

UNIVERSITÉ TOULOUSE III – PAUL SABATIER
FACULTÉ DE CHIRURGIE DENTAIRE

ANNÉE 2014

2014-TOU3-3038

THÈSE

POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement

par

LAVÈZE Delphine

Le 18 novembre 2014

**PLANIFICATION IMPLANTAIRE PAR CFAO À PARTIR D'UN
PROJET PROTHÉTIQUE ET CHIRURGIE ASSISTÉE PAR
ORDINATEUR : ÉTAT DES LIEUX, AVANCÉES ET PERSPECTIVES.**

Directeur de thèse : Docteur CHABRERON Olivier

JURY

| | |
|-------------|---------------------------|
| Président : | Professeur POMAR Philippe |
| Assesseur : | Docteur CHAMPION Jean |
| Assesseur : | Docteur NASR Karim |
| Assesseur : | Docteur CHABRERON Olivier |



Je dédie cette thèse à ma filleule, Manon,

Je ne suis pas peu fière d'être l'heureuse marraine d'une petite fille aussi belle, douce et chipie que toi. Sache que je ferai tout pour concourir à ton bonheur et rendre chacun des jours de ta vie encore meilleurs... Tes risettes, tes petits sauts, tes sourires, tes premiers pas, tes câlins ainsi que les premiers mots que tu as enfin réussi à prononcer ont rythmé la réalisation et l'aboutissement de ce long travail de thèse.

Je serai là à chacun des moments clés de ta vie et tu pourras toujours compter sur l'amour de ta marraine.

Je te souhaite tellement de bonheur mon petit rayon de soleil...

REMERCIEMENTS

À mes parents,

Merci de m'avoir supportée et soutenue à tous les niveaux pendant ces 6 longues années de travail riches en émotions. J'ai toujours trouvé du réconfort à vos côtés à la maison ou à distance et je ne l'oublierai pas... J'espère que vous êtes fiers de la personne que je suis devenue et de mon parcours, sachez que vous y êtes pour beaucoup ! Je vous embrasse.

À mon arrière grand-père,

J'ai eu la chance de grandir à tes côtés et de connaître le sens de « l'amour de grands-parents » grâce à Mamie et toi. J'ai toujours essayé de suivre au mieux vos précieux conseils, notamment d'être studieuse à l'école, à ton image. Même si le chemin fut beaucoup trop long à ton goût, je suis enfin arrivée au bout Papi. Ma plus grande fierté est que tu sois présent à mes côtés pour le voir aujourd'hui... J'ai souvent pensé à vous et vous serez toujours dans mon cœur, ici ou ailleurs.

À ma sœur et Julien,

Je vous remercie pour votre soutien, vous m'avez fait le plus beau des cadeaux... Je vous souhaite beaucoup de bonheur dans votre nouveau cocon d'amour. Merci d'avoir toujours été présente soeurette d'amour !

À Maxime, ma moitié,

Notre rencontre improbable a changé le sens de ma vie depuis l'instant où je t'ai aperçu... et aussitôt aimé. Tu as toujours su m'accompagner, me conseiller avec tact, dissiper mes doutes et angoisses dans les moments difficiles. Nos différences nous ont permis de trouver un équilibre solide dans notre couple et je n'en serai pas là sans toi aujourd'hui. Merci pour ton soutien ainsi que ton amour si « simple » et sincère qui remplit ma vie de bonheur au quotidien. Le meilleur reste à venir, je te le promets...

À ma belle belle-famille, Françoise, Serge, Elodie, Tristan et Carl,

Vous m'avez accueillie les bras ouverts dans la famille Civade-Laffage et toujours encouragée dans mes projets, je vous en remercie. Merci également pour tous ces bons et simples moments de bonheur partagés ensemble... Une grosse pensée pour Coco, Alain, Cyp et Marie, je vous apprécie énormément.

À Tiphaine et Mélanie,

Même si je n'ai pas toujours été très présente ces dernières années, notre amitié est intacte et vous êtes toujours aussi importantes pour moi. Je vous remercie du fond du cœur d'avoir si souvent pensé à votre vieille copine no life et pris soin d'elle ! Quand c'est qu'on rattrape le temps perdu les filles ?

À Lisa,

On en a passé des heures au téléphone petit cœur... J'ai toujours su que je pouvais compter sur toi et tu m'as été d'un énorme soutien tout au long de mes études, et plus. Il est temps que je te remercie publiquement pour toutes ces attentions dignes d'une véritable amie. Merci doigt de la main.

À Nano,

Mon copain de toujours, on a bien changé en 10 ans mais ce qui est sûr c'est que je t'aime toujours autant ! Merci pour ta bêtise, tes folles aventures et surtout ton amitié précieuse.

À Antoine, Sébas, Harmo, Fabien, Marine, Julie, aux Bobo... et toute la clique de Gaillac.

Merci pour tous ces moments inoubliables passés ensemble, au rugby ou ailleurs. Vous êtes juste formidables, merveilleux, irremplaçables... Les mots me manquent, ne changez rien !

À mes copines de promo, Claire et Caro,

Vous m'avez été d'un soutien inconditionnel au quotidien en clinique et je suis très heureuse d'avoir fait ces deux belles rencontres à la fac. Je vous souhaite une longue et belle carrière Gogo et Bobby, les inséparables. Un bisou à toute la promo... Merci pour ces bons moments !

À Amandine et Yoann, petit clin d'œil à mes copains du lycée que je n'oublie pas et qui me manquent beaucoup trop !

Aux docteurs Nathalie Garnier et Alexandre Bonnemaïson,

Un grand merci pour votre gentillesse, votre confiance et votre participation à ma formation.

À mes premiers patients pour leur confiance et au corps enseignant de la faculté pour son implication durant ces 5 années de formation.

À notre Président du Jury,

Monsieur le Professeur POMAR Philippe,

- Professeur des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie,
- Vice-Doyen de la Faculté de Chirurgie Dentaire de Toulouse,
- Lauréat de l'Institut de Stomatologie et Chirurgie Maxillo-Faciale de la Salpêtrière
- Chargé de cours aux Facultés de Médecine de Toulouse-Purpan, Toulouse-Rangueil et à la Faculté de Médecine de Paris VI,
- Habilitation à Diriger des Recherches (H.D.R.),
- Chevalier dans l'Ordre des Palmes Académiques.

*Nous sommes très sensibles à l'honneur que vous nous faites en acceptant la Présidence de
notre Jury de thèse.*

*Nous admirons votre prodigieuse expérience, votre approche humaine de l'exercice ainsi que
vos talents de professeur.*

*Nous tenons également à vous remercier pour le soutien apporté à vos étudiants durant toutes
ces années.*

Soyez assuré de notre considération et de notre plus profond respect.

À notre Jury de thèse,

Monsieur le Docteur CHAMPION Jean,

- Maître de Conférences des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie,
- Vice-Doyen de la Faculté de Chirurgie Dentaire de Toulouse,
- Responsable de la sous-section de Prothèses,
- Docteur en Chirurgie Dentaire,
- Docteur d'État en Odontologie,
- DU Implantologie de la Faculté de Chirurgie Dentaire de Marseille,
- Diplôme d'Implantologie Clinique de l'Institut Bränemark-Goteborg (Suède),
- Vice-Président du Conseil National des Universités (section : 58),
- Lauréat de l'Université Paul Sabatier.

