIR, Mr POGÉANT, Mr RAYNALDY

58.03 SCIENCES ANATOMIQUES ET PHYSIOLOGIQUES, OCCLUSODONTIQUES, BIOMATÉRIAUX, BIOPHYSIQUE, RADIOLOGIE

Chef de la sous-section : Mme JONIOT
Professeur d'Université : Mme GRÉGOIRE
Maîtres de Conférences : Mme JONIOT, Mr NASR
Assistants : Mr CANIVET, Mme GARNIER, Mr MONSARRAT
Chargés d'Enseignement : Mr AHMED, Mme BAYLE-DELANNÉE, Mme MAGNE, Mr TREIL, Mr VERGÉ

*L'université Paul Sabatier déclare n'être pas responsable des opinions émises par les candidats.
 (Délibération en date du 12 Mai 1891).*

Mise à jour au 1^{er} octobre 2014

REMERCIEMENTS

Merci à Kristin, pour ton soutien et ton amour inconditionnel. Pour m'avoir fait découvrir la culture allemande et pour ta passion du français qui nous a permis de nous rencontrer. Parce que malgré les épreuves, on arrivera au bout du chemin avec notre ménagerie. Je t'aime.

Merci à mes parents, Jean-François et Claude. Vous m'avez permis de faire ces études sans aucunes préoccupations matérielles et surtout veillez à ce que je sois bien nourri. Vous m'avez soutenu, surtout dans les moments les plus difficiles. J'espère que ce travail qui marque la fin de mes études vous rendra fiers de moi. Et même si on ne se le dit pas assez... Je vous aime.

Merci à mes sœurs, Caroline et Cécile. Vous faites parties de ce joyeux bordel. Vous m'avez supporté et canalisé durant les phases les plus stupides de mon adolescence, rien que pour ça je ne vous remercierai jamais assez. Même si je suis le plus jeune, vous pourrez toujours vous reposer sur moi. Je vous aime.

Merci à ma famille. À Jacques, pour ta passion de l'histoire familiale et ton envie de la transmettre. À Janine, pour le pain-tomate autour de la piscine les longues journées d'été. À Edith, pour les bons petits plats après une journée à la bibliothèque. À Christian et Daniel, pour nos parties de cartes et vos histoires drôles, ces moments de partage. À Hélène et Bernard, pour votre amour de la nature et des chevaux. À Benjamin et Mathilde, pour nos moments passés à Saint-Quentin.

Merci à mes amis du Ludi.com. À Fred et Yan, globalement on peut dire que votre élevage aura été productif. À Thibault, Julien, Jacquet, Diego, Benoit, aux nombreux Cédric et aux autres que j'oublie. On aura passé une bonne partie de nos nuits à jouer à des jeux de guerre et à rigoler. Il me semble même que c'est dans cette boutique que se tenait le championnat du monde de mauvaise foi.

Merci à mes amis de promo. À Maxime, avec qui j'ai passé mes meilleurs moments et raconté le plus de connerie. À Dien, car tu n'étais jamais très loin, parfois même dans un buisson. À Charles, Théo, Vincent, Sophia, Michel, Laure, Clément et tous les autres ; les TP, la clinique et les soirées n'auraient pas pu être ce qu'ils étaient sans vous.

À notre président du Jury et directeur de thèse,

Monsieur le Professeur Serge ARMAND

- Professeur des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie,
- Docteur en Chirurgie Dentaire,
- Docteur en Sciences Odontologiques,
- Docteur d'Etat en Odontologie,
- Responsable du Diplôme d'Université d'Implantologie,
- Lauréat de l'Université Paul Sabatier.

Nous vous sommes très reconnaissants d'avoir accepté la présidence de notre jury de thèse. Nous vous remercions pour votre bienveillance, votre pédagogie et vos valeurs de travail que vous nous avez transmises. Soyez assuré de notre profonde estime.

À notre Jury de thèse,

Monsieur le Docteur Pierre BARTHET

- Maître de Conférences des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie,
- Responsable de la sous-section : Parodontologie,
- Docteur en Chirurgie Dentaire,
- Docteur de l'Université Paul Sabatier.

Nous vous sommes très reconnaissants d'avoir accepté de faire partie des membres de ce jury. Votre enseignement, et en particulier votre enseignement clinique, fut riche en savoir et un réel plaisir. Nous vous témoignons ici notre gratitude et vous remercions profondément.

À notre Jury de thèse,

Monsieur le Docteur Philippe CAMPAN

- Maître de Conférences des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie,
- Responsable de la sous-section de Chirurgie Buccale, Pathologie et Thérapeutique, Anesthésiologie et Réanimation,
- Docteur en Chirurgie Dentaire,
- Docteur de l'Université Paul Sabatier,
- Lauréat de l'Université Paul Sabatier,
- Board Européen de chirurgie buccale,
- Spécialiste qualifié en chirurgie orale.

Nous vous sommes très reconnaissants d'avoir accepté de faire partie des membres de ce jury. Nous vous remercions pour vos compétences et vos connaissances en chirurgie, ainsi que pour votre patience lors d'intervention compliquée. Veuillez trouver ici l'expression de notre sincère reconnaissance.

À notre co-directeur de thèse,

Monsieur le Docteur Olivier LE GAC

- Chargé d'Enseignement à la Faculté de Chirurgie Dentaire de Toulouse,
- Docteur en Chirurgie Dentaire,
- Attaché hospitalo-universitaire.

Nous vous remercions d'avoir accepté de diriger cette thèse. Vos conseils, votre rigueur syntaxique ainsi que vos connaissances sur les technologies modernes de notre discipline auront été très précieux dans la réalisation de ce travail. Veuillez trouver ici le témoignage de notre gratitude et de notre profond respect.

Tables des matières

INTRODUCTION	13
1. La méthode conventionnelle	15
1.1. Les étapes de la planification par la méthode traditionnelle.....	15
1.2. Un point sur l'examen radiologique	22
1.2.1. Principes de la tomographie à faisceau conique ou Cone Beam (CBCT)	22
1.2.2. Principe de la tomodensitométrie ou scanner (CT-Scan)	22
1.2.3. Comparaison des deux méthodes	24
1.2.4. Importance de l'examen radiologique dans la planification implantaire.....	26
2. La planification implantaire par la méthode numérique	27
2.1. Définition	28
2.2. Les étapes de planification par la méthode numérique.....	29
2.2.1. Conception du projet prothétique.....	29
2.2.1.1. Obtention du modèle virtuel.....	30
2.2.1.2. Analyse des tissus mous.....	32
2.2.1.3. Analyse occlusale virtuelle	33
2.2.1.4. La CFAO et le prototypage rapide	34
2.2.1.5. Relation clinique/laboratoire de prothèse et « <i>cloud computing</i> ».....	38
2.2.2. Essayage et validation du projet prothétique.....	39
2.2.3. Réalisation du guide radiologique	39
2.2.4. Examen radiologique	40

2.2.5. Utilisation des images radiographiques.....	41
2.2.5.1. Cartographie du site implantaire	41
2.2.5.2. Fusion des données STL et DICOM.....	43
2.2.5.3. Choix des implants	44
2.2.6. Réalisation du guide chirurgical	45
2.3. Les différents systèmes disponibles sur le marché	46
2.3.1. Simplant®	47
2.3.2. NobelClinician®	48
2.3.3. coDiagnostiX™	49
2.3.4. Invivo5®	51
2.3.5. EasyGuide®	52
2.3.6. Robodent®.....	54
3. Apports de la méthode numérique et comparaison des deux méthodes.....	56
3.1. Conservation et multiplication des possibilités.....	56
3.2. Gain en précision	56
3.3. Outils de communication et pédagogique	60
3.4. Meilleures suites opératoires pour le patient	61
3.5. Gain de temps et réduction des coûts.....	61
3.6. Erreurs et limites de la méthode numérique	62
CONCLUSION.....	64
Références bibliographiques.....	66
Table des figures.....	71

INTRODUCTION

L'implantologie utilise des implants dentaires dans le but de remplacer les dents absentes. Cette discipline, qui a connu un réel essor à la fin du XXème siècle, grâce notamment aux travaux de Brånemark, repose aujourd'hui sur des bases solides et scientifiquement établies.

Avec l'augmentation du taux de succès de l'ostéointégration, et la codification des protocoles chirurgicaux et prothétiques, les indications des traitements implantaire se sont élargies. La thérapeutique implantaire fait maintenant partie de l'arsenal thérapeutique qui doit être proposé au patient, en fonction de sa demande (confort, esthétique, etc...), afin qu'il ne subisse pas de « perte de chance ».

Cependant, l'implant doit être considéré comme un outil au service de la prothèse et non l'inverse. Il faut donc valider l'ensemble de la thérapeutique avant la pose des implants. Cette étape de planification est définie comme une étape permettant d'anticiper, en plus des contraintes anatomiques, les écueils prothétiques liés à la pose de l'implant. Elle s'appuie sur un ensemble de données collectées grâce :

- à l'interrogatoire,
- à l'examen clinique,
- au projet prothétique,
- aux éléments radiographiques.

Ces données permettent de :

- considérer le volume osseux existant et donc évaluer l'indication d'une procédure d'augmentation du volume osseux,
- déterminer le biotype parodontal,
- établir un plan de traitement,
- choisir l'implant de dimensions (longueur, diamètre) adaptées au cas clinique. [14]

L'implantologie n'aura pas échappé à l'essor du numérique. Ainsi la planification peut se faire grâce à la combinaison d'une imagerie de plus en plus précise et de logiciels performants. À ces avancées s'ajoute la démocratisation de la C/FAO

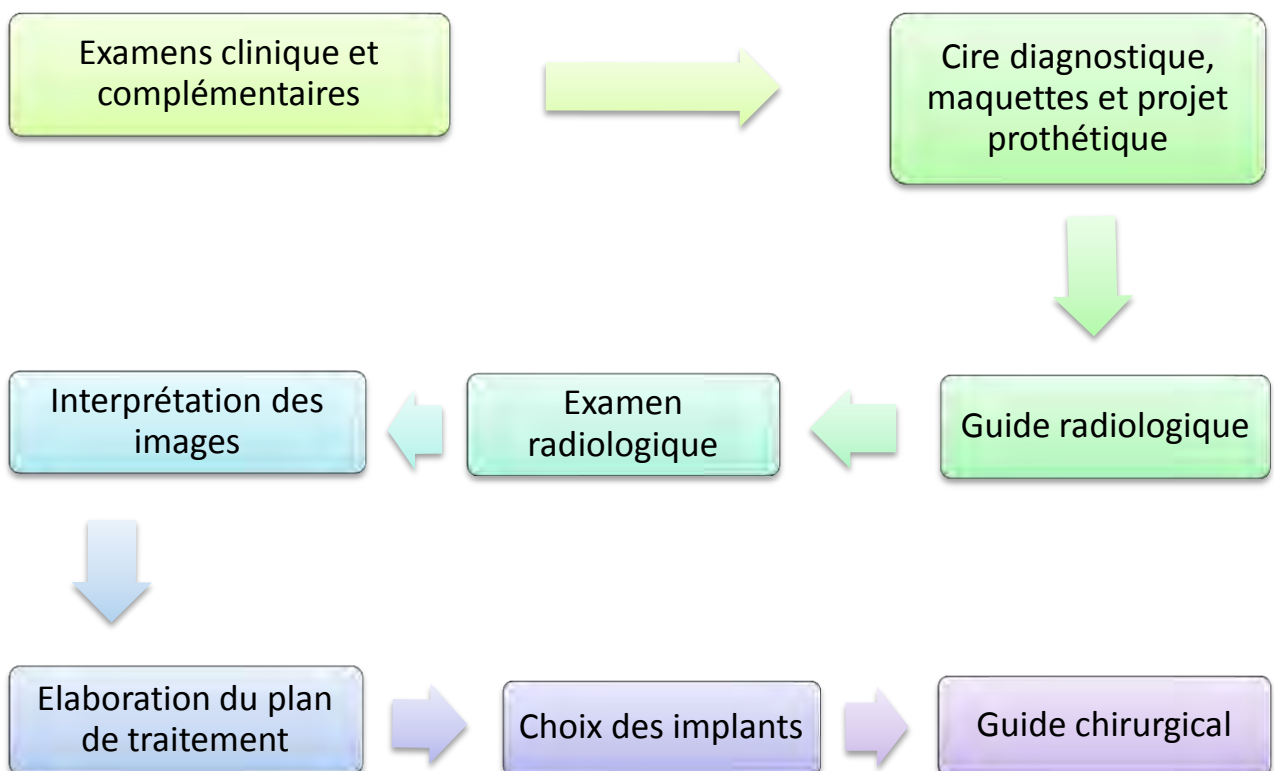
(Conception/Fabrication Assistées par Ordinateur) et l'arrivée des imprimantes 3D. Les planches d'imagerie tomodensitométrique et les calques d'implants laissent place à des reconstitutions tridimensionnelles et des bibliothèques implantaire numériques.

Ce travail illustre l'apport des technologies numériques. La thérapeutique implantaire comprend plusieurs temps, nous avons voulu ici mettre l'accent sur l'étape de la planification. Celle-ci commence dès l'examen clinique, se poursuit par la définition d'un projet prothétique qui nous guide tout au long de la thérapeutique et se termine par la conception d'un guide chirurgical.

Une première partie présente un rappel de la thérapeutique implantaire par la méthode conventionnelle, ainsi qu'un point sur l'examen radiologique, examen fondamental de la planification implantaire. Une deuxième partie met en avant la méthode numérique et les différents systèmes disponibles actuellement utilisables. Enfin, la dernière partie fait la synthèse des différences entre les deux méthodes ainsi que les apports réels de la méthode numérique.

1. La méthode conventionnelle

Les étapes de la planification implantaire ont pour but de confronter un projet prothétique idéal avec l'anatomie du patient. Elles aident le praticien à prendre les bonnes décisions lors de l'élaboration du plan de traitement. Selon le type d'édentement et les demandes du patient, certains critères sont plus importants que d'autres mais, dans le fond, le processus général reste le même.



1.1. Les étapes de la planification par la méthode traditionnelle

- L'examen clinique et les examens complémentaires : l'examen clinique est réalisé de manière méthodique afin de prendre en compte tous les éléments et il permet de recueillir les demandes du patient. Pour Boghanim et al. il faut évaluer plusieurs paramètres au niveau du site implantaire, tels que le parodonte, l'occlusion, l'espace prothétique disponible dans les trois sens de l'espace ainsi que le volume osseux. [8]



Figure 1 : Vue de face en occlusion (à gauche) et vue occlusale du maxillaire (à droite)

À ces critères s'ajoute l'étude de la ligne du sourire. Elle est importante, notamment dans le secteur antérieur, car elle permet de préciser le degré de visibilité du parodonte.



Figure 2 : Ligne du sourire haute (à gauche) - moyenne (au milieu) - basse (à droite)

Des modèles d'études ainsi que des radiographies 2D (radiographies rétro-alvéolaires ou orthopantomogramme) nous donnent une idée sur la hauteur d'os disponible et la nature de l'édentement. Les clichés rétro-alvéolaires permettent une évaluation de l'état parodontal, de la hauteur des septa osseux ainsi que l'état de santé global des dents adjacentes. [22]

Ces examens radiographiques complémentaires permettent d'une part de poser l'indication de soins parodontaux si c'est nécessaire, et d'autre part d'anticiper l'intégration fonctionnelle et esthétique.

- La conception, la réalisation et l'essayage du projet prothétique : le projet prothétique permet de guider la position des futurs implants. C'est une maquette dentée, montée sur articulateur avec l'arcade antagoniste, afin d'étudier le schéma occlusal. Il sert à valider avec le patient la position des futures dents prothétiques, notamment par rapport à l'antagoniste, ainsi que l'esthétique.

Il est réalisé soit à l'aide de dents du commerce, soit en cire de diagnostic par addition (« wax-up »), voire même avec des dents radio-opaques. Dans ce dernier cas de figure, il servira directement de guide radiologique.

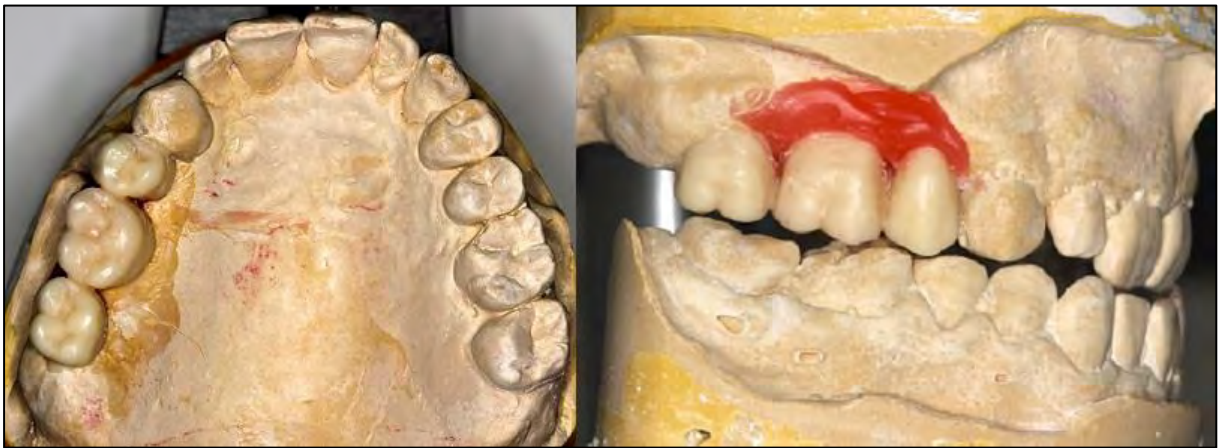


Figure 3 : Projet prothétique pour un édentement de classe II de Kennedy au maxillaire

On remarque à droite la cire rouge (*fig. 3*), qui sert à mettre en évidence le manque de tissu osseux et/ou muqueux sous-jacent. Pour pallier à ce manque, le praticien a le choix entre :

- ❖ une augmentation du volume osseux et/ou de tissus mous,
- ❖ réaliser une prothèse comprenant une gencive prothétique,
- ❖ laisser un espace qui se traduira par des embrasures gingivales trop visibles (« trou noir »).