*Vous avez spontanément accepté de siéger à notre Jury de thèse et nous vous en remercions
infiniment.*

*Tout au long de nos études, nous avons apprécié vos compétences, votre rigueur ainsi que vos
qualités humaines.*

*Veillez trouver ici le témoignage de notre plus profond respect et notre reconnaissance pour
votre professionnalisme.*

À notre Jury de thèse,

Monsieur le Docteur NASR Karim,

- Maître de Conférences des Universités, Praticien Hospitalier d'Odontologie,
- Docteur en Chirurgie Dentaire,
- Lauréat de l'Université Paul Sabatier.

Nous vous remercions très chaleureusement d'avoir accepté de siéger dans notre Jury de thèse et de vous être intéressé à notre travail.

Nous avons pu apprécier tout au long de notre cursus la richesse de votre enseignement ainsi que vos remarquables qualités humaines et professionnelles.

Soyez assuré de notre profonde estime et de notre considération des plus distinguée.

À notre Directeur de thèse,

Monsieur le Docteur CHABRERON Olivier,

- Assistant Hospitalo-Universitaire d'Odontologie,
- Docteur en Chirurgie Dentaire,
- Master 2 Recherche : Science de la Vie et de la Santé – mention : Analyse Fonctionnelle des Génomes,
Spécialité : Anthropologie, délimitation génétique des populations humaines et Santé,
- Certificat d'Études Supérieures de Chirurgie Dentaire Prothèse Dentaire option : Prothèse scellée,
- Certificat d'Études Supérieures de Chirurgie Dentaire Prothèse Dentaire option : Prothèse Maxillo-Faciale,
- Lauréat de l'Université Paul Sabatier.

Je vous remercie très sincèrement d'avoir accepté la direction de ce travail prenant et de m'avoir fait découvrir et apprécier cette sous-discipline.

Je vous suis particulièrement reconnaissante de m'avoir conseillée, encouragée avec grande patience, humour et compétence tout au long de cette thèse.

Ce fut un véritable plaisir de travailler à vos côtés, tant dans la réalisation de cet écrit qu'au cours de notre parcours clinique.

Veillez trouver ici l'assurance et le témoignage de toute la gratitude et de l'amitié que je porte à votre égard.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCTION..... | 18 |
| PARTIE I : PLANIFICATION PROTHÉTIQUE | 20 |
| 1. DÉFINITION D'UN PROJET PROTHÉTIQUE | 20 |
| 1.1. Les étapes initiales du projet implanto-prothétique : rappels | 21 |
| 1.1.1. Analyse des éléments cliniques | 21 |
| 1.1.2. Demandes et besoins du patient édenté : dimension psychologique | 23 |
| 1.1.3. Analyse des modèles d'étude sur articulateur..... | 24 |
| 1.1.4. Options thérapeutiques et esquisse du projet prothétique..... | 24 |
| 1.2. Place de l'implantologie dans la thérapeutique prothétique..... | 24 |
| 1.2.1. Rappels historiques | 24 |
| 1.2.2. Évolution des concepts en implantologie | 25 |
| 1.2.3. Rôle de la planification implantaire sur le succès thérapeutique et intérêt de l'IAO... 27 | |
| 1.2.4. La prothèse fixée implanto-portée : une réponse esthétique et fonctionnelle de choix 28 | |
| 2. UN PROJET PROTHÉTIQUE EN IMPLANTOLOGIE | 29 |
| 2.1. La prothèse au centre de la thérapeutique..... | 29 |
| 2.1.1. Un nouveau concept guidé par le projet prothétique (« <i>prosthodontically driven implantology</i> ») : rappels | 29 |
| 2.1.2. La phase préparatoire : élément clé du projet et du succès thérapeutique | 30 |
| 2.2. Analyse du projet prothétique implantaire | 32 |
| 2.2.1. Différentes modalités visant à matérialiser le projet prothétique | 32 |
| 2.2.2. Intérêts de ces modélisations | 34 |
| 2.2.3. Rôle et propriétés du guide radiologique lors de la planification implantaire | 35 |
| 3. CONFRONTATION DU PROJET PROTHÉTIQUE AUX CONSIDÉRATIONS ANATOMIQUES : L'IMAGERIE PRÉ-IMPLANTAIRE..... | 38 |
| 3.1. Buts de l'imagerie lors de la planification implantaire..... | 38 |
| 3.1.1. Évaluation du volume et de la densité osseuse | 38 |
| 3.1.2. Localisation des obstacles anatomiques critiques..... | 41 |
| 3.1.3. Planification implantaire proprement dite | 42 |

| | |
|---|-----------|
| 3.2. Quel protocole radiologique d'acquisition adopter en implantologie ? | 44 |
| 3.2.1. Évolution vers une imagerie sectionnelle | 44 |
| 3.2.2. Imagerie sectionnelle et planification assistée par ordinateur | 46 |
| 4. PLANIFICATION IMPLANTAIRE SUR LOGICIELS DE SIMULATION DÉDIÉS | 47 |
| 4.1. Transfert des données de l'imagerie au format DICOM à l'intérieur du logiciel de planification implantaire..... | 47 |
| 4.2. Planification virtuelle : le logiciel d'IAO et ses différentes fonctions..... | 48 |
| 4.2.1. Fonctions du logiciel pour la planification du plan de traitement..... | 48 |
| 4.2.2. Fonctions du logiciel en relation avec le guide chirurgical | 53 |
| 4.2.3. Fonctions en relation avec la préparation de la prothèse à partir du guide chirurgical | 53 |
| 4.3. Présentation de 4 logiciels actuellement sur le marché à travers 4 concepts différents | 53 |
| 4.3.1. Le logiciel SimPlant®..... | 53 |
| 4.3.2. Le protocole de traitement par NobelGuide™..... | 54 |
| 4.3.3. Le couplage du système Cerec au CBCT | 56 |
| 4.3.4. La navigation chirurgicale/robotique passive : présentation du système RoboDent® | 61 |
| | |
| PARTIE II : PLANIFICATION CHIRURGICALE ET CHIRURGIE ASSISTÉE PAR ORDINATEUR..... | 65 |
| | |
| 1. LES GUIDES CHIRURGICAUX RÉALISÉS PAR CFAO..... | 65 |
| 1.1. Différents types de guides chirurgicaux | 65 |
| 1.1.1. Les « débuts » / l'implantologie « traditionnelle » | 65 |
| 1.1.2. Les guides chirurgicaux stéréolithographiques..... | 66 |
| 1.1.3. Guides chirurgicaux usinés par soustraction..... | 70 |
| 1.1.4. Transformation du guide radiologique en guide chirurgical..... | 70 |
| 1.2. Caractéristiques de ces guides chirurgicaux | 71 |
| 1.2.1. Leur rôle au sein de la chaîne thérapeutique en IAO..... | 71 |
| 1.2.2. Quel guidage ? | 72 |
| 1.3. Quelle précision attendre de ces guides ? | 75 |
| 1.3.1. Les paramètres mesurés | 76 |
| 1.3.2. Les résultats des études..... | 77 |

| | |
|---|------------|
| 2. CAS PARTICULIER DE LA NAVIGATION CHIRURGICALE (ROBO DENT®)..... | 81 |
| 2.1. Grands principes : rappels..... | 81 |
| 2.1.1. Triangulation des informations et traceurs optiques..... | 81 |
| 2.1.2. Phase préparatoire et planification chirurgicale..... | 82 |
| 2.1.3. Chirurgie guidée..... | 82 |
| 2.2. Quelle précision attendre de la robotique passive ? | 84 |
| 2.3. Intérêts de la navigation | 85 |
| 2.3.1. Avantages par rapport aux systèmes statiques..... | 85 |
| 2.3.2. Chirurgies sans lambeaux moins invasives..... | 86 |
| 2.3.3. Réalisation prothétique pré-implantaire..... | 86 |
| 3. FUSION DES DONNÉES ET CONSÉQUENCES SUR L'APPROCHE CHIRURGICALE EN IAO | 86 |
| 3.1. Chirurgies sans lambeaux..... | 87 |
| 3.1.1. Conditions à la pose d'implants par la technique sans lambeau (rappels)..... | 87 |
| 3.1.2. Avantages et intérêts d'une chirurgie implantaire sans lambeau..... | 88 |
| 3.1.3. Limites | 88 |
| 3.1.4. Chirurgie « flapless » et implantologie assistée par ordinateur | 89 |
| 3.2. Diminution des indications de greffes osseuses..... | 95 |
| 3.3. Gestion de cas complexes avec une sécurité accrue..... | 96 |
| 3.3.1. Résorption osseuse avancée..... | 96 |
| 3.3.2. Procédure d'extraction-implantation immédiate..... | 100 |
| 3.3.3. Multiplicité de sites implantaires | 101 |
| 3.4. Réalisation d'une prothèse avant la chirurgie pour une mise en charge immédiate | 102 |
| 3.4.1. Rappels sur la MCI | 102 |
| 3.4.2. Quels intérêts à la MCI ? | 103 |
| 3.4.3. Apport de l'IAO..... | 103 |

PARTIE III : COMPARAISON DE L'IAO AVEC LA THÉRAPEUTIQUE CONVENTIONNELLE. ATOUTS, LIMITES ET PERSPECTIVES. 107

1. CONFRONTATION DE LA THÉRAPEUTIQUE CLASSIQUE AU CONCEPT D'IAO 107

1.1. Intérêt de l'IAO lors de la phase de planification implantaire et influence sur sa précision (rappels partie I)..... 107

1.1.1. À propos de la technique d'imagerie pré-implantaire..... 107

1.1.2. Guides d'imagerie et planification..... 109

1.1.3. Planification implantaire proprement dite 109

1.2. Précision du dispositif de transfert à la phase chirurgicale..... 110

1.3. Impact sur la précision du positionnement implantaire tridimensionnel au niveau du site : les études 111

2. ATOUTS DE CE CONCEPT DANS SES INDICATIONS THÉRAPEUTIQUES MAJEURES 116

2.1. Intérêts dans les cas complexes pour les praticiens débutants..... 116

2.2. Une procédure moins opérateur-dépendante..... 117

2.3. Nécessité d'une précision critique..... 118

2.4. Un véritable outil de communication 118

2.5. L'ouverture à de nouvelles possibilités prothétiques..... 119

2.5.1. Réalisation d'une prothèse provisoire ou d'usage en pré-implantaire..... 119

2.5.2. Intégration de l'empreinte optique à la phase prothétique..... 120

3. LIMITES ET PERSPECTIVES DE L'IAO 122

3.1. Aspects pratiques : logistique et coûts..... 122

3.1.1. Logistique : les diverses étapes de l'IAO 123

3.1.2. La question de la balance bénéfice/coût 124

3.2. Courbe d'apprentissage en IAO 125

| | |
|--|------------|
| 3.3. Complications et échecs de la chirurgie guidée..... | 125 |
| 3.3.1. Rappel sur la précision de la chirurgie assistée par ordinateur | 126 |
| 3.3.2. Erreurs lors de la planification | 126 |
| 3.3.3. Complications per-opératoires | 126 |
| 3.4. Perspectives en IAO..... | 128 |
| 3.4.1. À propos du couplage CBCT/empreinte optique : perspectives | 128 |
| 3.4.2. Vers une chirurgie entièrement robotisée ?..... | 129 |
| CONCLUSION | 131 |
| BIBLIOGRAPHIE | 134 |
| TABLE DES ILLUSTRATIONS | 141 |

Avant-propos

*« Pour accomplir de grandes choses, nous devons non seulement agir
mais aussi rêver ; non seulement planifier, mais aussi croire. »*

Anatole France

Introduction

L'implantologie est une discipline relativement récente ayant connu une évolution rapide depuis la découverte de l'**ostéointégration** par le Professeur Bränemark dans les années 1970. À l'heure actuelle, ce processus est un fait avéré même s'il n'est toujours pas compris dans sa globalité et c'est l'intégration de nos restaurations que nous cherchons à obtenir (1).

En effet, les préoccupations émanant à la fois du praticien et du patient ont littéralement changé. Celles-ci sont axées vers des **exigences esthétiques** de plus en plus fortes, des chirurgies que l'on veut le **moins invasives** possibles ainsi que sur la possibilité de **repousser** toujours plus loin les **limites** de la **thérapeutique** dans les cas complexes (2). Elles vont également dans le sens de la diminution du temps global de traitement (3).

Afin de satisfaire ces impératifs grandissants, il a fallu passer d'une implantologie guidée par les exigences anatomiques à l'implantologie moderne centrée sur l'objectif prothétique, véritable repère lors de la planification implantaire (4). L'avantage de cette dernière est indéniable puisqu'elle se trouve véritablement au cœur du traitement en permettant de respecter l'aspect directeur du montage prothétique initial garantissant ainsi le succès thérapeutique (5), (6).

Le **concept d'implantologie assistée par ordinateur** apporte aujourd'hui une aide diagnostique et chirurgicale indéniable en réponse à ces doléances croissantes (7), (8). Les systèmes associés portent alors l'espoir d'une véritable révolution permettant d'appréhender une nouvelle approche de l'implantologie.

« La chirurgie assistée par ordinateur peut être définie comme la possibilité de transférer en bouche une planification implantaire réalisée sur ordinateur à partir des données d'un scanner grâce à des outils de forage. » (5)

Cette nouvelle technologie apparaissant comme innovante et fructueuse est cependant peu répandue en cabinet dentaire à l'heure actuelle. Elle est par ailleurs exposée à de nombreuses controverses et interrogations de la part des praticiens mais aussi de l'ensemble de la communauté scientifique. Il conviendra de les éclairer en tentant de répondre aux questions suivantes, à la lumière des principales techniques actuelles liées au concept d'implantologie assistée par ordinateur (IAO).

Quel est l'intérêt de fusionner les données issues de différentes sources lors de la phase de planification implantaire prothétique et chirurgicale ?

Quelle précision peut-on attendre de la chirurgie assistée par ordinateur ? Quels atouts majeurs en découlent à ce stade ?

Le concept d'IAO permet-il d'envisager une approche chirurgico-prothétique différente d'une thérapeutique dite « conventionnelle » ?

Quelles avancées et perspectives peuvent être attendues de ces systèmes d'aide ?

Nous nous proposons dans ce travail de synthèse articulé autour de différents systèmes liés au concept d'implantologie assistée par ordinateur de préciser l'intérêt d'une planification chirurgico-prothétique virtuelle centrée sur l'objectif prothétique. Nous nous intéresserons ensuite à son transfert à la phase chirurgicale ainsi qu'aux atouts majeurs portés par ces outils d'aide dans cette indication. Enfin, nous ferons le point sur leurs indications et limites en les confrontant à un traitement implantaire conventionnel ; avant d'envisager les perspectives attendues de ces nouvelles technologies prometteuses.