Avec le projet prothétique, on a une première confrontation de l'anatomie du patient avec une prothèse « idéale ».

- La réalisation du guide radiologique : il s'agit d'un duplicata du projet prothétique en résine chargée en matériau radio-opaque (sulfate de baryum) ou en résine transparente dans lequel on fore et on introduit un matériau radio-opaque (gutta-percha par exemple).



Figure 4 : Guide radiologique en résine transparente avec les puits remplis de matériau radio-opaque

Dans le cas où le guide manque de stabilité, il est possible de réaliser une cale occlusale pour une meilleure stabilité. Elle est réalisée en résine et permet de maintenir le guide en contact intime avec la muqueuse. Il faut néanmoins apprendre au patient à mettre en place le dispositif afin que celui-ci soit dans la position optimale lors de l'examen radiologique. [16, 26]

- Examen radiologique tridimensionnel : cela peut être un examen tomodensitométrique classique (Scanner ou CT-Scan) ou un examen tomographique à faisceau conique (Cone beam ou CBCT). Il se fait avec le guide en place, correctement positionné afin d'éviter les erreurs. Il permet de confronter le projet prothétique avec l'anatomie sous-jacente. [6]

Si cet examen se fait en occlusion, il nous renseignera sur l'espace prothétiquement utilisable ainsi que sur l'axe des forces antagonistes.

- Interprétation des images radiographiques et choix des implants: le radiologue remet au praticien des planches de coupes en 2D, qui s'en sert pour évaluer le volume osseux disponible et pour juger s'il est possible de placer un implant dans l'axe de la future prothèse.

Pour cela, le praticien utilise la superposition sur les planches radiographiques de calques d'implants spécifiques au système implantaire utilisé. De ce fait, il choisit les implants dont les dimensions sont les mieux adaptées au cas clinique.

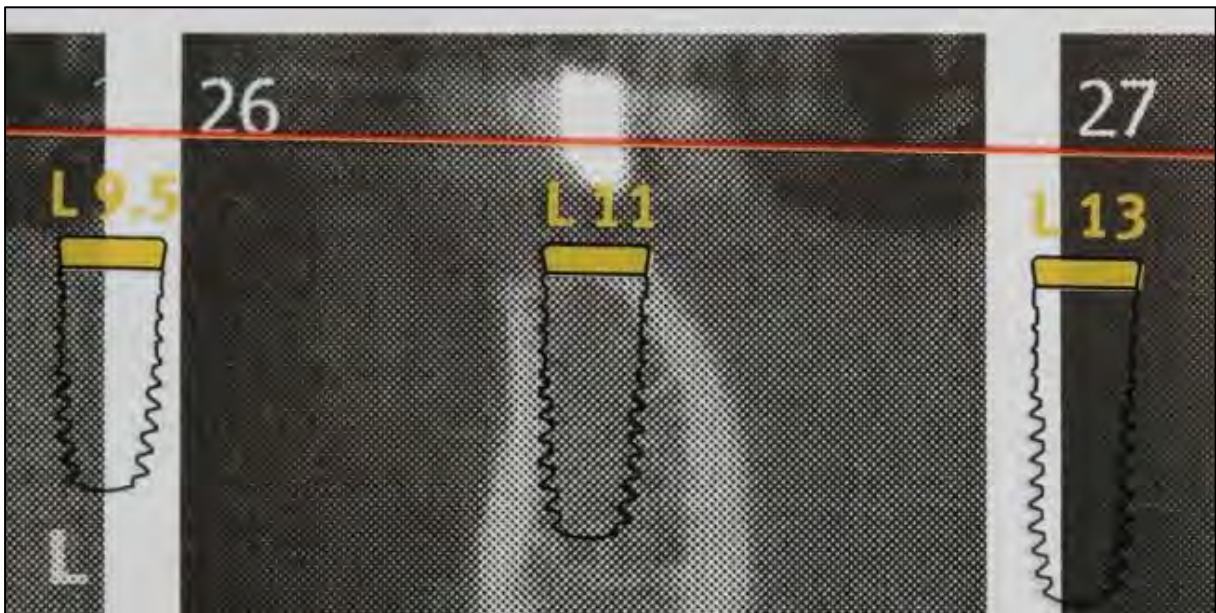


Figure 5 : Plaque radiographique avec calque implantaire (Xive-S)

Lors de la manipulation des calques d'implants, le praticien ne doit pas perdre de vue les critères qui déterminent le bon positionnement d'un implant :

- ❖ Dans le sens vertical, avoir un positionnement qui permette la formation d'un espace biologique autour de l'implant. Cela va permettre l'alignement des collets ainsi que jouer le rôle de barrière biologique. Pour Berglundh et al., cette étanchéité assure la stabilité du niveau osseux. [7]
- ❖ Avoir un positionnement mésio-distal qui permette la vascularisation des septa et la formation d'une papille.

- ❖ Avoir suffisamment d'os autour de l'implant, et particulièrement en vestibulaire ; en effet, il est nécessaire d'en avoir au moins 1,5mm pour assurer une vascularisation suffisante. [4]
- ❖ Se positionner à une distance de sécurité de 2mm par rapport au nerf alvéolaire inférieur.
- ❖ L'émergence de l'implant doit être dans le volume coronaire afin d'accueillir la future prothèse.
- ❖ Avoir un axe implantaire qui permette, idéalement, la réalisation d'une prothèse vissée. Ceci car la prothèse vissée apporte les avantages suivants :
 - Elle permet le démontage.
 - Elle tolère un espace prothétique utilisable plus faible.
 - Absence de ciment de scellement.
 - Elle permet la maintenance. [21]

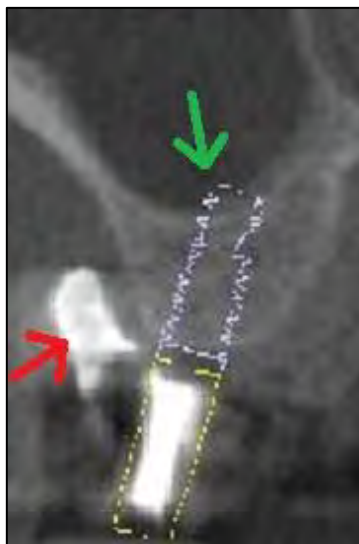


Figure 6 : Planche radiographique avec la position possible d'un implant

On note sur cette coupe (*Fig. 6*) plusieurs éléments qui permettent au praticien de dégager la problématique du cas lors de l'élaboration du plan de traitement.

Tout d'abord, on remarque la résine radio-opaque mise en place pour objectiver le défaut osseux vestibulaire (*flèche rouge*). Le praticien pourrait dans ce cas choisir entre :

- ❖ un implant plus étroit,
- ❖ une augmentation du volume osseux,
- ❖ un implant décalé en palatin.

Ensuite, on note que l'implant arrive dans le sinus (*flèche verte*). Là aussi, le praticien peut choisir entre :

- ❖ un implant plus court,
 - ❖ une élévation du plancher sinusien par voie alvéolaire (technique de Summers) ou par un abord latéral (« *sinus lift* »).
- La réalisation du guide chirurgical se fait par transformation du guide radiologique. Il permet de transférer, en bouche, la position choisie de l'implant déterminée lors des étapes précédentes. [6]



Figure 7 : Guide chirurgical sur le modèle en plâtre et en bouche

1.2. Un point sur l'examen radiologique

Les deux moyens à notre disposition pour générer des images tridimensionnelles sont le cone beam ou le scanner. Qu'il s'agisse de l'une ou l'autre des techniques, l'examen radiologique constitue une étape clé de la planification du projet implantaire.

1.2.1. Principes de la tomographie à faisceau conique ou Cone Beam (CBCT)

Le cone beam utilise un faisceau de rayons X conique et de largeur constante. Le principe est identique à celui de la radiologie conventionnelle dont se servent les praticiens tous les jours.

L'appareil effectue une rotation autour de l'objet examiné et réalise une projection sur un capteur numérique à chaque impulsion. Le cone beam permet d'obtenir directement le volume de l'objet par calcul informatique à partir des multiples projections 2D acquises durant la rotation de l'appareil. Ce volume est composé d'une multitude de voxels qui constituent les données brutes (ou « *raw data* ») ; elles sont utilisées pour la reconstruction des images. Les voxels du cone beam sont isométriques, il en résulte deux choses : une fidélité dimensionnelle qui permet de mesurer le volume examiné (image à l'échelle 1/1), et la possibilité de s'affranchir du respect du parallélisme au plan de référence lors de l'acquisition de l'image.

Quant à la résolution de l'image, elle varie selon les constructeurs et la dimension des voxels qui est de l'ordre du quart de millimètre. Il est important d'être rigoureux tout au long de la chaîne radiologique car même un appareil haut de gamme ne corrigera pas une erreur humaine. [1, 10]

1.2.2. Principe de la tomодensitométrie ou scanner (CT-Scan)

Le principe de base du scanner consiste en un ensemble générateur-récepteur diamétralement opposés qui tourne dans un plan (x, y) autour du patient allongé sur une table (axe z) se déplaçant lors de l'émission des rayons X. Lors de l'acquisition, la rotation du

couple générateur-récepteur engendre une multitude de coupes horizontales. Elles sont superposées afin d'obtenir un volume. C'est grâce à la rotation et l'utilisation d'un algorithme qu'il est possible de générer le volume.

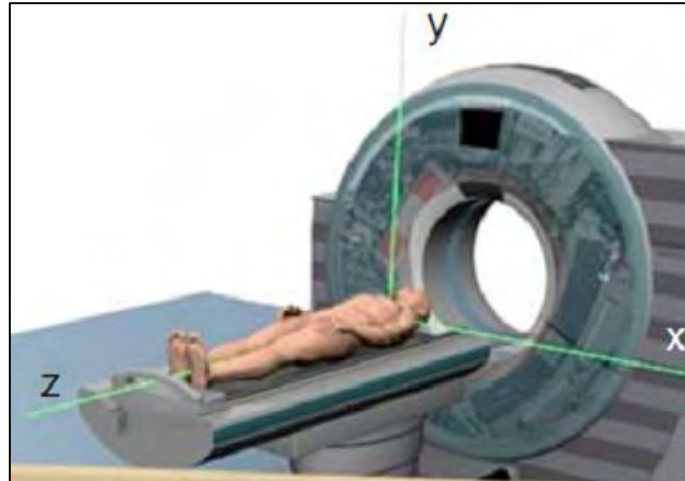


Figure 8 : Représentation des axes du scanner

A l'heure actuelle, les appareils sont capables de réaliser l'acquisition de l'image en quelques secondes, ce qui réduit considérablement le temps de l'examen. De plus, il est important pour notre discipline que l'examen soit réalisé de manière à optimiser la visualisation du guide radiologique ainsi que les structures osseuses et dentaires.

Les voxels du scanner ne sont pas cubiques comme pour le cone beam mais il est possible de créer des images à l'échelle 1/1 en jouant sur les paramètres d'acquisition (épaisseur et chevauchement des coupes). Le patient doit être allongé de manière à ce que les coupes natives soient perpendiculaires à l'axe des futurs implants. [16]

Au fil des années, les constructeurs ont adoptés des stratégies différentes en privilégiant une ou plusieurs caractéristiques telles que la couverture volumique, la résolution spatiale, la résolution temporelle, la rapidité d'acquisition. D'après Masson et al. la taille des détecteurs, et donc la résolution, ne peut être inférieure à 0,5 millimètres sans compromettre le rapport signal/bruit. Si ce rapport diminue trop, l'image est trop granitée et donc impossible à interpréter. [27]

1.2.3. Comparaison des deux méthodes

	SCANNER	CONE BEAM
<u>Taux d'irradiation [9]</u>	Plus important	Moins important
<u>Possibilité d'avoir l'appareil au cabinet</u>	Non	Oui



Figure 9 : Scanner (à gauche) et Cone Beam (à droite)

	SCANNER	CONE BEAM
<u>Sensibilité aux artéfacts métalliques [10]</u>	Plus sensible	Moins sensible
<u>Sensibilité aux artéfacts cinétiques [10]</u>	Moins sensible	Plus sensible

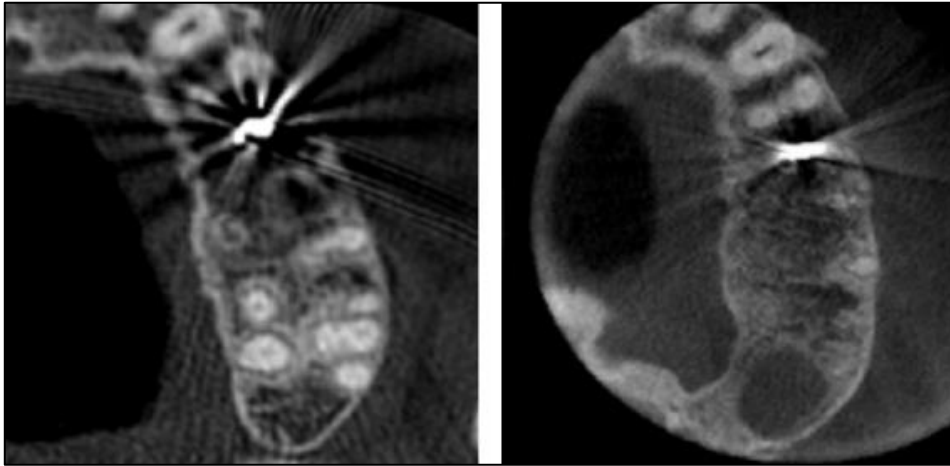


Figure 10 : Comparaison d'un artéfact métallique entre Scanner (à gauche) et Cone Beam (à droite)

	SCANNER	CONE BEAM
<u>Résolution en densité [8]</u>	Meilleure	Moins bonne
<u>Résolution spatiale [8]</u>	Moins bonne	Meilleure

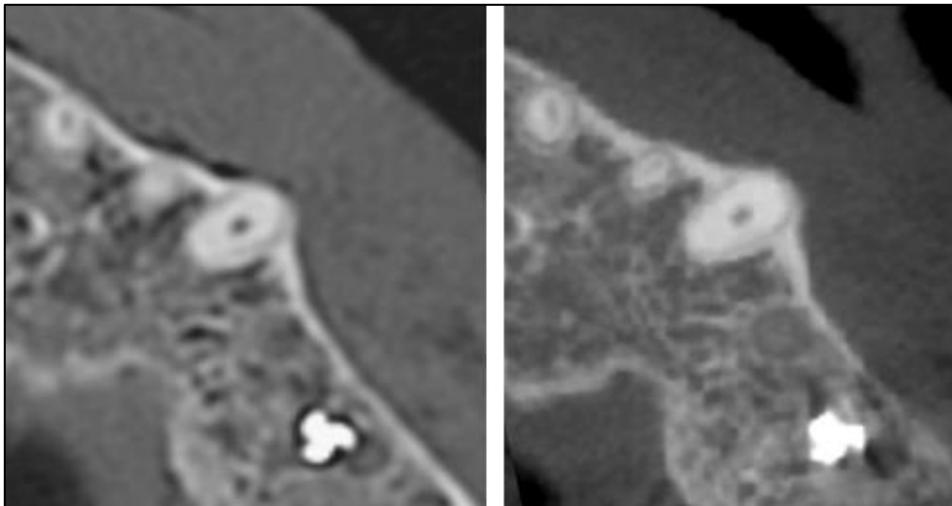


Figure 11 : Comparaison de la résolution spatiale entre Scanner (à gauche) et Cone Beam (à droite)

1.2.4. Importance de l'examen radiologique dans la planification implantaire

Tout d'abord, il faut noter que les données d'acquisitions, que ce soit pour le CBCT ou le CT-Scan, sont au format DICOM (« Digital Imaging and COmmunications in Medecine »). C'est un format universel utilisé en médecine et par les logiciels de planification implantaire. Il a été créé par l'ACR (American College of Radiology) et la NEMA (National Electric Manufacturers Association) en 1985 afin d'avoir des données standardisées entre tous les constructeurs d'appareils radiologiques. [5]

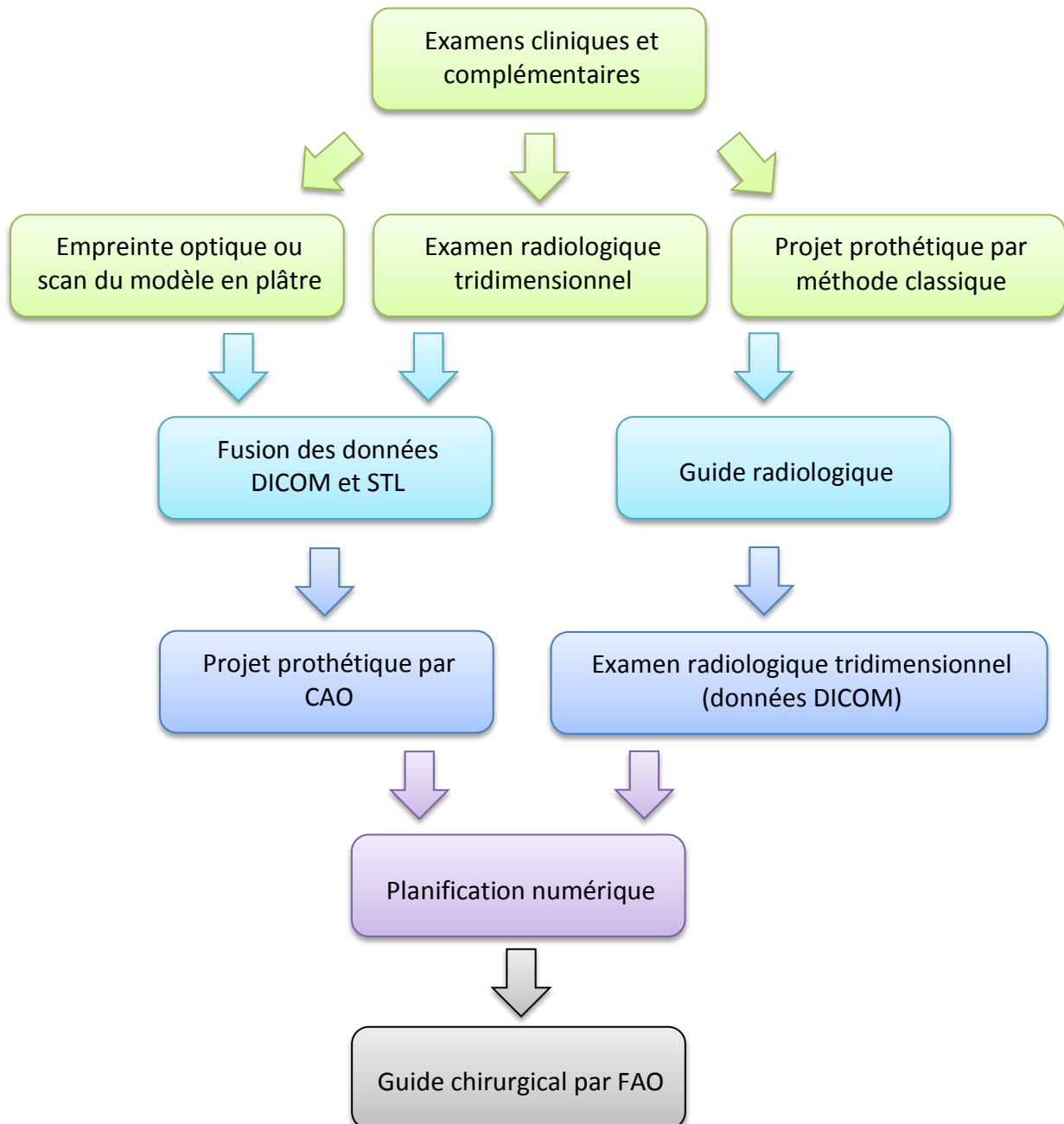
L'examen radiologique nous permet, non seulement d'identifier les obstacles anatomiques à éviter lors de la chirurgie (nerf alvéolaire inférieur, sinus maxillaire, fosses nasales, etc...), mais aussi d'acquérir une information précise sur le volume osseux disponible. C'est grâce à cet examen que l'on peut mettre en rapport le projet prothétique et l'anatomie du patient.