Nous précisons d'emblée que seules les réhabilitations prothétiques fixées implanto-portées seront considérées. D'autre part, nous ne décrirons pas l'ensemble des systèmes liés au concept d'IAO de façon exhaustive. Enfin, les différents types de greffes osseuses à visée implantaire ne seront pas développés dans cet exposé.

PARTIE I : PLANIFICATION PROTHÉTIQUE

L'évolution des concepts en implantologie s'est faite dans le souci constant d'aboutir à des réhabilitations prothétiques alliant exigences esthétiques et fonctionnelles, tout en assurant le confort ainsi que la satisfaction de patients en quête d'une thérapeutique pérenne. Afin de satisfaire l'ensemble de ces impératifs légitimes, on comprend la nécessité de partir d'une référence, d'un point de départ concret qualifié de **projet prothétique**, véritable guide durant les différents temps de la thérapeutique implantaire : de la planification à la réhabilitation prothétique d'usage en passant par la phase chirurgicale de pose de l'implant proprement dite.

L'implantologie moderne, que l'on qualifie à juste titre de « *guidée par l'objectif prothétique* », trouve alors tout son sens à travers cette approche plus que jamais centrée sur la réhabilitation prothétique finale désirée : il s'agit du concept princeps de l'IAO.

Idéalement, ce projet prothétique devrait être testé en bouche puis validé après avoir satisfait les différents paramètres garants du succès de la thérapeutique. Sa réalisation doit par ailleurs être précédée d'un **examen clinique** rigoureux qui ne déroge pas aux règles régissant l'implantologie « traditionnelle », dont nous ne citerons ici que quelques brefs rappels élémentaires.

1. DÉFINITION D'UN PROJET PROTHÉTIQUE

« Si vous savez où vous êtes et où vous voulez aller, s'y rendre est facile. »

Dawson, 1989

La réussite de toute thérapeutique prothétique exige une analyse exhaustive de la situation clinique, tant anatomique que fonctionnelle et esthétique afin d'établir un plan de traitement voué au succès. En implantologie, c'est grâce à l'analyse pré-implantaire, fondement du projet prothétique, que l'on pourra formuler un pronostic et aboutir à sa réussite (9).

À partir de cette analyse préalable, différentes options thérapeutiques vont s'offrir à nous, parmi lesquelles nous pouvons citer les **réhabilitations conjointes implanto-portées**. Dans un souci de simplification, seul ce type de restauration sera envisagé dans notre exposé.

Nous aborderons dans ce travail tout type d'édentement faisant intervenir une réhabilitation fixée implanto-portée visant à le compenser, et ce à travers le concept d'IAO. À partir d'un projet prothétique que l'on prendra le temps de valider, nous parcourrons les différentes étapes de la planification implantaire à la chirurgie assistée par ordinateur à la lumière de différents logiciels associés à l'IAO en précisant leurs particularités.

Préalablement à cela, nous nous proposons de retracer brièvement les étapes initiales menant à l'élaboration d'un projet prothétique à travers quelques rappels.

1.1. Les étapes initiales du projet implanto-prothétique : rappels

En présence d'un patient présentant un **édentement**, il existe des paramètres essentiels à analyser constituant des prérequis avant d'envisager une thérapeutique (implantaire ou non) visant à le compenser. Il est également important de prendre en considération la personnalité ainsi que la demande émanant du patient avant de se lancer dans celle-ci.

Nous serons ensuite en mesure d'envisager les options thérapeutiques possibles ainsi que d'esquisser un projet prothétique (4).

1.1.1. Analyse des éléments cliniques

1.1.1.1. Évaluation de l'état général

L'état de santé général doit être évalué de façon systématique et réactualisé régulièrement par le biais du questionnaire médical, permettant de déterminer la présence d'une éventuelle contre-indication interférant avec la réalisation de l'acte chirurgical et/ou prothétique implantaire. D'autre part, il ne faut pas omettre de prendre en compte l'état psychologique et le niveau de compréhension du patient ainsi que sa motricité et sa dextérité.

→ La correspondance avec le médecin traitant ou le spécialiste s'avère parfois indispensable.

1.1.1.2. Examen clinique exo buccal

Il est impératif d'analyser certains critères esthétiques exo buccaux lors de l'observation clinique préalablement à la mise en route d'une quelconque thérapeutique prothétique.

La position de la **ligne du sourire** est un paramètre capital à observer.

Nous retiendrons également l'examen de l'**étage inférieur** de la face qui permet de déterminer si la dimension verticale d'occlusion (DVO) est adaptée ou à revoir. Il s'agit d'un critère important à analyser étant donné qu'un affaissement de celle-ci accentue le vieillissement du visage.

Il faut aussi prendre en compte les **éléments faciaux et labiaux**, avec notamment la forme de la lèvre, l'état des commissures labiales, le soutien de la lèvre supérieure et des joues.

Il est par ailleurs nécessaire de relever la hauteur des étages faciaux, leurs rapports et déséquilibres éventuels, sans oublier la symétrie du visage ainsi que le parallélisme des lignes remarquables.

Enfin, il conviendra de réaliser un examen complet des articulations temporo-mandibulaires.

L'ensemble de ces paramètres est d'autant plus important à évaluer en présence d'une prothèse existante en bouche car celle-ci pourra nous servir de modèle ou encore de point de départ lors de la thérapeutique. Elle pourra également constituer un « brouillon » s'il y a des points à améliorer en nous renseignant sur les modifications progressives à apporter à celle-ci afin de se rapprocher au plus près de la réhabilitation prothétique idéale recherchée.

→ Une fois cette prothèse validée, elle pourra alors servir de base à la **planification implantaire**.

L'importance de la qualité de cette prothèse de départ sera soulignée dans le chapitre correspondant.

1.1.1.3. Examen clinique endo buccal

Il s'attache à l'identification des éléments déterminants au regard du projet implanto-prothétique, dont on précisera uniquement les points essentiels et parmi lesquels nous pouvons citer :

- Le bilan parodontal (sondage parodontal, contexte parodontal, hygiène, palpation des crêtes édentées, biotype gingival) ;
- L'analyse occlusale (classe d'Angle, plans de référence, examen fonctionnel, occlusion, **ouverture buccale**, para-fonctions) ;
- L'examen prothétique (prothèses, espace prothétique disponible, phonation) ;
- L'évaluation esthétique (ligne du sourire, forme de l'arcade, ligne des collets, soutien des lèvres).

1.1.2. Demandes et besoins du patient édenté : dimension psychologique

L'un des facteurs essentiels du succès d'un traitement prothétique quel qu'il soit est avant tout l'identification des attentes du patient.

Il est en effet particulièrement important de prendre le temps de connaître les motivations réelles de ce dernier afin d'éliminer toutes demandes irréalistes, notamment **esthétiques** (9). Les attentes du patient peuvent intéresser le volet fonctionnel mais aussi esthétique ou encore être motivées par le retour à une vie sociale normale.

Dans tous les cas, l'entretien avec le patient doit aboutir à la construction partagée d'une relation de confiance basée sur une écoute attentive ainsi que sur la **communication** verbale et non verbale (10).

L'IAO constitue en ce sens un formidable outil de communication avec le patient en autorisant la prévisualisation de la future restauration prothétique ainsi que la progression des étapes thérapeutiques pas à pas. Le patient devient alors un véritable **acteur** de son traitement et peut y participer de façon plus active (notamment à travers le couplage du système Cerec à l'imagerie tridimensionnelle, qui sera développé ultérieurement).

1.1.3. Analyse des modèles d'étude sur articulateur

Le praticien réalise ensuite des modèles d'étude, bientôt montés sur articulateur avant de confectionner des **cires diagnostiques** (*wax up*) ou un **montage directeur**. Ces modélisations en cire permettent de visualiser l'espace prothétique disponible ainsi que d'étudier les possibilités prothétiques.

1.1.4. Options thérapeutiques et esquisse du projet prothétique

À partir de l'anamnèse et à la lumière du diagnostic établi, le praticien est alors en mesure d'orienter le patient vers une (ou plusieurs) solution prothétique qui peut être : conjointe supra-dentaire, adjointe, amovible stabilisée par des implants ou encore fixe implanto-portée.

Les **inconvenients** inhérents à la **prothèse adjointe**, à savoir son caractère amovible ainsi que sa connotation péjorative (« *dentier* » : synonyme de vieillissement, de régression, d'inconfort mais également d'inesthétique) orientent aujourd'hui de plus en plus les patients vers des réhabilitations **fixées** alliant confort et esthétique.

Cependant, l'insuffisance ou l'absence de piliers dentaires nécessite fréquemment la mise en place de racines artificielles.

1.2. Place de l'implantologie dans la thérapeutique prothétique

1.2.1. Rappels historiques

L'idée de remettre en place une dent perdue au cours d'un traumatisme dans son alvéole ou encore de la remplacer rapidement par un matériau lui ressemblant remonte à la Haute Antiquité. Certains vestiges semblent en effet nous amener sur les pistes suivies par ces lointains précurseurs improvisés : guérisseurs, forgerons, barbiers-chirurgiens puis enfin chirurgiens dentistes (4).

Les développements de l'implantologie semblent ensuite avoir suivi ceux de l'aventure humaine avec des errances, des avancées, des déconvenues mais également des révolutions.

Parmi ces révolutions, on pense évidemment à la découverte de l'ostéointégration. En prenant le pas sur le concept de fibrointégration admis jusqu'alors, cette découverte fortuite a littéralement révolutionné la pratique clinique de l'implantologie (11).

Depuis, les concepts ont évolué et l'**implantologie assistée par ordinateur** semble aujourd'hui se dessiner comme une sous-discipline d'avenir à travers les nombreux apports et intérêts qu'elle véhicule : elle pourrait bien signer la révolution d'une nouvelle ère (12).

1.2.2. Évolution des concepts en implantologie

Les débuts de l'implantologie moderne furent marqués par la nécessité de pallier les déficiences des prothèses amovibles complètes : il s'agissait alors de la vocation de la thérapeutique implantaire à ce moment là. Pour ce faire, des implants étaient placés chez l'édenté total en s'accommodant « tant bien que mal » du volume osseux disponible afin de soutenir une prothèse hybride. Le positionnement précis des implants importait peu à cette époque durant laquelle l'obtention de leur **ostéointégration** relevait déjà d'une avancée thérapeutique majeure.

Puis, avec le temps et au vu des taux de succès élevés obtenus chez l'édenté total, l'implantologie s'est progressivement élargie aux patients partiellement édentés : c'est à partir de là que les exigences ont commencé à évoluer.

La confrontation au traitement des zones antérieures partiellement édentées faisant intervenir des réhabilitations prothétiques fixées implanto-portées fit bientôt émerger la notion d'impératif esthétique. La réponse légitime à cette demande fit alors passer la discipline du paradigme de l'implantologie guidée par les **exigences chirurgicales** à celui d'une implantologie centrée sur les **considérations prothétiques** (13).

Il s'agit aujourd'hui d'un concept fondamental en implantologie, discipline souvent qualifiée « d'ingrate » car au service de la prothèse. Le projet prothétique, point de départ mais aussi d'arrivée de la thérapeutique, a alors la lourde responsabilité d'en guider l'ensemble des étapes « de A à Z ».

L'implant en lui même n'est qu'un outil, ou encore un moyen pour arriver à une fin : la réhabilitation prothétique souhaitée. Il ne constitue donc pas une finalité en soi et ne peut d'ailleurs exister sans la prothèse qui arrive derrière (ce qui n'est pas réciproque).

Aujourd'hui, les implants ne sont plus positionnés en fonction du volume osseux disponible (« *là où l'on trouve suffisamment d'os* ») mais en fonction de la position étudiée, désirée et validée des futures dents prothétiques qui viendront compenser l'édentement dont il est question. Il s'agit de l'approche « ***crown-to-bone*** » (7).

On comprend donc que le positionnement implantaire ne se fait pas au hasard et doit prendre en compte à la fois des impératifs prothétiques (définis par le projet prothétique) mais aussi chirurgicaux. En effet, de nombreuses structures anatomiques dites à risque imminent à l'intérieur des maxillaires et doivent être préservées durant l'intervention. De plus, un volume osseux minimal est nécessaire pour poser nos implants, obtenir une stabilité primaire suffisante ainsi qu'une intégration optimale de ces derniers.

Ces deux types de considérations **complémentaires** doivent donc être étudiées puis **confrontées** afin de déterminer le positionnement tridimensionnel optimal de l'implant au niveau du ou des site(s) retenu(s) ainsi que le design adapté à la situation clinique : il s'agit de la vocation de la planification implantaire.

L'implantologie assistée par ordinateur a pour objectif la simplification de cette étape thérapeutique cruciale qui peut rapidement s'avérer relativement complexe au cours d'une thérapeutique implantaire classique lorsque tous les éléments à considérer sont « dissociés ».

Elle vise également à en augmenter la précision.

1.2.3. Rôle de la planification implantaire sur le succès thérapeutique et intérêt de l'IAO

« Ne pas planifier, c'est programmer l'échec. »

Anatole France

La planification en implantologie a pour principaux **objectifs** :

- 1) de déterminer le (ou les) site(s) implantaire(s) ;
- 2) de choisir le type d'implant : longueur, diamètre et design à adopter ;
- 3) de déterminer son positionnement tridimensionnel au niveau du site dans le respect des règles communément admises en implantologie.

Elle représente une étape clé de la thérapeutique implantaire, voire la plus importante car elle conditionne le succès ainsi que la pérennité de la réhabilitation prothétique implanto-portée à venir. En effet, un implant « *bien positionné* » autorise la réalisation d'une réhabilitation prothétique supra-implantaire de qualité d'un point de vue esthétique mais également fonctionnel, dans des conditions optimales et conformes à l'objectif prothétique de départ fixé d'un commun accord avec le patient. Si l'implant est « *mal positionné* », il peut ne pas être exploitable d'un point de vue prothétique ou rendre parfois difficile la réalisation d'une restauration répondant aux impératifs recherchés. Il peut dans ce cas faire intervenir des compromis, la compensation des déviations impliquant parfois l'utilisation d'artifices prothétiques complexes (cf. piliers angulés pour rattraper un axe peu favorable) (14). Un positionnement erroné peut également mener à des réhabilitations inesthétiques et dont la pérennité peut être menacée (7).

Face à des exigences prothétiques qui vont croissantes, on comprend aisément la nécessité de gagner en précision lors de la phase de **planification** implantaire afin d'aboutir à un **positionnement** tridimensionnel correct lors de la chirurgie (15).

L'IAO permet en ce sens d'effectuer une planification implantaire précise et rigoureuse prenant simultanément en compte les écueils prothétiques et anatomiques par le biais de leur fusion à l'écran. En autorisant une simulation implantaire dynamique et interactive, elle permet également d'optimiser le résultat prothétique final escompté (16).