Cependant, on peut se demander à quel point l'examen radiologique est précis. La réponse est apportée par Liang et al. dans une étude de 2010 : il y apparaît que la précision est de l'ordre du quart de millimètre, ce qui correspond à la dimension d'un voxel. Cela entraîne un risque de sous ou surévaluation du volume osseux. En revanche, il est possible de réduire la dimension des voxels pour gagner en précision, mais l'examen risque alors de devenir trop irradiant. [24]

Enfin, avec le développement des appareils cone beam et leurs faible dose d'irradiation, il est clair que l'indication d'un scanner n'est plus en accord avec le principe ALARA.

2. La planification implantaire par la méthode numérique

Avec la méthode numérique, les objectifs de la planification implantaire restent les mêmes qu'avec la méthode conventionnelle. Cependant, comme l'illustre le diagramme suivant, la chronologie des étapes peut être très différentes.



2.1. Définition

Nous avons vu avec la méthode conventionnelle que la planification est linéaire (cf. 1.). La méthode numérique s'appuie sur un tronc commun avec la méthode conventionnelle et l'entrée dans le flux de travail numérique (« *Digital workflow* ») peut se faire à des moments différents selon le système d'aide à la planification.

Selon Armand et al., la planification numérique permet d'appréhender les différents paramètres nécessaires à l'acte chirurgical et comprend [3] :

- la détermination et le marquage des éléments anatomiques,
- la densité et le volume osseux tridimensionnel,
- la détermination de la position des implants sur les coupes axiales, coronales et panoramiques,
- la modélisation tridimensionnelle qui permet de déterminer les axes implantaire idéaux en fonction du projet occluso-prothétique,
- la mesure des espaces entre les implants et les structures à risque (dents restantes ou obstacles anatomiques).

Nous détaillerons ultérieurement comment la méthode numérique nous aide à contrôler ces différents points.

Les logiciels de planification implantaire utilisent les images radiographiques au format DICOM. Ces logiciels comprennent une bibliothèque implantaire qui peut être fermée (les implants disponibles se limitant à un seul fabricant) ou ouverte à tous les fabricants.

Enfin, avec l'exploration du volume osseux et la mise en place des implants de manière numérique avant l'intervention, le praticien se livre à un exercice d'anticipation qui est le cœur même de la planification implantaire. Cela rend son geste opératoire plus sûr et plus fiable. [42]

2.2. Les étapes de planification par la méthode numérique

2.2.1. Conception du projet prothétique

Le projet prothétique sert de point de repère tout au long de la thérapeutique implantaire, c'est celui-ci que l'on doit retrouver en bouche, une fois le traitement fini. C'est pour cela qu'il doit répondre à certains critères :

- il doit rendre compte de la position des dents, leurs dimensions et leurs rapports avec les dents antagonistes,
- il permet d'objectiver le soutien labial, la dimension verticale et l'esthétique,
- il donne au patient une première impression et permet de valider avec lui le projet prothétique pour passer à la suite du traitement. [31]

Le montage directeur est réalisé par la méthode traditionnelle ou alors, numériquement grâce à la Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur (CFAO).

Cependant, s'il existe une prothèse existante adaptée au projet prothétique, elle peut servir de guide pour la suite de la thérapeutique.

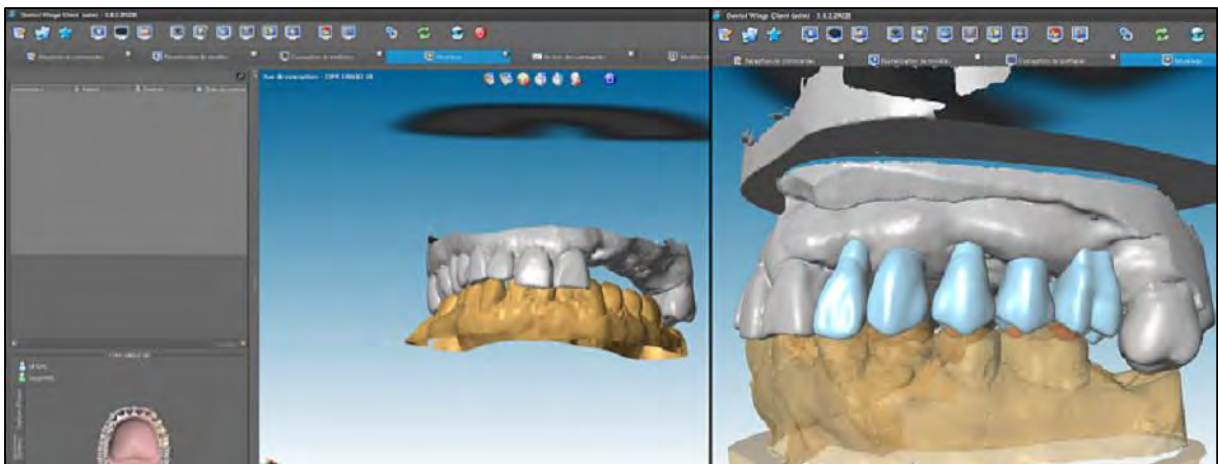


Figure 12 : Conception de projet prothétique sur Dental Wings©

2.2.1.1. Obtention du modèle virtuel

Il existe deux méthodes pour obtenir le modèle virtuel :

- La méthode directe (ou empreinte optique) se fait à l'aide d'une caméra intrabuccale. Un rayon laser est émis et se réfléchit sur l'objet jusqu'au capteur ; grâce au principe de triangulation, la distance à l'objet est mesurée et enregistrée. Elle a l'avantage d'être en couleur et d'apporter des informations sur les tissus mous (ligne muco-gingivale, aspect de la gencive, biotype parodontal) qu'il est impossible d'avoir sur un modèle en plâtre.



Figure 13 : Empreinte optique avec système 3Shape TRIOS®

- La méthode indirecte se fait à l'aide d'un scanner optique de laboratoire. La prise d'empreinte est réalisée de manière conventionnelle avec un matériau classique, puis un modèle en plâtre est coulé à partir de celle-ci. Le modèle est ensuite scanné pour restituer le modèle virtuel sur l'ordinateur. [11]

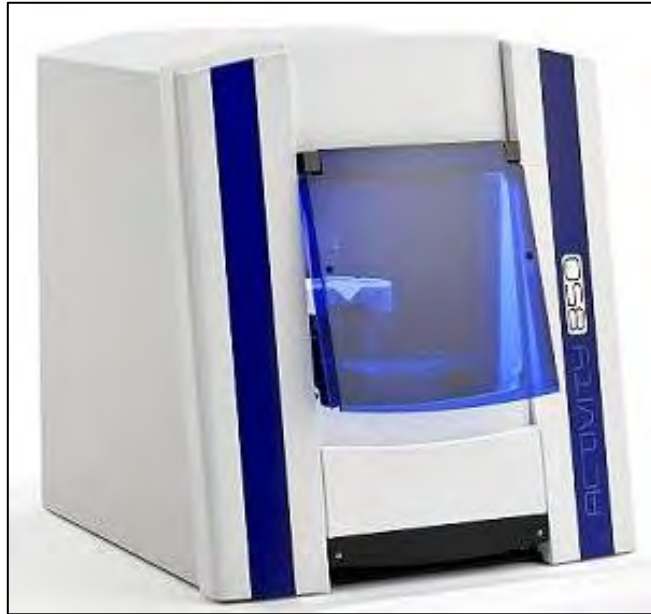


Figure 14 : Scanner optique Acitivity 850 de Smart Optics©

Les scanners optiques fonctionnent sur le principe du balayage de lumière structurée. Des franges lumineuses sont projetées sur l'objet scanné à l'aide d'un vidéoprojecteur LCD (ou d'un laser). Une caméra, décalée par rapport à la source lumineuse, enregistre l'éventuelle déformation de la lumière. La distance entre la source et une multitude de points sur l'objet est calculée par triangulation et permet ainsi de retrouver la forme de l'objet. [35]

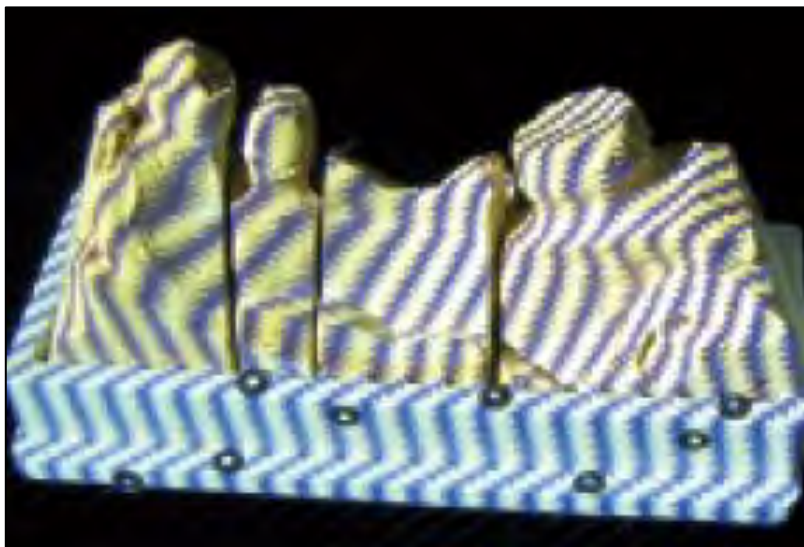


Figure 15 : Enregistrement d'un modèle pour bridge trois éléments en balayage de lumière structurée

2.2.1.2. Analyse des tissus mous

Comme nous venons de le voir, à l'heure actuelle, il est possible de réaliser une empreinte optique en couleur. Elle nous permet, en plus de l'examen clinique, de compléter les informations sur les tissus mous comme si nous avions le patient devant nous. Parmi les paramètres qui peuvent servir lors de la planification on retrouve :

- la ligne muco-gingivale,
- les concavités ou convexités alvéolaires,
- l'aspect de la gencive,
- l'alignement des collets,
- la ligne de fuite des collets,
- le biotype parodontal.

Olsson et Lindhe ont décrit deux biotypes :

- Le parodonte fin, il est fragile et présente peu de tissus attachés. Il est plus sujet à la récession lors d'interventions chirurgicales ou prothétiques. Cependant, il tolère bien les greffes de tissus mous.
- Le parodonte épais, il est fibreux avec une majeure partie de tissus attachés. Il est peu concerné par les récessions mais son caractère fibreux complique les greffes.

[30]



Figure 16 : Parodonte fin (à gauche) - Parodonte épais (à droite)

Le praticien dispose de différentes techniques, que ce soit par greffe ou par déplacement du lambeau, pour gérer au mieux les tissus mous. Lors de l'élaboration du plan de traitement, il est fondamental de prendre en compte ces paramètres, afin d'anticiper au mieux le résultat esthétique et fonctionnel.

2.2.1.3. Analyse occlusale virtuelle

Les logiciels de CAO cités plus haut proposent tous un module d'articulateur virtuel.

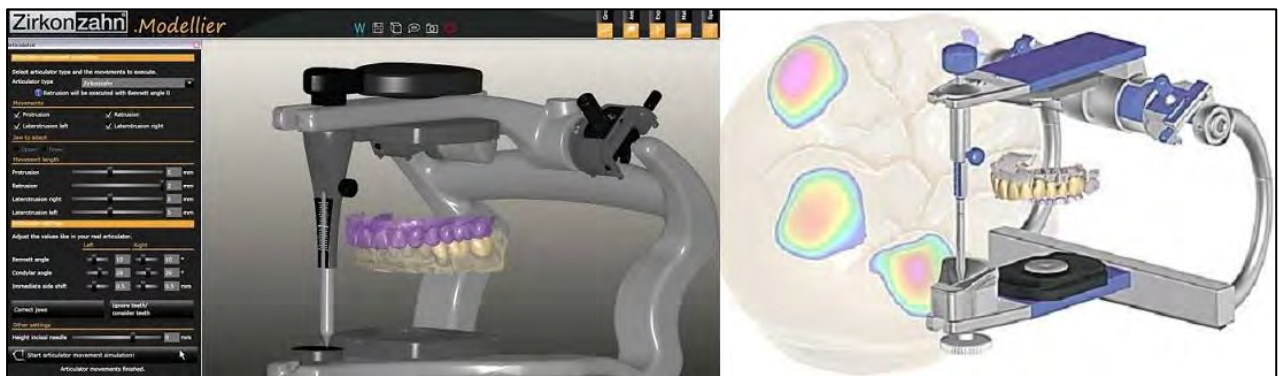


Figure 17 : Module d'articulateur virtuel sur Zirkonzahn (à gauche) - sur Exocad (à droite)

Ils présentent une précision similaire à celle de l'articulateur mécanique. Les paramètres indispensables pour une bonne analyse occluso-prothétique (Angle de Bennett, pente et écartement condyliens) sont entièrement configurables pour se rapprocher au mieux de la situation clinique.

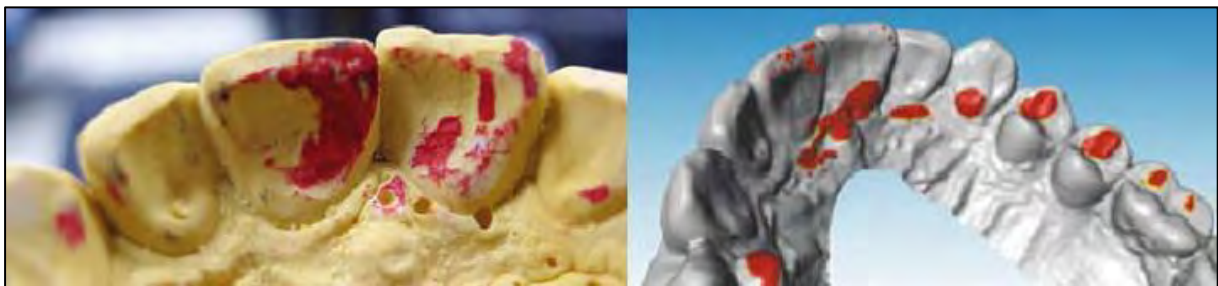


Figure 18 : Comparaison entre contacts réels et virtuels

On peut imaginer, dans un futur assez proche, l'arrivée du procédé de « *motion capture* » issu de l'industrie du cinéma. Il nous permettrait d'enregistrer la cinématique mandibulaire que l'on appliquerait au modèle numérique 3D. A l'heure actuelle, les mouvements étant de trop faible amplitude, ce procédé n'est pas encore au point. Cette technologie, couplée à une bonne relation praticien-prothésiste, nous amènerait à une meilleure précision dans l'analyse occlusale. [19]

2.2.1.4. La CFAO et le prototypage rapide

D'après Dubois et al., le prototypage rapide regroupe un ensemble d'outils qui permettent d'aboutir à des objets à partir d'un fichier numérique. Le système comprend un logiciel de modélisation tridimensionnel avec lequel il est possible de réaliser le projet prothétique, et qui est couplé à une machine-outils qui transforme le projet numérique en projet physique. [15]

Il existe plusieurs logiciels de modélisation tridimensionnelle propre à la prothèse dentaire ; on retrouve entre autres :

- 3Shapedental
- Dental Wings
- Exocad
- Sirona
- Zirkozahn

Les projets réalisés sur le logiciel sont stockés au format STL, format standard pour les logiciels de CAO. [2]

Il existe plusieurs procédés de fabrication par addition :

- La stéréolithographie avancée (SLA) où un faisceau UV balaye un bain de résine qu'il polymérise couche par couche. C'est la technique la plus utilisée.