Les principales fonctions associées à la plupart de ces logiciels lors de la phase de planification implantaire seront décrites dans le chapitre dédié à cet effet, au fil duquel nous prendrons le soin de préciser leurs intérêts cliniques. Le transfert fiable de cette dernière au niveau du site chirurgical n'a plus qu'à être démontré et fera l'objet de la 2^{ème} partie de ce travail.

1.2.4. La prothèse fixée implanto-portée : une réponse esthétique et fonctionnelle de choix

Après avoir rappelé brièvement les étapes fondamentales menant à l'esquisse d'un projet prothétique en implantologie ainsi que les concepts de base régissant de nos jours cette discipline exigeante, nous choisissons d'opter pour une réhabilitation conjointe implanto-portée quelle qu'elle soit (unitaire, partielle ou complète) recourant au procédé d'implantologie assistée par ordinateur.

Ce type de réhabilitation fait aujourd'hui l'objet d'une **demande croissante** de la part de patients édentés en quête d'une thérapeutique pérenne alliant esthétique, fonction et confort. Elle s'impose en effet comme le gold standard dans de nombreuses situations cliniques.

Cependant, il ne faut pas oublier qu'il s'agit souvent de traitements longs, lourds et onéreux. Ils demandent de ce fait une implication toute particulière des patients ne pouvant être basée que sur une véritable relation de confiance qu'il conviendra d'entretenir tout au long du traitement.

| PROTHÈSE FIXÉE IMPLANTO-PORTÉE |
|---|
| + Prothèse stable et rétentive |
| + Encombrement moins important |
| + Impact psychologique positif |
| + Rétablissement optimal des fonctions masticatoires |
| - Entretien et hygiène exigeants |
| - Coût initial très important |

Figure 1 : Tableau synthétisant les principaux facteurs positifs et négatifs en prothèse fixée implanto-portée.

Nous verrons que le concept d'IAO permet aujourd'hui de répondre à ces attentes ainsi qu'à des exigences qui vont croissantes. Elle constitue notamment un outil de choix dans la gestion de cas complexes faisant intervenir les notions d'esthétique, des limitations anatomiques ou encore l'impératif de confort et ce plus particulièrement chez l'édenté complet (17).

2. UN PROJET PROTHÉTIQUE EN IMPLANTOLOGIE

« La construction à un stade précoce de traitement d'un véritable projet prothétique en amont de la phase chirurgicale permet de fixer de façon définitive l'ensemble des objectifs du traitement implantaire, tant sur les plans esthétique que fonctionnel et garantit au praticien de pouvoir proposer à son patient un plan de traitement cohérent et présentant un minimum d'aléas. » (1)

Selon Daas et Dada.

2.1. La prothèse au centre de la thérapeutique

2.1.1. Un nouveau concept guidé par le projet prothétique (*« prosthetically driven implantology »*) : rappels

Si le volume osseux ne constitue plus une priorité aujourd'hui, il représente plutôt un élément secondaire qu'il convient toutefois d'étudier avec la plus grande attention.

Afin de pallier à un **déficit osseux**, différents types d'aménagements pré ou per-implantaires représentent de nos jours des traitements de plus en plus prédictibles qui tendent à devenir « routiniers » (18). En fonction de la situation clinique, différentes techniques d'augmentations osseuses seront indiquées et nous permettront ultérieurement de positionner nos implants « *là où on en a besoin* » d'un point de vue strictement prothétique au vu de notre projet et pas « *là où il y a de l'os* » en quantité suffisante pour les recevoir (19).

Nous rappelons que nous ne détaillerons pas les différents types de greffes osseuses à visée implantaire ici car elles ne font pas l'objet de ce travail et ont été traitées par ailleurs.

2.1.2. La phase préparatoire : élément clé du projet et du succès thérapeutique

Si l'on se réfère de façon stricte au concept actuel d'implantologie « *guidée par l'objectif prothétique* » (qu'il s'agisse d'une thérapeutique implantaire conventionnelle ou de l'IAO), l'ensemble des étapes doit en théorie et dans l'idéal découler d'un projet prothétique de départ clairement défini et matérialisé aux différents stades de la thérapeutique implantaire. Il est donc important et vivement conseillé de tester ce dernier en bouche avant l'intervention chirurgicale et la réalisation prothétique finale en passant par la réalisation d'une **prothèse provisoire**. Il est également possible d'utiliser telle quelle ou de modifier une prothèse d'usage existante, pourvu que cette dernière présente tous les critères de qualité exigés. Les modifications nécessaires seront alors effectuées puis le projet validé en accord avec le ressenti du patient avant de poursuivre le cheminement thérapeutique.

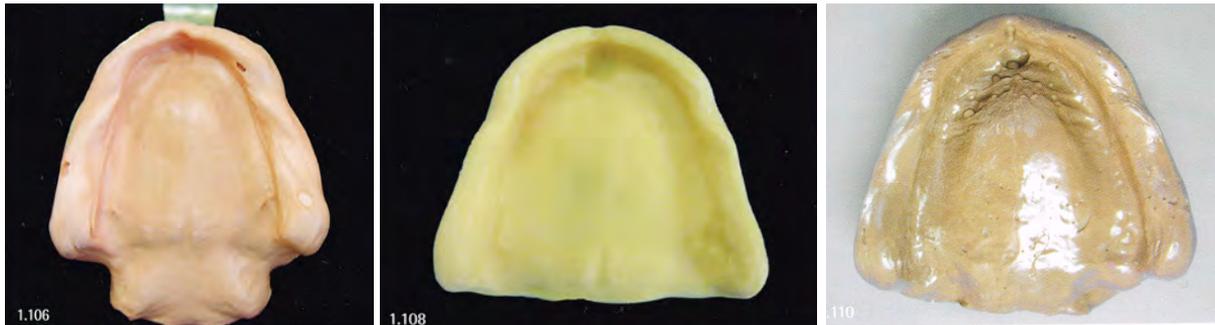
La réalisation d'une prothèse provisoire permet de transposer en bouche les informations apportées par les cires diagnostiques dans un but essentiellement fonctionnel et esthétique (20). Elle autorise la prévisualisation de différents paramètres essentiels parmi lesquels nous pouvons citer : le soutien labial, la DVO, la position des collets, la localisation et la forme des futures dents prothétiques. Elle fixe également un rapport intermaxillaire stable et réitératif, objective l'espace occluso-prothétique disponible pour les différents composants chirurgicaux et prothétiques. Elle donne par ailleurs une idée concrète du **résultat esthétique final** au patient ainsi qu'au praticien. Elle peut également permettre au patient qui n'a jamais été appareillé de s'habituer progressivement à un volume et un encombrement qui lui étaient jusqu'alors inconnus ou oubliés.

Elle nous semble d'autant plus importante et intéressante à réaliser dans le secteur antérieur, où l'esthétique (élément subjectif) occupe une place primordiale (17). Le passage par une prothèse de qualité est également incontournable dans les cas d'édentements complets pour lesquels « tout est à reconstruire », parfois sans aucun repère pour nous guider (plans de référence, esthétique, DVO, etc.).