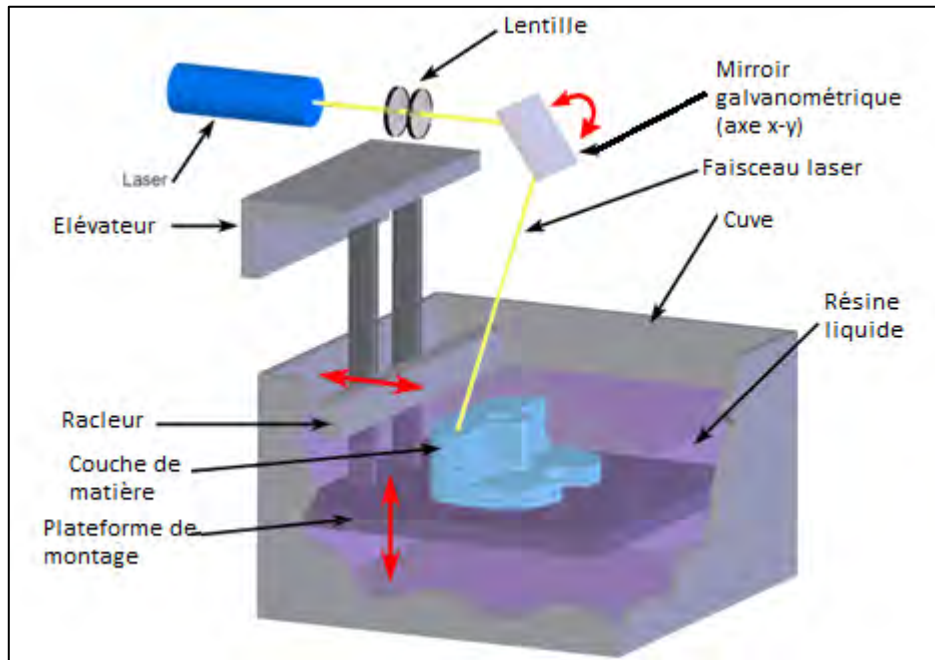


Figure 19 : Principe de la stéréolithographie avancée

- L'impression 3D qui fonctionne comme l'impression traditionnelle à la différence que l'encre est remplacée par un liquide adhésif projeté dans un bain de poudre. L'objet est ainsi réalisé couche par couche.

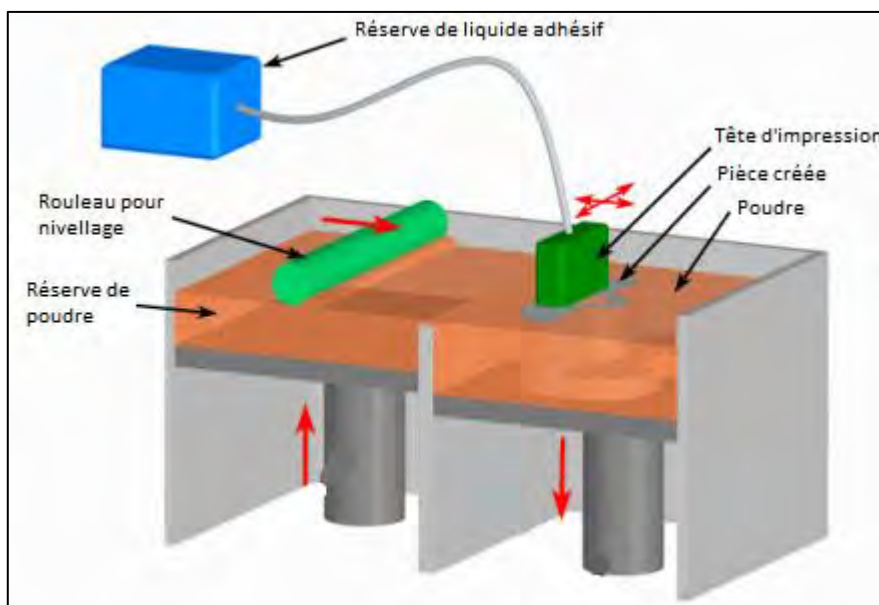


Figure 20 : Principe de l'impression 3D

- L'impression par changement de phase thermique (*Thermal phase change inkjet printing*) utilise la projection d'un matériau thermoplastique en fusion qui se solidifie instantanément.

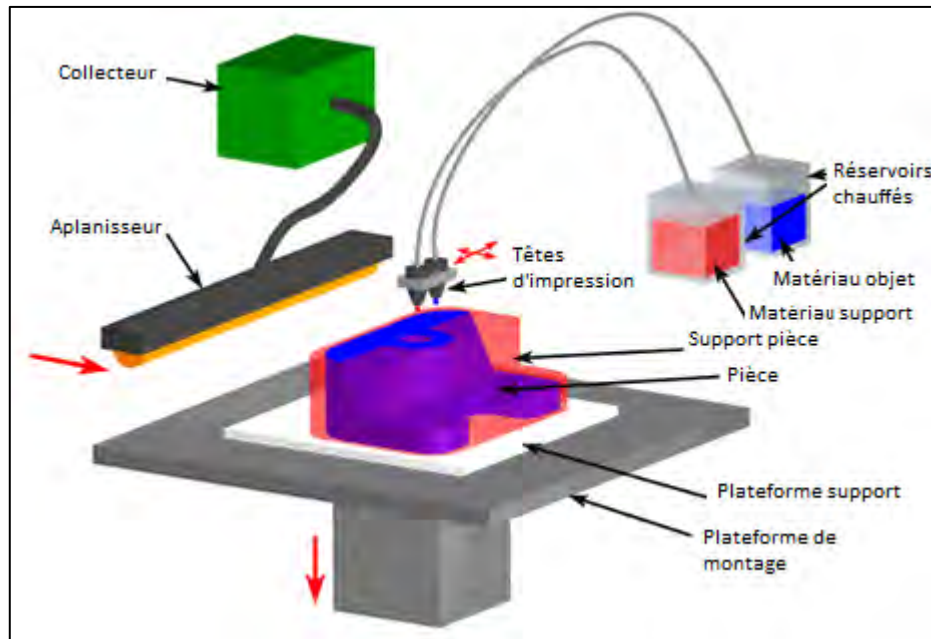


Figure 21 : Principe de l'impression par changement de phase thermique

- L'impression par jet de photopolymères (*Jetted Photopolymer*) combine les techniques d'impression par changement de phase et la stéréolithographie avancée. Le photopolymère est projeté puis polymérisé par un laser dans la foulée. [36]

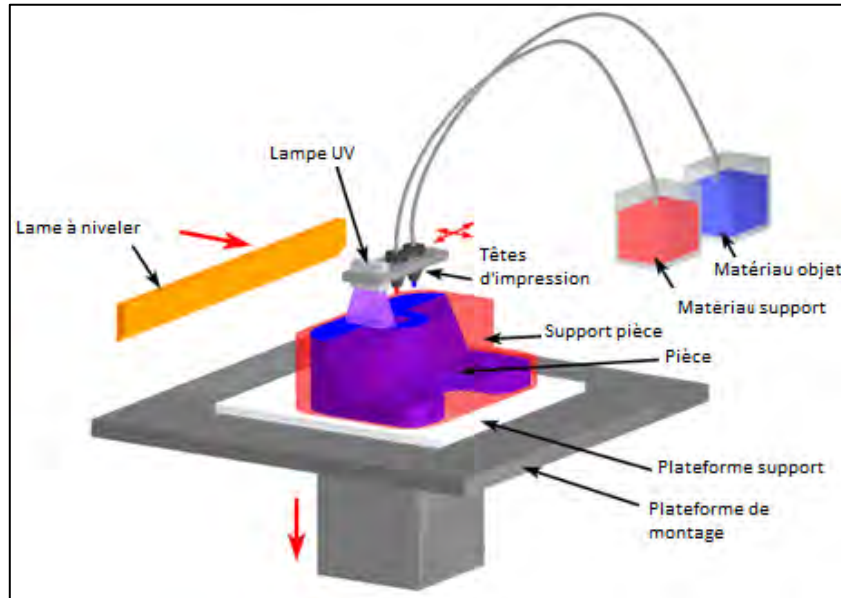


Figure 22 : Principe de l'impression par jet de photopolymères

En plus des techniques de fabrication par addition, les machines-outils peuvent être des usineuses qui procèdent par soustraction. A l'heure actuelle, il est possible d'usiner directement le projet prothétique à l'aide de polymères tels que la résine polyméthylméthacrylate (PMMA) ou le polyétheréthercétone (PEEK).

Ces matériaux, en plus d'être peu onéreux, présentent des propriétés physiques (haute résistance mécanique, rigidité, bonne stabilité dimensionnelle, résistance aux frottement et à l'usure) et chimiques (biocompatibilité, résistance à l'hydrolyse et aux rayonnement à haute énergie) intéressantes pour le domaine médical. Enfin, les blocs d'usinage sont disponibles dans une grande variété de teintes, ce qui permet d'avoir un meilleur rendu esthétique lors de l'essayage.



Figure 23 : PEEK usiné (à gauche) et bloc de PMMA (à droite)

2.2.1.5. Relation clinique/laboratoire de prothèse et « *cloud computing* »

La numérisation des modèles et la création de fichiers informatiques réduit le temps de transfert des informations entre le praticien et le prothésiste. Outre le gain de temps considérable, cela introduit la notion de « *cloud* » dans notre pratique. Selon le National Institute of Standards and Technology (NIST) le « *cloud computing* » est : « l'accès via un réseau de télécommunications, à la demande et en libre-service, à des ressources partagées configurables ». [28]

La plupart d'entre nous se servent déjà de ce système pour le stockage et la consultation de boîtes e-mail, de calendrier en ligne, de photos ou de musique. Avec l'arrivée de données numériques dans la pratique dentaire, le « *cloud* » va devenir un élément clé de notre pratique car il permet au praticien d'avoir une connexion étroite et rapide avec le prothésiste. Les données, stockées sur un serveur sécurisé, sont accessibles par les deux parties. Praticien et prothésiste peuvent partager leurs points de vue et modifier un projet prothétique pour arriver à un résultat optimal.

2.2.2. Essayage et validation du projet prothétique

Lors de l'essayage, on vérifie que le projet prothétique répond aux exigences cliniques. Cette étape permet au patient de valider les choix esthétiques avec le praticien.

Si le praticien ou le patient ne valide pas le travail du prothésiste, il est nécessaire d'identifier les problèmes de manière claire et précise afin de communiquer au prothésiste les modifications à réaliser. Grâce à l'outil numérique, il est facile et rapide de retoucher ou de reprendre l'ensemble du projet prothétique.

2.2.3. Réalisation du guide radiologique

Qu'il s'agisse de la thérapeutique conventionnelle ou numérique, le guide radiologique répond aux mêmes critères. Il doit :

- être rigide,
- être radio-opaque,
- être stable,
- ne pas émettre d'artéfacts,
- permettre d'objectiver la hauteur des tissus mous,
- objectiver l'axe idéal des implants. [29]

Il est réalisé de la même manière pour la méthode numérique que pour la méthode conventionnelle. Cependant, pour le cas d'un édentement total, Nobel Biocare® par exemple recommande dans son protocole d'utilisation de Nobel Guide® des caractéristiques spécifiques au niveau du guide radiologique (épaisseur minimale, recouvrement vestibulaire suffisant, repères radio-opaques suffisants).

Quel que soit le système utilisé, entraîner le patient à positionner correctement le guide est fondamental pour éviter au maximum les erreurs lors de l'examen radiologique.

2.2.4. Examen radiologique

Il n'y a pas de différence par rapport à la méthode traditionnelle lors de l'examen radiologique. Avoir un cliché radiographique dès l'examen clinique amène des informations supplémentaires pour la conception du projet prothétique, car il est possible de fusionner les données DICOM et STL. Le praticien pourra écarter directement les projets prothétiques irréalisables ou informer le patient si celui-ci nécessite une augmentation du volume osseux lors de l'essayage.

De plus, le patient n'aura pas à passer un deuxième examen radiographique avec le guide en place (à l'inverse de ce que l'on pourrait penser). En effet, grâce à la méthode numérique, il est possible de confronter les images radiographiques déjà obtenues avec le projet prothétique validé.

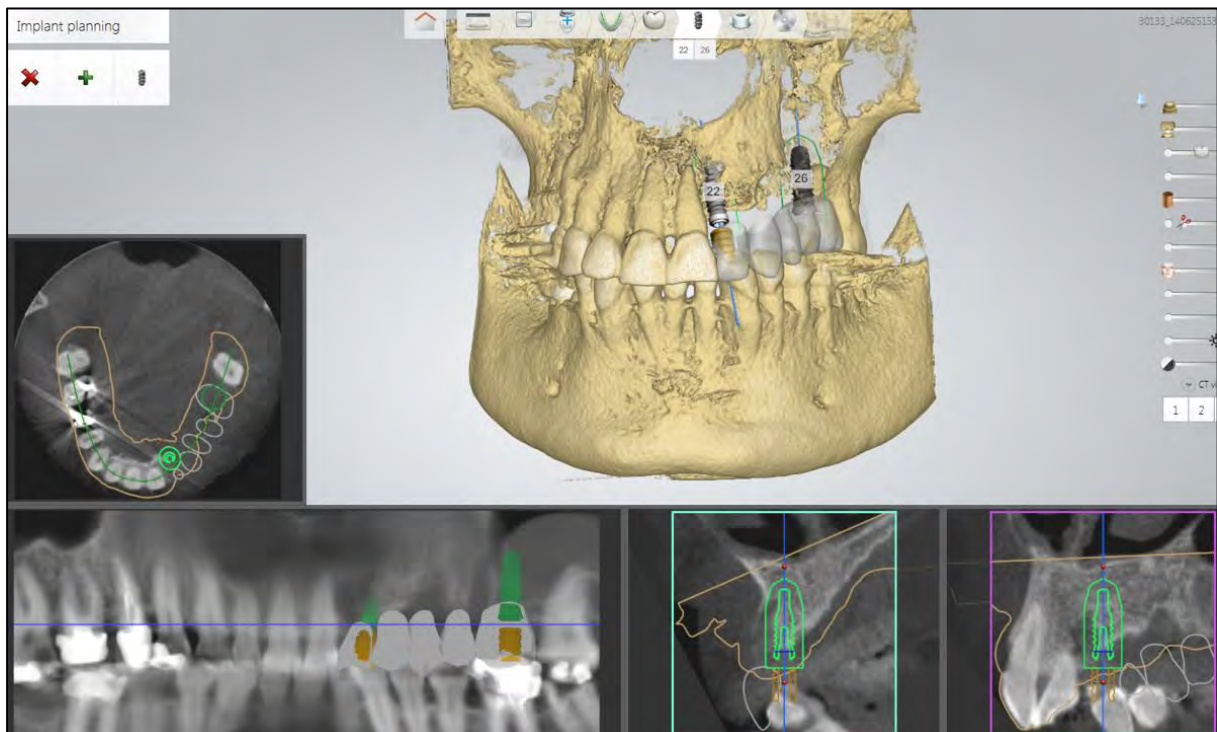


Figure 24 : Planification implantaire sur le logiciel 3Shape Implant Studio®

2.2.5. Utilisation des images radiographiques

Le praticien a maintenant en main tous les éléments nécessaires pour positionner les implants et planifier son intervention.

2.2.5.1. Cartographie du site implantaire [13]

2.2.5.1.1. Volume osseux et densité osseuse

Grâce au logiciel de planification, il est facile de mesurer les zones édentées et d'objectiver la hauteur et la largeur de crête osseuse disponible. Le praticien a une vision plus précise des sites opératoires et peut donc placer les implants dans un espace qu'il n'exploiterait pas forcément. [18]

La densité osseuse se mesure en unité Hounsfield, l'échelle Hounsfield allant de -1000 (densité de l'air) à +1000 (os cortical très dense). Au niveau clinique, connaître la densité osseuse est intéressant pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, la densité de l'os influence la séquence de forage ainsi que la forme de l'implant à choisir. Pour un os dense, le praticien se tournera plutôt vers un implant cylindrique alors que dans un os plus spongieux il choisira un implant conique ou cylindro-conique.

Ensuite, un os moins dense est un os spongieux, donc mieux vascularisé. Il présente un risque de nécrose post-opératoire plus faible comparé à un os dense peu vascularisé.

Enfin, suite à une greffe osseuse pré-implantaire, l'analyse de la densité osseuse permet d'évaluer la qualité de la greffe. Cependant, avec un cone beam les mesures sont moins bonnes qu'avec un scanner car le CBCT présente une résolution en densité moindre.

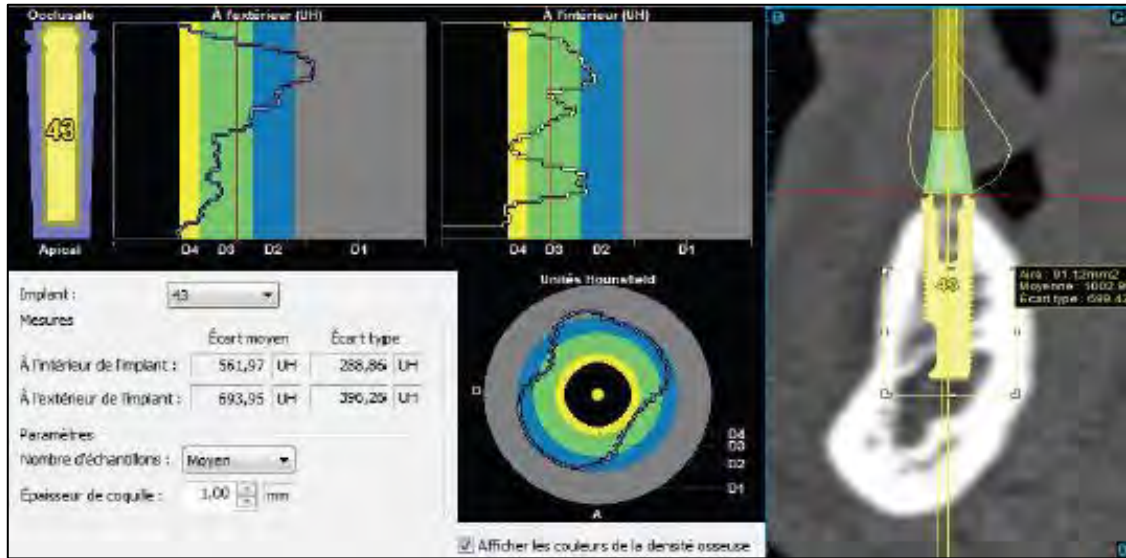


Figure 25 : Calcul de densité osseuse sur le logiciel Simplant®

2.2.5.1.2. Repérage des obstacles anatomiques

Le nerf alvéolaire inférieur est l'obstacle principal à la mandibule. Il revient au praticien de le repérer en le pointant sur les coupes obliques ; le logiciel relie alors les points et fait apparaître le nerf en couleur sur toutes les coupes. On note en rose le nerf alvéolaire inférieur et en bleu les différents points choisis par le praticien (Fig. 24).

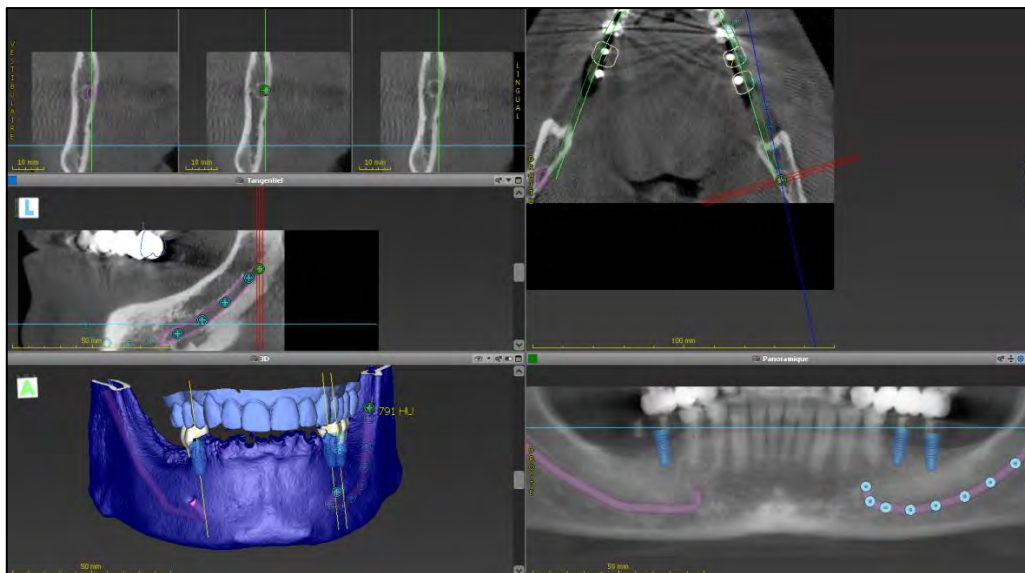


Figure 26 : Repérage du nerf alvéolaire inférieur sur coDiagnostiX™

La membrane sinusienne se repère facilement sur les images radiographiques. De plus, la distance entre l'implant et les différents obstacles anatomiques est mesurée en permanence. Les logiciels alertent le praticien à partir du moment où un implant est positionné à une distance trop proche d'un obstacle quelconque ou s'il y a fenestration osseuse.

2.2.5.2. Fusion des données STL et DICOM

Certains logiciels permettent de fusionner les données DICOM avec les données STL. Pour faire cela, le praticien détermine des points repérables facilement (les sommets cuspidiens par exemple) sur les deux types de données et la fusion se fait par calcul informatique. [23]

Nous avons une information plus précise sur la hauteur des tissus mous au niveau de la région implantaire et de ce fait une meilleure idée sur :

- l'axe idéal de l'implant en fonction du projet prothétique,
- la nécessité d'une augmentation des tissus mous,
- la dimension du pilier de cicatrisation à utiliser,
- le pronostic de cicatrisation et le résultat esthétique.

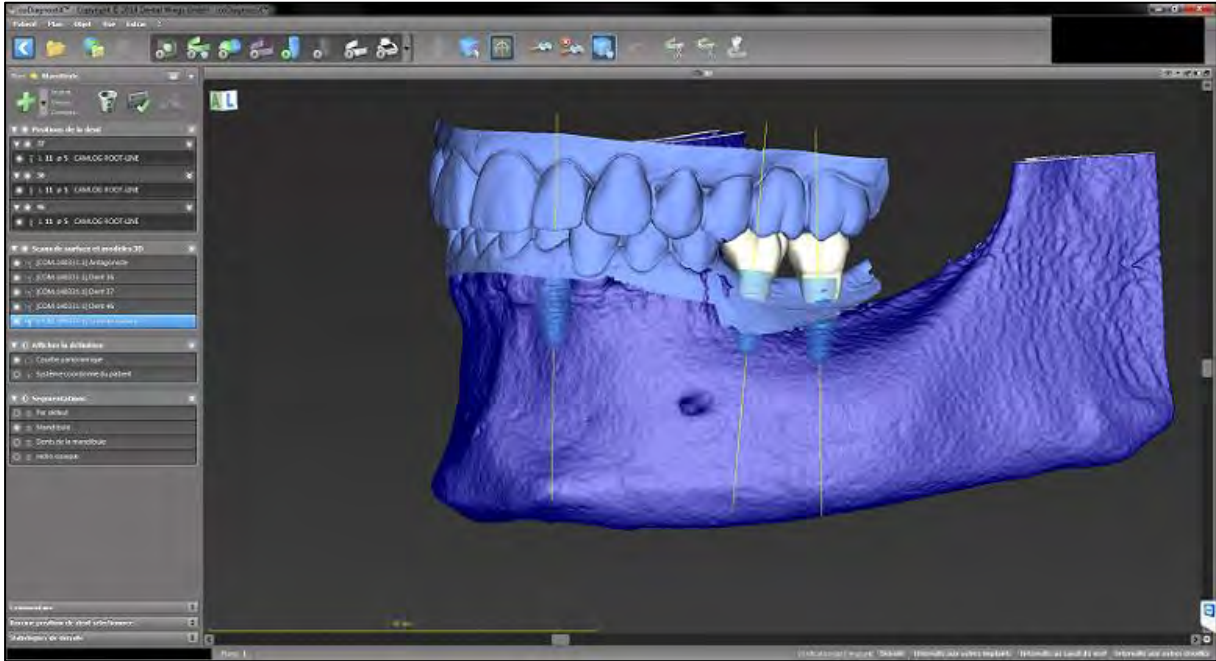


Figure 27 : Fusion des données DICOM (bleu foncé) et des données STL (bleu clair) sur coDiagnostiX™

S'il n'y a plus de points de repères, il est nécessaire de passer par une procédure de double scan. Pour se faire, le praticien place plusieurs repères radio-opaques (au minimum 3) sur le guide radiologique. Ils sont positionnés à distance les uns des autres et ne doivent pas être alignés.

Une fois les repères en place, le guide radiologique est scanné seul mais dans la même position spatiale qu'en bouche (pour générer un premier jeu d'images). Ensuite le patient passe un examen radiographique avec le guide en place (pour générer un second jeu d'images). Ces deux jeux d'images sont fusionnés et le résultat permet d'obtenir les informations citées plus haut. [44]

2.2.5.3. Choix des implants

Avec ces informations, le praticien a tous les éléments pour placer l'implant dans une position idéale. Les critères de positionnement de l'implant sont exactement les mêmes que pour la méthode conventionnelle.

Le logiciel nous alerte si les paramètres de bon positionnement d'un implant ne sont pas respectés. Le praticien effectue ainsi sa planification et voit s'il y a la nécessité ou non d'un aménagement osseux pré- ou per-implantaire dans le sens transversal ou vertical (greffe osseuse, régénération osseuse guidée ou « *sinus lift* »).

Sur la figure suivante, on remarque en rose les implants avec leurs axes qui se prolongent à travers le projet prothétique en blanc ainsi que le nerf alvéolaire inférieur en orange (Fig. 26).

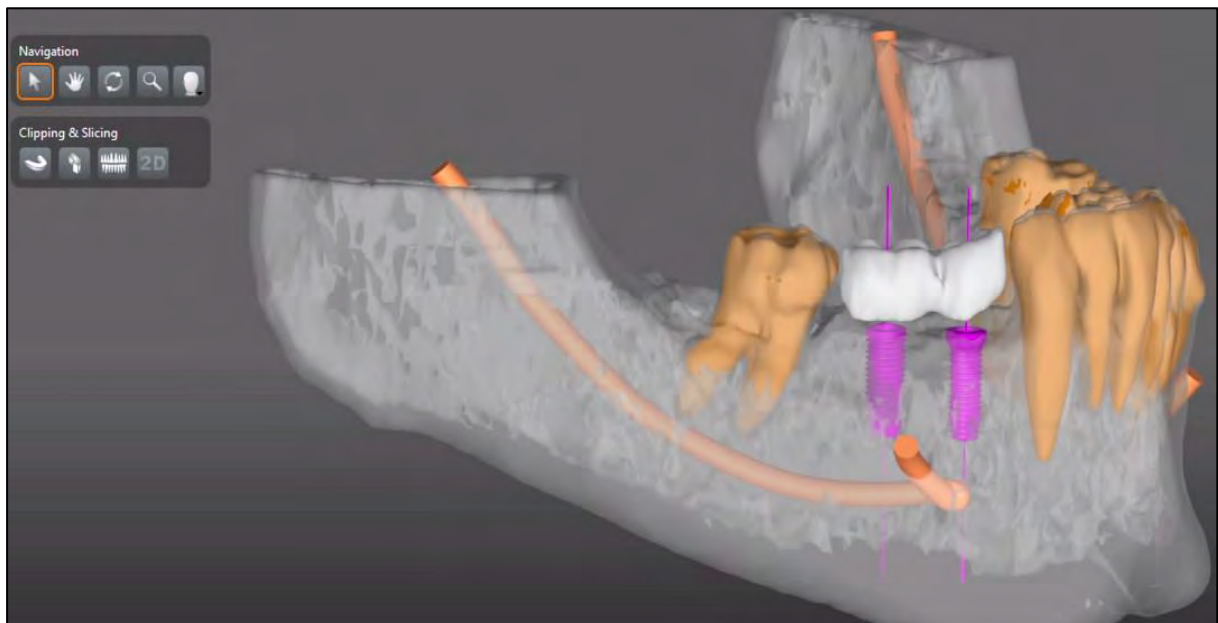


Figure 28 : Positionnement des implants sur le logiciel Simplant®

2.2.6. Réalisation du guide chirurgical

C'est la dernière étape de la planification. Elle précède la chirurgie. Le guide est réalisé en trois temps :

- 1) Réalisation du guide par stéréolithographie avancée où 80% de la polymérisation est faite.
- 2) Passage dans un four à ultra-violet pour achever la polymérisation.
- 3) Elagage des parties support et ajout des manchons métalliques au niveau des voies de passage des forets. [33]

Les fournisseurs de systèmes d'aide à la planification implantaire proposent d'envoyer le guide chirurgical une fois que la planification est validée par le praticien.



Figure 29 : Guide chirurgical stéréolithographié

2.3. Les différents systèmes disponibles sur le marché

Avec l'essor qu'a connu le numérique, de nombreux logiciels sont actuellement utilisables. Cependant, ils ne sont pas tous équivalents, non pas en terme de qualité mais en terme de fonctionnalités. De plus, le passage du modèle physique au modèle numérique, l'entrée dans le « *digital workflow* », se fait à des temps différents de la démarche diagnostique. Nous allons faire une liste non exhaustive des logiciels les plus connus.

2.3.1. Simplant®

Simplant® est l'un des logiciels les plus populaires et c'est le premier à avoir été mis au point pour réaliser des planifications numériques. Il existe depuis 1993 et est actuellement commercialisé par la société Materialise Dental, basée à Louvain en Belgique mais présente dans le monde entier. Sa bibliothèque implantaire est ouverte. [40]

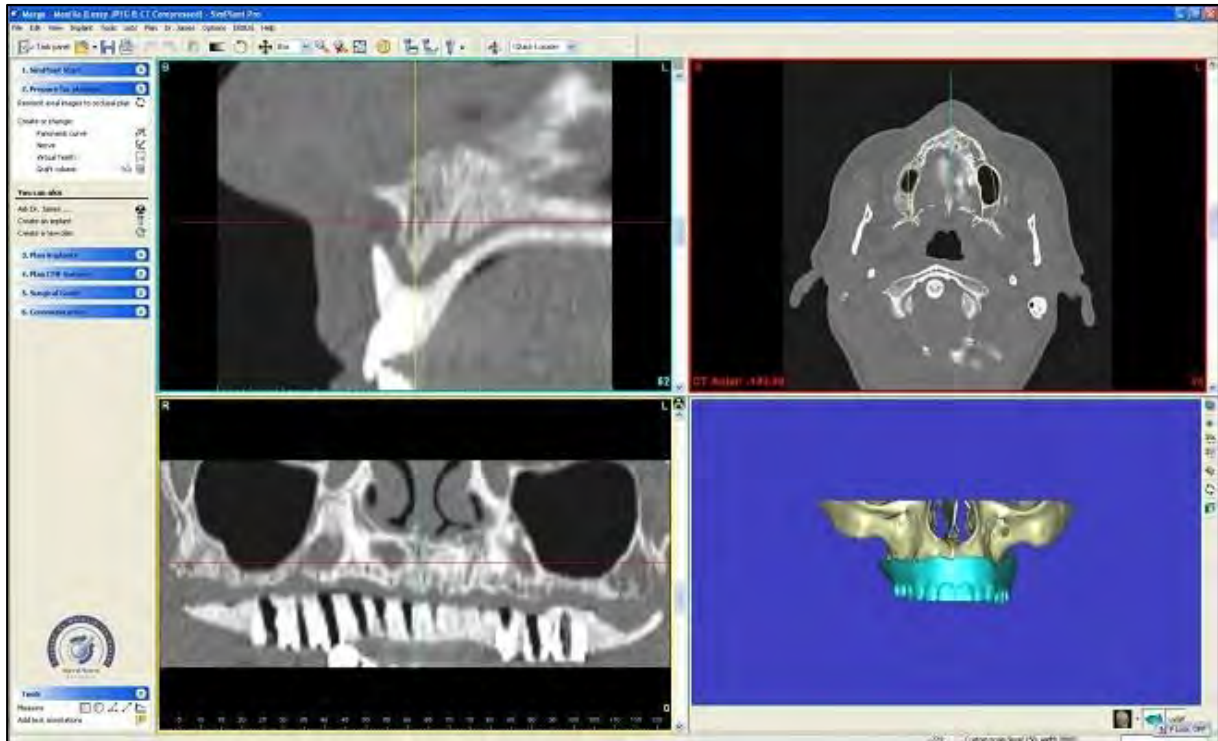


Figure 30 : Capture d'écran du logiciel Simplant®

Ce logiciel présente, entre autre, une fonction permettant d'anticiper la quantité de matériaux de comblement nécessaire lors d'une greffe osseuse. Lors de la planification, s'il y a une fenestration ou un manque d'épaisseur, le logiciel nous le signale et calcule la quantité de biomatériaux nécessaire pour l'augmentation osseuse.

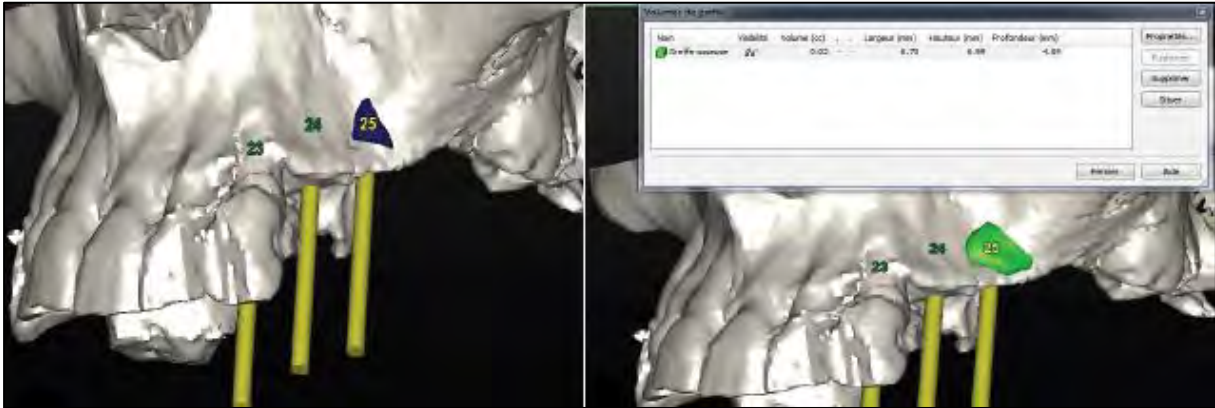


Figure 31 : Fenestration vestibulaire (en bleu à gauche) - matériau nécessaire (en vert à droite)

2.3.2. NobelClinician®

Ce logiciel est commercialisé par la société Nobel Biocare® (Göteborg, Suède). Il est à noter que le logiciel NobelClinician® possède une bibliothèque implantaire ouverte. [41]

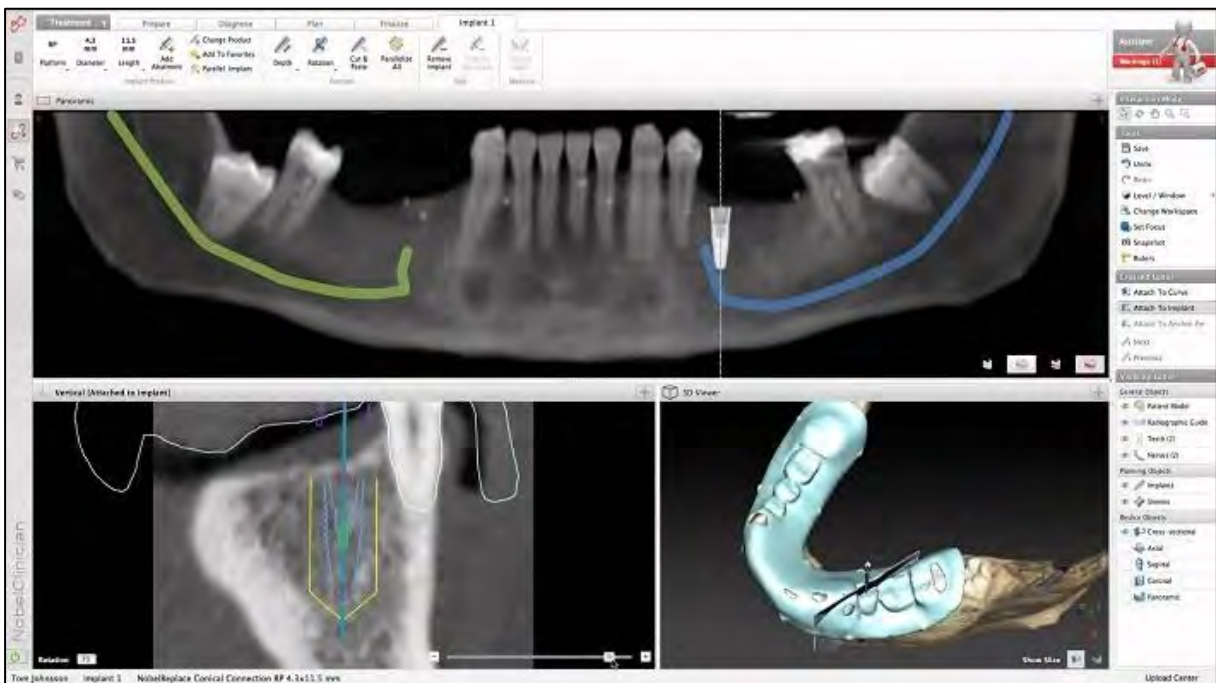


Figure 32 : Capture d'écran du logiciel NobelClinician®

Nobel Biocare® propose d'accéder par le biais de son logiciel NobelClinician® à son système de « *cloud* » NobelConnect®. Il permet de mettre en relation tous les acteurs de la thérapeutique, de stocker et d'accéder aux données à n'importe quel moment en toute sécurité.