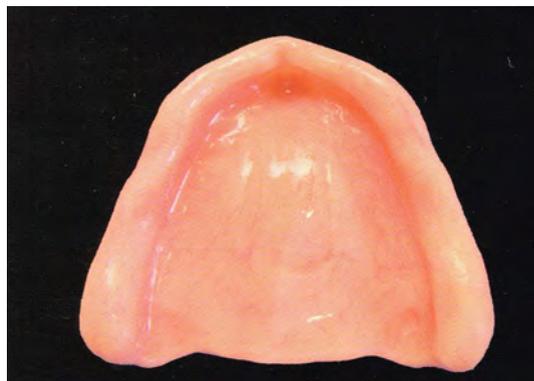
Cette prothèse provisoire présente par ailleurs un intérêt crucial à travers son rôle de **guide chirurgical** à venir en permettant de prévoir l'émergence des implants en fonction de la future prothèse d'usage qu'elle préfigure. Elle permet alors la gestion correcte des embrasures lors de la phase prothétique.

Cette prothèse de qualité validée peut être considérée comme la véritable « **pièce maîtresse** » de toute la suite du traitement prothétique (1). Il est donc capital d'analyser cette dernière sur un plan qualitatif en considérant 3 éléments clés contribuant grandement au succès thérapeutique : 1) L'exploitation correcte des surfaces d'appui ; 2) L'existence d'un rapport intermaxillaire précis et réitératif ; 3) La satisfaction du patient sur le plan esthétique.

Figure 2 : Photographies représentant la phase préparatoire chez l'édenté total maxillaire.



- a. Empreinte primaire, porte-empreinte individuel issu de celle-ci et empreinte secondaire maxillaire.**



- b. Intrados de la prothèse complète répondant à tous les critères de qualité. Cette dernière permettra une gestion correcte des futures embrasures aux stades de la planification et de la chirurgie implantaire, gage d'un résultat esthétique satisfaisant.**

♦ Remarque 1 : Dans le cadre du protocole de traitement **NobelGuide™** chez l'édenté total, cette prothèse peut directement servir de guide d'imagerie. Si le patient est déjà porteur d'une prothèse amovible, cette dernière devra être évaluée selon des critères spécifiques démontrant sa qualité. Cette étape est importante puisque le concept occluso-prothétique retenu en début de traitement va être conservé intégralement. Si la prothèse ne remplit pas ces critères, une nouvelle prothèse devra être réalisée et fixera tous les paramètres du traitement (5).

♦ Remarque 2 : Dans le cas particulier du **couplage** du système **Cerec** au **cone beam**, cette phase préparatoire est « contournée » car on ne passe pas par le port d'une prothèse provisoire. Le projet prothétique est ici modélisé de façon virtuelle sur écran et ne sera pas testé en bouche. La prise en compte de ce paramètre peut constituer une des limites inhérentes à l'utilisation de ce système même s'il est actuellement limité au remplacement de 2 à 3 dents.

2.2. Analyse du projet prothétique implantaire

2.2.1. Différentes modalités visant à matérialiser le projet prothétique

- Wax up ou cire diagnostique
- Montage directeur

Ces modélisations en cire préfigurant la future restauration prothétique sont réalisées après montage en articulateur (21).



Figure 3 : Photographie illustrant la préparation d'un wax up des dents manquantes au niveau des sites de 14, 15, 16, 23 et recouvrant le palais. Ce dernier sera bientôt dupliqué en résine afin de servir de guide radiologique lors de la phase de planification implantaire.

- Prothèse adjointe (provisoire ou d'usage, satisfaisant les critères de qualité et validée)

→ Il convient de noter que ces éléments diagnostiques peuvent aujourd'hui être scannés et intégrés dans les **logiciels** de planification implantaire dédiés (SimPlant®).

- Modélisation par wax up virtuel après empreinte optique du site édenté : cas particulier du couplage Cerec/cone beam

Il est aujourd'hui possible d'effectuer l'empreinte optique du site édenté puis de modéliser virtuellement la future restauration prothétique optimale correspondante grâce à la fonction de **wax up numérique** du système Cerec (6).

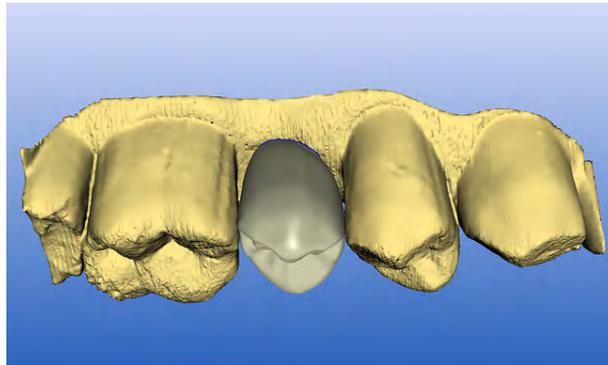


Figure 4 : Image illustrant la modélisation de la future restauration prothétique supra-implantaire envisagée en site de 15 grâce à la fonction de wax up virtuel du système Cerec après empreinte optique du site édenté correspondant.

Il existe 3 options différentes pour réaliser ce wax up virtuel : (22)

- 1) À partir de l'empreinte optique d'un wax up préalablement réalisé sur un modèle en plâtre conventionnel ;
- 2) En faisant appel à une base de données contenue dans le logiciel Cerec ;
- 3) L'informatique peut également « inventer » la morphologie des couronnes absentes.

Ce protocole de traitement est actuellement réservé à des édentements de faible étendue, ce qui en limite grandement l'intérêt. Cependant, nous pouvons tout de même reconnaître des atouts à ce système innovant représentant un véritable **outil de communication** avec le patient. Il autorise en effet la visualisation de la future réhabilitation prothétique modélisée sur l'écran ainsi que l'ensemble des étapes thérapeutiques qui vont suivre, ce qui peut l'impliquer davantage dans son traitement.

Ce système procure également une **autonomie** non négligeable au praticien (22).

Les données issues de cette modélisation virtuelle peuvent effectivement être fusionnées à celles de l'imagerie cone beam afin de réaliser une planification implantaire sur mesure à l'intérieur du logiciel prévu à cet effet.

Ce procédé de traitement sera abordé plus en détail dans le chapitre correspondant.

2.2.2. Intérêts de ces modélisations

2.2.2.1. Duplicata pour le guide radiologique

Le guide radiologique est confectionné en dupliquant wax up, montage directeur ou prothèse adjointe du patient (23). Il peut également correspondre à la prothèse provisoire ou d'usage du patient, validée et aménagée à cet effet (cf. protocole NobelGuide™).

Ce guide d'imagerie doit présenter des caractéristiques permettant son utilisation au cours de 2 étapes fondamentales : 1) l'étape diagnostique d'**acquisition radiologique** (*à partir de laquelle la planification implantaire sera réalisée*) et 2) l'étape référentielle lors de la **chirurgie** (pour une thérapeutique conventionnelle, cf. partie III) (4).

La qualité de ce guide initial élaboré dans le respect du projet prothétique est primordiale puisqu'il permet de **confronter** ce dernier aux considérations **anatomiques** au stade de la planification implantaire (24).

2.2.2.2. Vers une planification purement numérique (6)

Dans le cas particulier du système intégré de Sirona couplant Cerec et CBCT, le wax up virtuel peut être directement fusionné aux données de l'imagerie tridimensionnelle sur un logiciel dédié, ne nécessitant **pas** la réalisation d'un **guide radiologique** à porter durant l'acquisition volumique.

→ Ce système permet donc la corrélation entre images 3D surfaciques (obtenues en bouche) et acquisition radiologique tridimensionnelle.