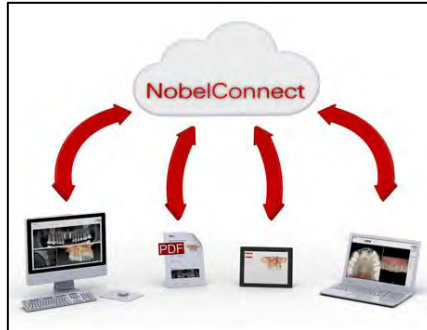


Figure 33 : NobelConnect®

2.3.3. coDiagnostiX™

Ce logiciel, auparavant distribué par Straumann, est actuellement commercialisé par Dental Wings (Montréal, Canada). Avec plus de 2000 implants et la possibilité d'importer dans le logiciel n'importe quelle autre banque d'implants, sa bibliothèque implantaire est entièrement ouverte. Un des gros avantages de ce logiciel est qu'il permet de produire le guide chirurgical par une machine d'usinage ou par une imprimante 3D directement au laboratoire (ou au cabinet s'il est équipé). Ce qui n'est pas le cas avec les deux précédents. [37]

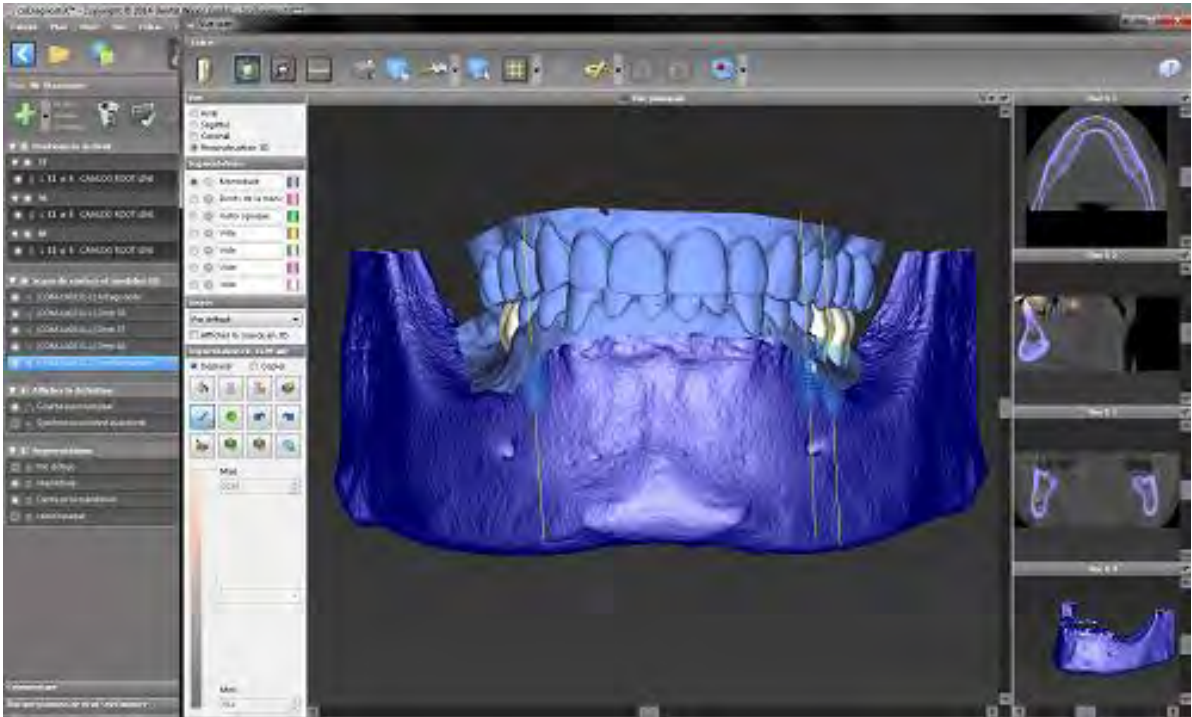


Figure 34: Capture d'écran du logiciel coDiagnostiX™

Avec le système CoDiagnostiX™, il est possible, à l'aide d'une empreinte optique, de réaliser le guide chirurgical après la première consultation. En effet, il est envisageable pour les cas peu complexes de poser les implants dès la 2^{ème} séance. Le logiciel se sert des points de repères déjà existant (notamment les couronnes des dents restantes) pour fusionner les données DICOM – STL. La planification numérique se fait dès la fin de la première séance grâce à la combinaison des informations. [17]

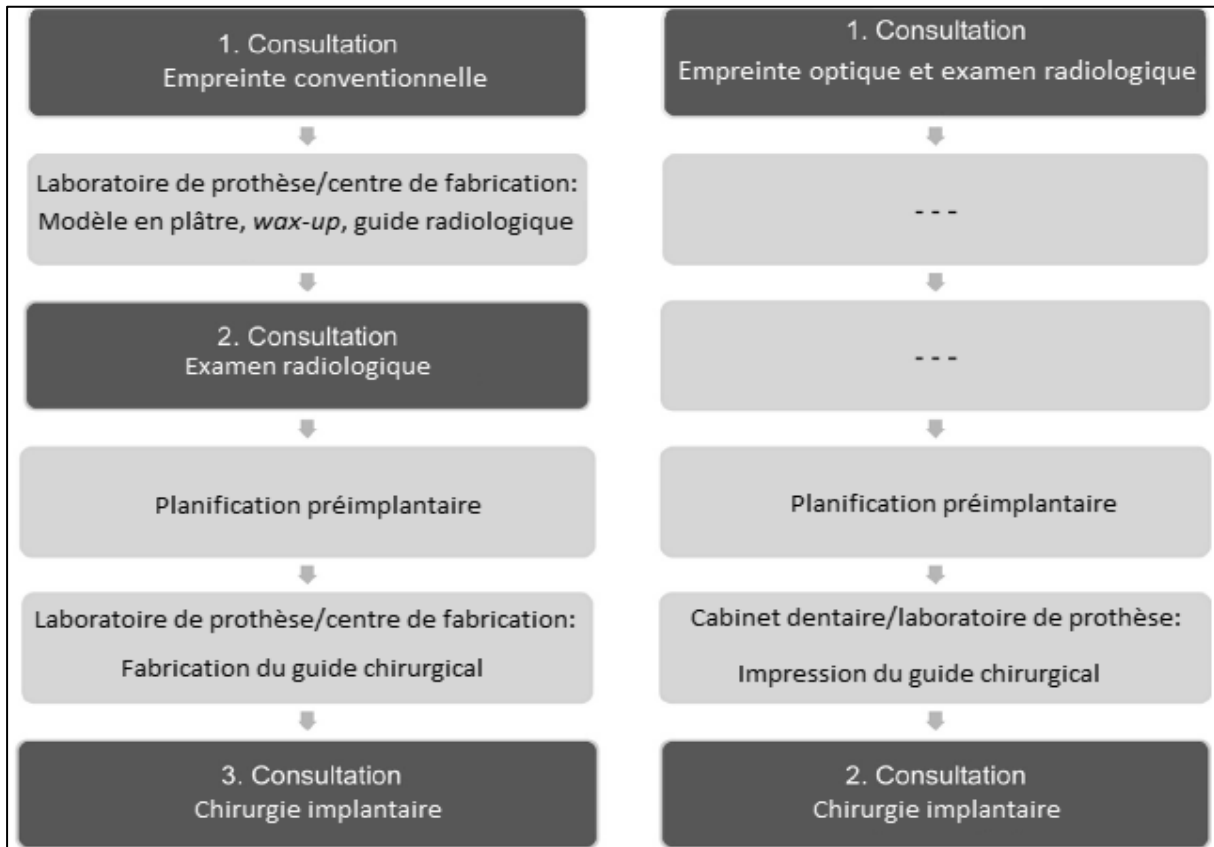


Figure 35 : Etapes conventionnelles de la production du guide chirurgical (à gauche) contre la méthode numérique (à droite)

2.3.4. Invivo5®

Ce logiciel est développé et commercialisé par Anatomage (San José – Californie, États-Unis). Pour l’anecdote, Anatomage est la société qui a développé la table numérique permettant de faire des dissections virtuelles pour l’enseignement médical. Sa bibliothèque comprend la plupart des grands systèmes. [34]

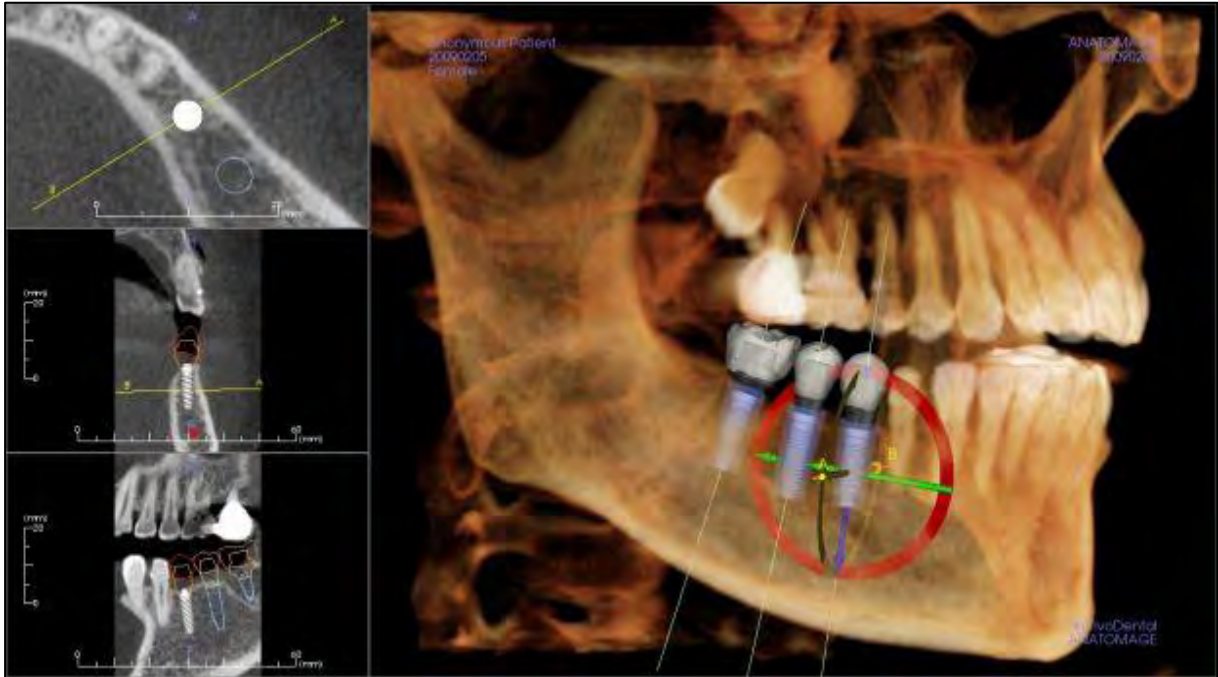


Figure 36 : Capture d'écran du logiciel Invivo5®

Invivo5® a la particularité de regrouper plusieurs fonctionnalités en un seul logiciel. Il est possible de visionner les radiographies au format DICOM et même de fusionner plusieurs radiographies pour les cas où le champ d'acquisition est trop étroit. De plus, il permet de réaliser des planifications implantaire ; mais aussi des planifications orthodontiques ainsi que de la CAO.

2.3.5. EasyGuide®

Le logiciel EasyGuide® est commercialisé et développé par la société Keystone Dental (Burlington – Vermont, États-Unis). La bibliothèque implantaire ouverte comprend la plupart des systèmes disponibles sur le marché. [39]

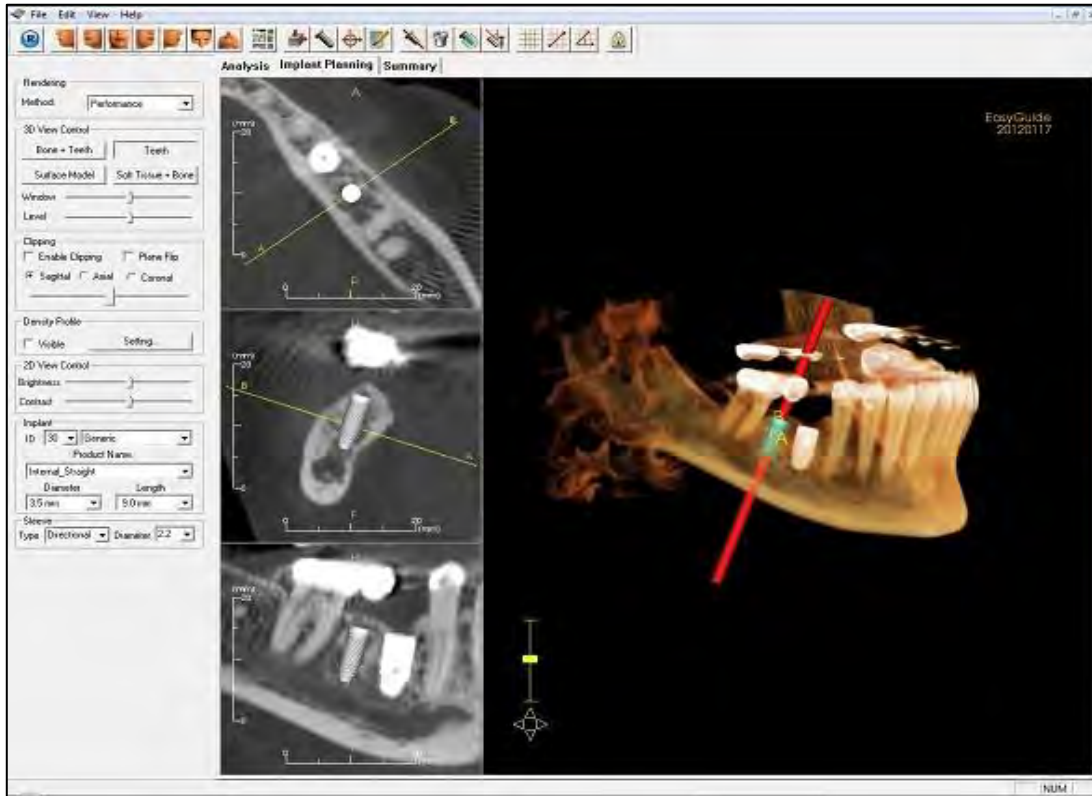


Figure 37 : Capture d'écran du logiciel EasyGuide®

Le système EasyGuide® a pour argument principal une précision accrue lors de la transformation du guide radiologique en guide chirurgical. Un marqueur en forme de « X » est introduit dans le guide radiologique. Une fois que le praticien a fait sa planification, le fabricant récupère les données et dispose, grâce au marqueur, d'un point de référence stable pour réaliser le guide chirurgical.



Figure 38 : Guide radiologique EasyGuide® avec le marqueur X

2.3.6. Robodent®

Le système Robodent® est un système de robotique passive qui guide le chirurgien à l'aide de « cibles » sur un écran d'ordinateur lors de la mise en place de l'implant. Il peut être comparé au G.P.S. des automobiles. Cependant, le chirurgien garde le contrôle total de l'acte et peut modifier de manière extemporanée son geste. Le logiciel Robodent® est développé et commercialisé par la société RoboDent (Ismaning, Allemagne).

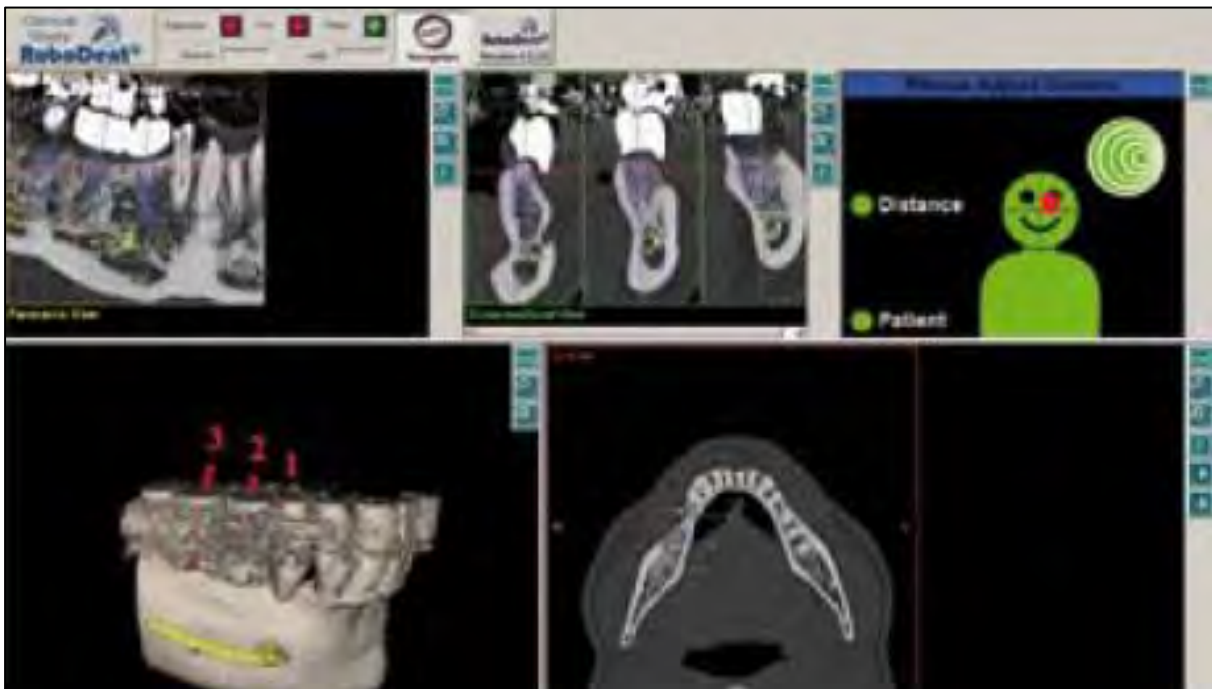


Figure 39 : Capture d'écran du logiciel Robodent©

Avec Robodent®, la conception du projet prothétique se fait de manière traditionnelle. L'entrée dans le numérique ne se fait qu'à partir du positionnement des implants. Le guide radiologique prend la forme d'une gouttière et présente une logette qui accueille l'arc de navigation, celui-ci contient des index en titane qui servent de repères lors de la phase chirurgicale.



Figure 40 : Guide radiologique Robodent® avec arc de navigation (à droite)

Une fois la chirurgie planifiée, la phase chirurgicale se fait avec pour repères l'arc de navigation et les traqueurs optiques fixés sur l'arc et la pièce à main. Le logiciel identifie le foret et la position de celui-ci grâce à la caméra télémétrique qui capte la position des traqueurs. Le praticien est guidé au travers d'une cible et d'une jauge sur l'écran d'ordinateur ; il doit dissocier « les yeux de la main ». [3]



Figure 41 : Traqueurs optiques (à gauche) – caméra télémétrique (à droite)

3. Apports de la méthode numérique et comparaison des deux méthodes

3.1. Conservation et multiplication des possibilités

Tout d'abord, contrairement à la méthode conventionnelle, l'outil informatique permet de conserver toutes les données concernant la situation initiale du patient. Les modèles d'études numériques, les radiographies pré et post-extractionnelles ainsi que les éventuels projets prothétiques réalisés lors de la phase diagnostique sont stockés et accessibles à tout moment. Le praticien peut alors s'appuyer sur des points de repère naturels pour établir le plan de traitement.

Ensuite, grâce à l'outil numérique, il est facile d'envisager plusieurs projets prothétiques acceptables. Avec le prototypage rapide, il est possible de réaliser les projets retenus pour les proposer au patient. Le dentiste a ainsi la possibilité de naviguer entre les différentes options thérapeutiques, et d'en discuter avec le patient de manière transparente.

En résumé, il n'y a aucune perte d'informations, elles sont accessibles par le praticien ou le prothésiste tout au long du traitement. De plus, il est possible de proposer au patient une ou plusieurs solutions thérapeutiques en exposant clairement les avantages et les inconvénients de ces dernières.

3.2. Gain en précision

Dans un premier temps, on note deux choses qui aident le chirurgien lors de la planification :

- La possibilité de mesurer les dimensions et la densité osseuse. Cela permet au praticien d'éviter au mieux les obstacles anatomiques et d'anticiper sur la séquence de forage. De ce fait, il gagne en précision au moment de choisir et de positionner les implants. [18]

- Sur l'écran du logiciel de planification, le praticien a une vision globale de l'anatomie osseuse du patient. Il voit simultanément les plans sagittaux, les plans axiaux, les coupes obliques et une reconstruction tridimensionnelle. Une fois l'implant positionné, quelques soient les modifications apportées à l'implant, celles-ci se répercutent en temps réel dans les trois sens de l'espace. En comparaison avec les calques implantaires, le gain en précision est important.



Figure 42 : Capture d'écran du logiciel GALILEOS Implant de Sirona©

Dans un second temps, pour illustrer le gain en précision que nous apporte la méthode numérique, nous allons nous appuyer sur un cas clinique.

Un homme de 67 ans souhaite réhabiliter son édentement postérieur mandibulaire (Classe 2.2 de Kennedy). A l'examen clinique et radiographique, il présente des dents parodontolysées, un volume osseux résiduel insuffisant ainsi qu'une crête postérieure très fine (Fig. 44).



Figure 43 : Vue occlusale des dents résiduelles (à gauche) - orthopantomogramme (à droite)

La décision est prise d'avulser les dents restantes et de réaliser une ostéotomie de la crête osseuse jusqu'à retrouver une épaisseur suffisante pour accueillir les implants. Grâce au logiciel, avec la numérisation du modèle, il est possible de simuler les extractions ainsi que l'abrasion de la crête. Pour ne pas supprimer trop d'os, un gabarit est réalisé par stéréolithographie.

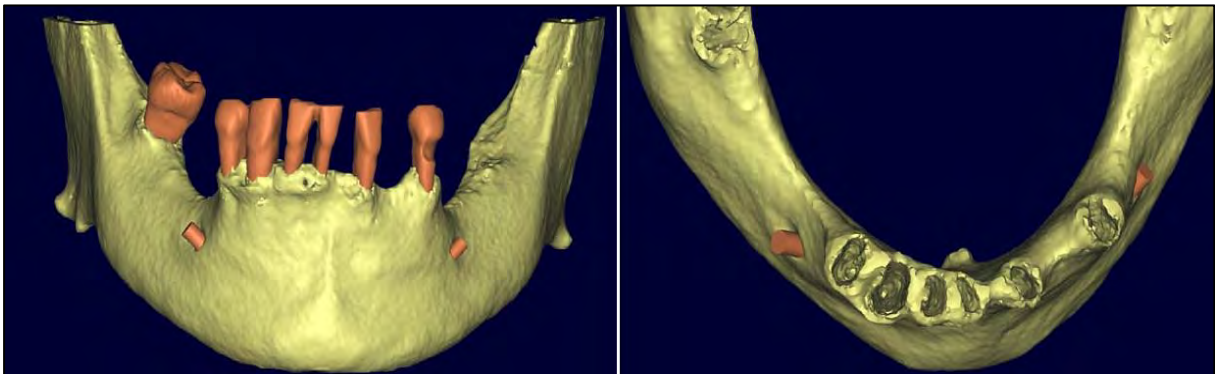


Figure 44 : Modèle numérique (à gauche) - simulation des extractions (à droite)

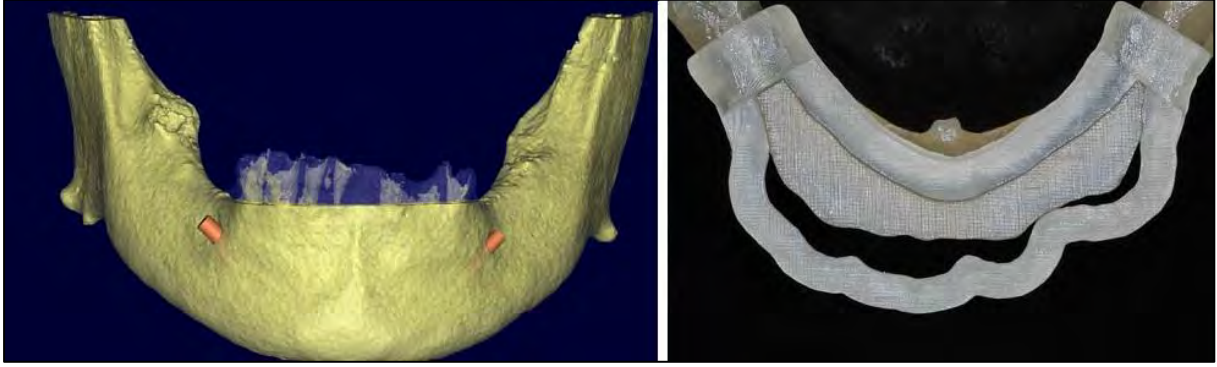


Figure 45 : Volume de l'ostéotomie en bleu (à gauche) - gabarit de guidage (à droite)

Une fois que l'épaisseur d'os souhaitée atteinte virtuellement, le praticien réalise la planification de la position des implants en gardant les dents sur le modèle numérique. De ce fait, il aura un meilleur respect de l'axe naturel des dents du patient (*Fig. 47*).

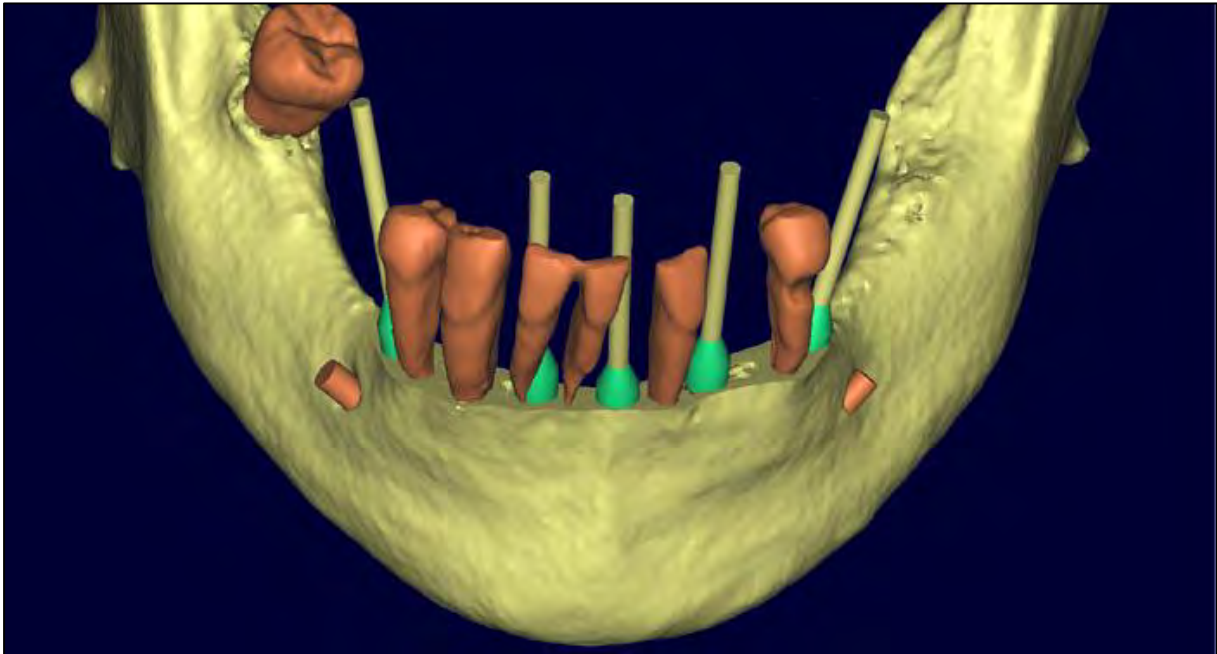


Figure 46 : Planification implantaire avec l'os aplani mais les dents toujours en place

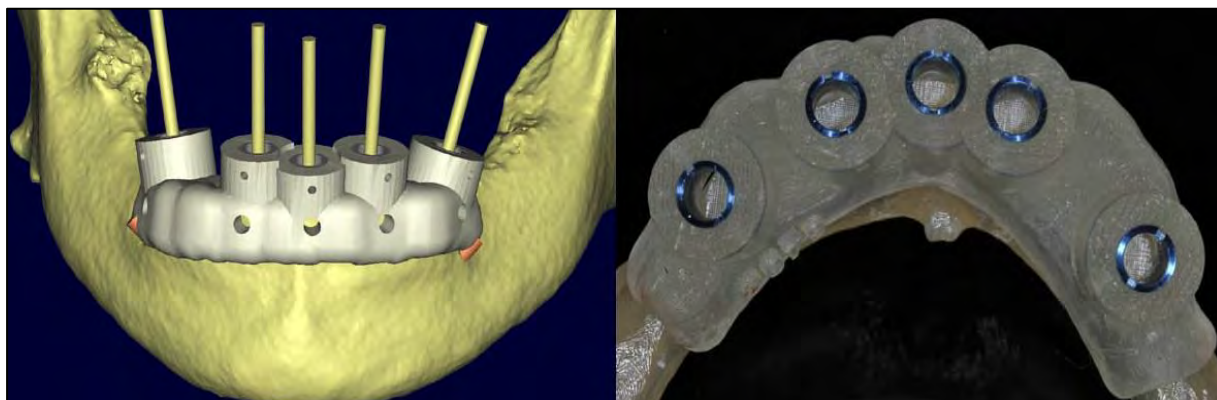


Figure 47 : Conception du guide radiologique (à gauche) - guide radiologique placé sur le plateau mandibulaire (à droite)

Une fois le guide chirurgical fabriqué, les implants sont mis en place. Ils accueilleront une prothèse hybride qui, grâce au modèle numérique, aura une morphologie similaire aux dents du patient.

La méthode numérique apporte donc des outils nous permettant de faire des simulations sur modèle numérique. Le résultat prothétique est amélioré grâce à une chaîne préliminaire bien menée. [38]

3.3. Outils de communication et pédagogique

Grâce aux logiciels, le praticien peut expliquer au patient toute la thérapeutique en lui montrant directement les sites implantaire, la place que va prendre le futur implant ainsi que le projet prothétique. Le patient est informé sur les avantages et les inconvénients ainsi que les risques liés aux différentes solutions possibles. Le support numérique est un outil de choix pour faire passer les informations et recueillir le consentement éclairé du patient. En effet, le praticien peut survoler avec le patient les coupes radiographiques, le côté dynamique de l'informatique rend les choses plus compréhensibles en comparaison avec des planches radiographiques peu lisibles pour les néophytes. [13]

On note également que l'outil informatique a un côté pédagogique très intéressant. Les logiciels sont en général très intuitifs et les enseignants peuvent facilement laisser les étudiants positionner les implants, les déplacer, naviguer au niveau des coupes sans craintes.

3.4. Meilleures suites opératoires pour le patient

Avec la chirurgie implantaire assistée par ordinateur, il est possible, dans certains cas, de poser des implants sans lambeau (« *flapless* »). Cependant, les indications sont précises. Il est nécessaire d'avoir une crête osseuse large, sans concavité et suffisamment recouverte de gencive attachée kératinisée. Cette opération possède les avantages suivants :

- cicatrisation plus rapide et résorption osseuse diminuée (car le périoste reste intact donc amène une meilleure vascularisation),
- baisse du risque infectieux (porte d'entrée bactérienne plus petite),
- risque hémorragique plus faible. [3]

Il faut ajouter à ces avantages un temps opératoire plus court. Cela est valable même pour les techniques avec lambeau car le chirurgien aura déjà effectué l'opération mentalement lors de la planification sur l'ordinateur.

Tous ces avantages amènent de meilleures suites opératoires pour le patient, aussi bien sur le plan physiologique (douleur, cicatrisation) que sur le plan psychologique.

3.5. Gain de temps et réduction des coûts

La méthode numérique permet un gain de temps à plusieurs niveaux et notamment lors de la conception du projet prothétique. Prenons l'exemple d'un édentement partiel bilatéral postérieur maxillaire (Classe I de Kennedy) :

- Avec la méthode conventionnelle, le prothésiste doit réaliser un « *wax-up* » qui prend beaucoup de temps, d'autant plus s'il y a des retouches à faire.
- Avec la méthode numérique, grâce au logiciel de CAO, le projet prothétique se fait rapidement. S'il y a des retouches à faire, elles se font tout aussi rapidement.

Ensuite, lors de la conception et la fabrication des guides, le gain de temps est également important :

- Avec la méthode conventionnelle, il faut entre 24 et 48h pour fabriquer un guide chirurgical. Ceci est dû aux nombreuses étapes de laboratoire (coulée du plâtre, transformation du guide radiologique, traitement des résines, finition, polissage).
- Avec la méthode numérique, il faut seulement 15 minutes pour concevoir le guide et seulement quelques minutes de plus pour qu'il soit fabriqué par la machine-outil. [20]

Enfin, le choix et le positionnement des implants est plus rapide car le praticien n'a pas à passer en revue plusieurs documents (planches radiographiques et calques implantaires) mais dispose de toutes les informations sur le même écran.

La méthode numérique nécessite un investissement initial important (logiciels, système d'empreinte optique). Cet investissement peut se trouver justifié par une qualité de travail accrue, ainsi qu'une économie sur les analyses implantaires et la réalisation des guides chirurgicaux. [20]

Enfin, comme nous l'avons vu, le praticien peut placer les implants dans un espace qu'il n'aurait pas exploité sans aide numérique, cela réduit donc le nombre de greffes et donc le coût de celles-ci pour certains patients. [18]

3.6. Erreurs et limites de la méthode numérique

Cette méthode nécessite une organisation très rigoureuse. Bien que la logistique soit simplifiée grâce à l'outil informatique, il ne faut pas se perdre entre les différentes étapes et les différents essayages pour anticiper les difficultés tout au long de traitement.

Une erreur de planification dans la chaîne thérapeutique entraîne une erreur clinique irréparable. Parmi les erreurs possibles dans la chaîne thérapeutique on retrouve :

- les erreurs lors de l'acquisition et le traitement des images radiologiques, en moyenne inférieure à 0,5mm,
- les erreurs lors de la réalisation du guide chirurgical, en général autour de 0,1 à 0,2mm pour les guides réalisés par FAO. [9]

Lors d'une implantation immédiate après extraction, le volume osseux résiduel peut être difficile à prévoir et on peut se retrouver avec un guide chirurgical peu ou pas stable. Cependant, cela est à pondérer par le fait que le logiciel nous permet de faire une simulation de la perte osseuse et donc d'anticiper au mieux la résorption.

La chirurgie sans lambeau nécessite une crête osseuse large ainsi qu'une hauteur de gencive attachée kératinisée suffisante.

On peut se demander également si la méthode numérique est nécessaire pour tous les cas cliniques. Il apparaît que cette technique est indiquée pour toutes les analyses pré-implantaires. Cependant, la réalisation d'un guide chirurgical peut n'être nécessaire que pour :

- la chirurgie sans lambeau,
- les cas où la quantité d'os disponible est limitée,
- les cas où des structures anatomiques à risque sont à proximité. [43]

Enfin, cette technique ne rend pas le travail du chirurgien plus simple et reste fortement opérateur dépendant, le risque pour le praticien est de trop se reposer sur le logiciel en pensant que la procédure est facile. Cependant, il faut avoir la possibilité d'identifier les problèmes, puis de reprendre la main au cas où il y ait le moindre incident peropératoires.

CONCLUSION

Avec l'implantologie, la dentisterie moderne a connu une grande avancée. Cette nouvelle option thérapeutique, maintenant largement reconnue, permet de traiter tous les types d'édentements. La thérapeutique implantaire doit respecter la notion de traitement minimalement invasif. De plus, les obligations esthétiques et fonctionnelles sont une partie centrale du cahier des charges du traitement car il ne faut pas perdre de vue que l'implant est au service de la prothèse.

Grâce à l'essor du numérique, l'implantologie traverse une véritable révolution. Comme nous l'avons vu, les systèmes d'aide à la planification implantaire permettent au praticien d'avoir une meilleure prévisibilité du résultat. Les sites implantaires sont visualisés précisément et les risques sont identifiés, cela permet une anticipation des contraintes liées à la chirurgie. Grâce à la planification, le praticien répète mentalement le geste à effectuer par la suite lors de la chirurgie.

La méthode numérique permet :

- une optimisation du volume osseux,
- une optimisation au niveau de la dimension de l'implant,
- un positionnement de l'implant plus précis au niveau du site choisi.

Cependant, la thérapeutique implantaire nécessite organisation et rigueur lors de toutes les étapes du traitement ; la multiplicité des étapes multiplie le risque d'erreur. Une erreur d'appréciation ou de positionnement lors d'une étape est irrécupérable et entraîne un effet « boule de neige » qui compromet la totalité des étapes suivantes. Lors de la chirurgie, l'utilisation d'un guide stéréolithographique entraîne :

- des erreurs de positionnement et de déplacement du guide durant la chirurgie,
- des erreurs mécaniques liées à l'espace entre le foret et le cylindre du guide. [9]

Enfin, même si tout se passe comme prévu, la planification numérique n'annule pas complètement le risque d'écart entre la position planifiée et la position réelle de l'implant. L'utilisation d'un guide chirurgical stéréolithographique n'enlève en rien le fait que le

praticien doit avoir une bonne expérience en implantologie. Ce dernier pourrait être amené à modifier son geste s'il y a un imprévu peropératoire. [32]

Nous avons vu également que, grâce au « *cloud computing* », la communication entre le praticien et le prothésiste est facilitée. La totalité des informations s'échange de manière bilatérale et le système permet aux deux acteurs de travailler de conserve pour trouver la meilleure option thérapeutique pour le patient.

La communication avec le patient, au centre de la thérapeutique, est également améliorée ; le patient peut visualiser son anatomie ainsi que les étapes de la thérapeutique. Le consentement du patient en est d'autant plus « éclairé ».

Le temps chirurgical raccourci et la possibilité de chirurgie sans lambeau rend le geste chirurgical moins traumatisant et diminue les suites opératoires. Dans certains cas, il est même possible que le patient reparte avec une prothèse fonctionnelle le jour de la pose des implants.

Enfin, avec les progrès de l'imagerie numérique et l'avancée continue du développement des logiciels d'aide à la planification implantaire, cette technique va devenir la norme. Il est alors indispensable qu'elle soit enseignée aux étudiants ainsi qu'aux praticiens déjà en exercice afin d'offrir aux patients une thérapeutique efficace, sécurisée et de moins en moins invasive.

Vu le Président
et Directeur prothèse Vu, Dr O. Le Gue
Co-Directeur



Références bibliographiques

1. Aït-Ameur A., Decat V., Treil J., Campan P., Teillet M., Le Gac O., Hauret L. Nouveautés en implantologie : de l'aide au diagnostic à l'aide à la chirurgie. *J Radiol.* 2009, vol. 90 p 624-633.
2. Akyalcin S., Dyer D.J., English J.D., Sar C. Comparison of 3-dimensional dental models from different sources: Diagnostic accuracy and surface registration analysis. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics.* Dec 2013, vol. 144 n°6, p 831-837.
3. Armand S., Le Gac O., Mir J., Allard Y. Chirurgie implantaire sans lambeau, intérêts de la robotique passive système Robodent®. *Réalités cliniques* 2009, vol. 20 n°4, p 277-290.
4. Armand S. La restauration unitaire antérieure en implantologie, *Quintessence International* 2008, p 108.
5. Attal P. Description et utilisation des systèmes assistés par ordinateur en chirurgie implantaire et en prothèse implantaire. *Mémoire DIU d'implantologie orale.* Lyon, 2009.
6. Basten CH. The use of radiopaque templates for predictable implant placement. *Quintessence Int* 195; 26:609-12.
7. Berglundh T., Lindhe J., Ericsson I., Marinello C., Liljenberg B., Thomsen P. The soft tissue barrier at implants and teeth. *Clinical Oral Implants Research* 2; 1991; p 81-90.
8. Boghanim P., Armand S., Campan P., Gayrard LP., Gineste L., Le Gac O., Observation du site implantaire : conséquences cliniques. *Stratégie prothétique*, avril 2008 vol. 8 n° 2, p 113-123.
9. Bruno V., Badino M., Riccitiello F., Spagnuolo G., Amato M. Computer guided implantology accuracy and complications. *Case reports in dentistry.* 2013, réf : 701421.
10. Cavézian R., Pasquet G. Imagerie Cone Beam et implants. *Rev Stomatol Chir Maxillofac.* Sept 2012, vol. 113, Issue 4, p 245–258.
11. Chotard K. Critères de choix des matériaux à utiliser dans le cadre d'une réhabilitation conjointe en CFAO. *Thèse Chir. Dent.* Toulouse 2013.

12. D'souza KM., Aras MA. Applications of computer-aided design/computer-assisted manufacturing technology in dental implant planning. *J Dent Implant.* 2012, vol. 2, p 37-41.
13. Davarpanah K., Demurashvili G., Daas M., Rajzbaum P. et al. Implantologie assistée par ordinateur. *Rev Stomatol Chi Maxillofac.* 2012, n°113, p 259-275.
14. Diss A., Peltier B., Berdougo M. La planification implantaire. *Le fil dentaire*, 2009 Mai, n°43, p 44.
15. Dubois P., Aoussat A., Duchamp R. Prototypage rapide – généralités. *Tech ingénieur.* Avril 2000. Réf BM7017, p 1-10.
16. Ella B., Moreau E., Bayle E., Fortin T., Rouas P., Hauret L., et al. Chirurgie numérique guidée en implantologie orale. Une alternative pour les écueils anatomiques et chirurgicaux. *EMC – Médecine buccale*, 28-820-N-10, 2013.
17. Flügge T.V., Nelson K., Schmelzeisen R., Metzger F.C. Three-dimensional plotting and printing of an implant drilling guide : simplifying guided implant surgery. *J Oral Maxillofac Surg.* 2013, n°71, p 1340-1346.
18. Fortin T., Isidori M., Bouchet H. Placement of posterior maxillary implants in partially edentulous patients with severe bone deficiency using CAD/CAM guidance to avoid sinus grafting: a clinical report of procedure. *Int J Oral Maxillofac Implants.* Janvier-Fevrier 2009, vol. 24 p 96-102.
19. Jaisson M., Felenc S., Nocent O. La gestion de l'occlusion par les systèmes de CFAO : les critères de choix. *Les cahiers de prothèse.* Mars 2013, n°161, p 39-51.
20. Kühl S., Payer M., Zitzmann N.U., Lambrecht J.T., Filippi A. Technical accuracy of printed surgical templates for guided implant surgery with the coDiagnostiX™ software. *Clinical implant dentistry and related research.* 2013.
21. Lamy M. Prothèse implantaire fixe scellée et vissée à l'heure du numérique. *L'information dentaire.* Mars 2011, n°12.

22. Leclercq P., Dohan S.L., Dohan D.M. Implantologie axiale : procédures chirurgicales et stratégies prothétiques. EMC – Odontologie, 23-330-A-16, 2008 – Médecine buccale, 28-820-G-10, 2008.
23. Lee C., Ganz S., Wong N., Suzuki J.B. Use of Cone Beam Computed Tomography and a Laser Intraoral Scanner in Virtual Dental Implant Surgery: Part 1. Août 2012, vol. 21 n°4, p 265–271.
24. Liang X., Jacobs R., Bassam H., Li L., Pauwels R. et al. A comparative evaluation of Cone Beam computed tomography (CBCT) and Multislice CT (MSCT). On subjective quality. Euro Journal of Radiol. 2010, vol. 75, p 265-269.
25. Ludlow JB., Ivanovic M., Comparative dosimetry of dental CBCT devices and 64-slice CT for oral and maxillofacial radiology. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. Juillet 2008, vol. 106 n° 1, p 106-114.
26. Margossian P., Mariani P., Laborde G., Guides radiologique et chirurgicaux en implantologie. EMC – Médecine buccale, 28-820-K-10, 2009.
27. Masson F., Dangin X., Baudin P. Tomodensitométrie : principes, formation de l'image. EMC – Radiologie et imagerie médicale – Principes et techniques – Radioprotection, 35-070-A-10, 2011.
28. Mell P., Grance T. The NIST definition of cloud computing. NIST Special Publication 800-145. Septembre 2011.
29. Missika P, Benhamou A, Kleinfinger I. Accéder à l'implantologie. Rueil-Malmaison, Ed. CdP., 2003.
30. Olsson M., Lindhe J. Periodontal characteristics in individuals with varying form of the upper central incisors. J Clin Periodontol. 1991, vol. 18 p 78-82.
31. Rulliere J. Intérêts des logiciels de planification et de la chirurgie guidée. Thèse Chir. Dent. Lyon 2013.

32. Schneider D., Marquardt P., Zwahlen M., Jung R.E. A systematic review on the accuracy and the clinical outcome of computer-guided template-based implant dentistry. Clin oral implants res. Mai 2009, vol. 20 p 73-86.
33. Shilpa Sudesh Dandekeri, M.K. Sowmya, Shruthi Bhandary. Stereolithographic surgical template: a review. Journal of Clinical and Diagnostic Research. Septembre 2013, vol. 9, p 2093-2095.
34. Site internet Anatomage Dental (<http://dental.anatamage.com/>). Consulté le 10 Mai 2014.
35. Site internet du Centre National d'Innovation et de Formation des Prothésistes Dentaires. Guide de la CFAO dentaire (<http://www.cnifpd.fr/guidecfao/index.html>). Consulté le 6 Août 2014.
36. Site internet Custompart (<http://www.custompart.net>). Consulté le 16 Avril 2014.
37. Site internet Dental Wings (<http://www.dental-wings.com>). Consulté le 10 Mai 2014.
38. Site internet du Dr. Mithridade DAVARPANAH. Les implants dentaire (<http://www.les-implants-dentaires.com/>). Consulté le 27 Mai 2014.
39. Site internet Keystone Dental (<http://www.keystonedental.com/>). Consulté le 10 Mai 2014.
40. Site internet Materialise Dental (<http://www.materialisedental.com>). Consulté le 10 Mai 2014.
41. Site internet Nobel Biocare® (<http://www.nobelbiocare.com>). Consulté le 10 Mai 2014.
42. Tardieu P. Aide informatique à la planification et à la réalisation des traitements implantaires. Le concept MATERIALISE et le programme SurgiCase. Magazine : article publié sur le site internet de Dental Espace (<http://www.dentalespace.com>). Mise en ligne : 06 février 2002, consulté le 14 mars 2014.
43. Van Assche N., Vercruyse M., Coucke W., Teughels W., Jacobs R., Quirynen M. Accuracy of computer-aided implant placement. Clin oral implants res. Juin 2012, vol. 23 p 112-123.

44. Verstreken K., Van Cleynenbreugel J., Marchal G., Van Steenberghe D., Suetens P. A double scanning procedure for visualisation of radiolucent objects in soft tissues: Application to oral implant surgery planning. *Lecture Notes in Computer Science*. 1988, vol. 1496 p 985-995.

Table des figures

Figure 1 : Vue de face en occlusion (à gauche) et vue occlusale du maxillaire (à droite)	16
Figure 2 : Ligne du sourire haute (à gauche) - moyenne (au milieu) - basse (à droite).....	16
Figure 3 : Projet prothétique pour un édentement de classe II de Kennedy au maxillaire	17
Figure 4 : Guide radiologique en résine transparente avec les puits remplis de matériau radio-opaque.....	18
Figure 5 : Planche radiographique avec calque implantaire (Xive-S).....	19
Figure 6 : Planche radiographique avec la position possible d'un implant	20
Figure 7 : Guide chirurgical sur le modèle en plâtre et en bouche	21
Figure 8 : Représentation des axes du scanner.....	23
Figure 9 : Scanner (à gauche) et Cone Beam (à droite)	24
Figure 10 : Comparaison d'un artéfact métallique entre Scanner (à gauche) et Cone Beam (à droite).....	25
Figure 11 : Comparaison de la résolution spatiale entre Scanner (à gauche) et Cone Beam (à droite).....	25
Figure 12 : Conception de projet prothétique sur Dental Wings©	29
Figure 13 : Empreinte optique avec système 3Shape TRIOS®	30
Figure 14 : Scanner optique Acitivity 850 de Smart Optics©	31
Figure 15 : Enregistrement d'un modèle pour bridge trois éléments en balayage de lumière structurée	31
Figure 16 : Parodonte fin (à gauche) - Parodonte épais (à droite)	32
Figure 17 : Module d'articulateur virtuel sur ZirkonZahn (à gauche) - sur Exocad (à droite)..	33
Figure 18 : Comparaison entre contacts réels et virtuels	33

Figure 19 : Principe de la stéréolithographie avancée.....	35
Figure 20 : Principe de l'impression 3D.....	35
Figure 21 : Principe de l'impression par changement de phase thermique	36
Figure 22 : Principe de l'impression par jet de photopolymères.....	37
Figure 23 : PEEK usiné (à gauche) et bloc de PMMA (à droite)	38
Figure 24 : Planification implantaire sur le logiciel 3Shape Implant Studio®.....	40
Figure 25 : Calcul de densité osseuse sur le logiciel Simplant®	42
Figure 26 : Repérage du nerf alvéolaire inférieur sur coDiagnostiX™	42
Figure 27 : Fusion des données DICOM (bleu foncé) et des données STL (bleu clair) sur coDiagnostiX™	44
Figure 28 : Positionnement des implants sur le logiciel Simplant®	45
Figure 29 : Guide chirurgical stéréolithographié.....	46
Figure 30 : Capture d'écran du logiciel Simplant®	47
Figure 31 : Fenestration vestibulaire (en bleu à gauche) - matériau nécessaire (en vert à droite).....	48
Figure 32 : Capture d'écran du logiciel NobelClinician®	48
Figure 33 : NobelConnect®	49
Figure 34: Capture d'écran du logiciel coDiagnostiX™	50
Figure 35 : Etapes conventionnelles de la production du guide chirurgical (à gauche) contre la méthode numérique (à droite)	51
Figure 36 : Capture d'écran du logiciel Invivo5®	52
Figure 37 : Capture d'écran du logiciel EasyGuide®	53
Figure 38 : Guide radiologique EasyGuide® avec le marqueur X.....	53

Figure 39 : Capture d'écran du logiciel Robodent©	54
Figure 40 : Guide radiologique Robodent® avec arc de navigation (à droite)	55
Figure 41 : Traqueurs optiques (à gauche) – caméra télémétrique (à droite)	55
Figure 42 : Capture d'écran du logiciel GALILEOS Implant de Sirona©	57
Figure 43 : Vue occlusale des dents résiduelles (à gauche) - orthopantomogramme (à droite)	58
Figure 44 : Modèle numérique (à gauche) - simulation des extractions (à droite)	58
Figure 45 : Volume de l'ostéotomie en bleu (à gauche) - gabarit de guidage (à droite)	59
Figure 46 : Planification implantaire avec l'os aplani mais les dents toujours en place	59
Figure 47 : Conception du guide radiologique (à gauche) - guide radiologique placé sur le plateau mandibulaire (à droite)	60

APPORT DE LA PLANIFICATION NUMÉRIQUE EN IMPLANTOLOGIE

RESUME EN FRANÇAIS :

La chirurgie implantaire, discipline à part entière de l'odontologie, a connu une évolution importante au cours des dernières années. Les technologies numériques ont évolué en parallèle et la rencontre des deux disciplines entraîne une véritable révolution de l'implantologie. La planification numérique permet au praticien de transférer un positionnement virtuel de l'implant au sein de la cavité buccale, et ce, de manière plus efficace que la méthode traditionnelle.

TITRE EN ANGLAIS : Contribution of Digital Planning in Implantology

DISCIPLINE ADMINISTRATIVE : Chirurgie dentaire

MOTS-CLES : Implants dentaires, Implantologie assistée par ordinateur, Logiciels de planification implantaire, CAO dentaire.

INTITULE ET ADRESSE DE L'UFR OU DU LABORATOIRE :

Université Toulouse III-Paul Sabatier

Faculté de chirurgie dentaire 3 chemin des Maraîchers 31062 Toulouse Cedex

Directeur de thèse : Professeur Serge ARMAND

Co-directeur de thèse : Docteur Olivier LE GAC