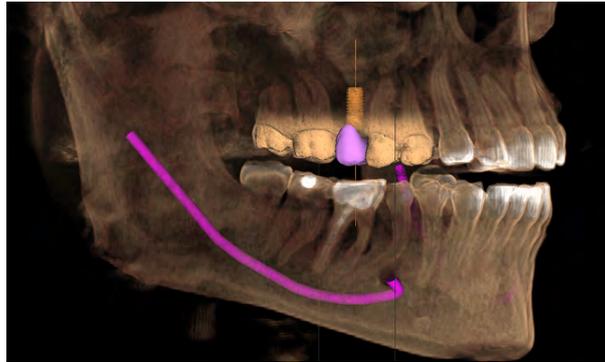


Figure 5 : Image illustrant la fusion du projet prothétique numérique en site de 15 aux données issues de l'imagerie tridimensionnelle CBCT pour une planification implantaire dynamique et interactive personnalisée.

2.2.3. Rôle et propriétés du guide radiologique lors de la planification implantaire

2.2.3.1. Matérialisation du projet prothétique au stade de l'imagerie

Le guide d'imagerie mis en bouche durant l'acquisition radiologique permet de préciser la pertinence du projet envisagé en le confrontant à son environnement anatomique, notamment à travers l'analyse de la concordance entre l'**axe prothétique souhaité** et le **volume osseux résiduel** (cf. angle anatomo-prothétique).

Il permet en effet d'évaluer le volume osseux en regard des sites implantaires analysés, renseigne sur la morphologie d'une insuffisance osseuse éventuelle et enfin permet d'estimer la hauteur des tissus gingivaux (comprise entre l'intrados du guide et la crête).

Il est indispensable lorsque l'IAO est utilisée pour procéder à la pose guidée des implants ou à la préparation d'une prothèse avant la chirurgie, sauf dans le cas particulier du couplage Cerec/CBCT.

Afin de répondre aux attentes dont il est porteur, il doit respecter un **cahier des charges** spécifique et rigoureux qu'il convient de rappeler (13).

2.2.3.2. Cahier des charges du guide d'imagerie

Le guide radiologique peut se présenter sous différentes formes mais incorpore systématiquement des repères radio-opaques contribuant à la lecture des clichés.

Il peut comporter des perforations au niveau des sites implantaires jugés « optimaux » remplies d'un matériau radio-opaque (20), des couronnes radio-opaques perforées en leur centre ou encore des repères radio-opaques disposés au niveau de l'extrados de la prothèse faisant office de guide lors de l'acquisition radiologique (5).

Il doit par ailleurs répondre aux **propriétés** suivantes :

- 1) Être suffisamment radio-opaque ;
- 2) Déterminer l'enveloppe de la restauration prothétique ;

Dans l'idéal, projet prothétique et considérations anatomiques coïncident et un compromis n'est pas nécessaire. Cependant, dans de nombreux cas, un compromis entre l'axe implantaire idéal et celui autorisé par les bases osseuses disponibles devra être trouvé.

→ L'accès aux contours de la prothèse permet alors de mieux envisager les limites du compromis possible.

- 3) Déterminer l'épaisseur des tissus mous ;
- 4) Informer sur l'axe d'émergence idéal des implants ;

Un puits de forage d'environ 2 mm de diamètre doit être réalisé au niveau de chaque couronne du guide, là où le praticien souhaiterait idéalement situer l'axe d'émergence de l'implant. Ce forage dénué de matériel radio-opaque induit la présence d'un cylindre radio-clair au cœur des couronnes radio-opaques sur les coupes obliques de la radiographie (ou inversement si le guide est radio-clair et comporte des forages remplis d'un matériau opaque). Ce dernier signale l'axe implantaire au milieu de l'élément prothétique.

→ Pour l'IAO, ce cylindre radio-clair est très utile car c'est sur ce plan là que l'implant sera simulé sur le logiciel (SimPlant® par exemple).

5) Être stable et rétentif.

Si lors de l'acquisition radiologique le guide n'est pas dans la position originelle prévue, la planification sera erronée et les implants placés en mauvaise position. Cette exigence de stabilité est d'autant plus importante chez l'édenté total car la prothèse doit être maintenue en parfaite occlusion.

→ Un mordus intermaxillaire garantit alors le bon positionnement du guide durant l'acquisition.



Figure 6 : Photographie représentant la vue occlusale d'un guide radiologique essayé en bouche, duplicata d'une prothèse amovible résine restaurant le bloc incisif maxillaire. Les couronnes enrichies en matériau radio-opaque présentent des puits matérialisant l'axe de forage idéal des 4 implants antérieurs souhaités.

Ce guide d'imagerie revêt une importance toute particulière car situé au cœur de la planification implantaire (qu'elle soit conventionnelle ou virtuelle) à partir de laquelle les implants seront positionnés et la réhabilitation prothétique confectionnée.

L'**essayage** de ce dernier **avant** l'acquisition radiologique est primordial car il vient confirmer les rapports d'occlusion et témoigne de sa **stabilité**, condition indispensable à la précision de la planification implantaire à venir.

3. CONFRONTATION DU PROJET PROTHÉTIQUE AUX CONSIDÉRATIONS ANATOMIQUES : L'IMAGERIE PRÉ-IMPLANTAIRE

Le guide radiologique, duplicata du projet prothétique, permet de mettre en relation ce dernier avec l'anatomie du patient. La confrontation de ces deux types d'informations complémentaires via l'imagerie représente en effet la base de la planification implantaire (25).

3.1. Buts de l'imagerie lors de la planification implantaire

3.1.1. Évaluation du volume et de la densité osseuse

Il est aujourd'hui largement admis que l'ostéointégration de nos implants constitue une conséquence prédictible de leur positionnement tridimensionnel. On comprend alors que l'évaluation correcte du **volume** et de la **qualité osseuse** représente un enjeu majeur au stade de la planification (15).

3.1.1.1. Typologie osseuse : rappels

La classification la plus utilisée, fondée sur la distribution entre tissu osseux cortical et spongieux, a été décrite par Lekholm et Zarb en 1985 :

- 1) l'os de **type I** est dense, composé principalement d'os compact ;
- 2) l'os de **type II** comprend une couche épaisse d'os compact entourant un noyau d'os spongieux dense ;
- 3) l'os de **type III** comporte une couche fine d'os cortical entourant un noyau d'os spongieux dense ;
- 4) l'os de **type IV** comprend une couche très fine d'os cortical entourant un noyau d'os spongieux de faible densité (20).

D'autres classifications ont par ailleurs été proposées afin de décrire les diverses densités osseuses, parmi lesquelles nous pouvons citer la classification de Misch (1990) ainsi que celle de Trisi et Rao (1999).

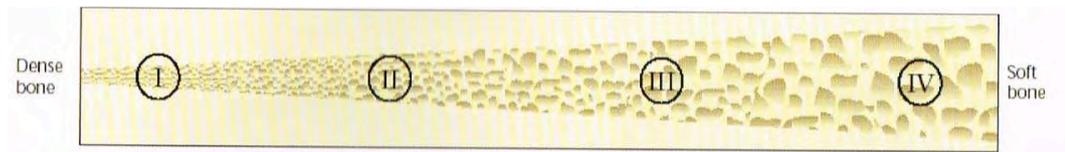


Figure 7 : Image illustrant le gradient de densité osseuse, d'après Albrektsson et Zarb (1989).

Quelles implications cliniques ?

La densité osseuse influe sur la séquence de forage ainsi que sur le choix du design implantaire (26). L'évaluation de la qualité osseuse est importante afin de réaliser un acte chirurgical atraumatique tout en optimisant l'**ancrage primaire** de l'implant, garant de son ostéointégration (3).

Le choix du protocole chirurgical, de l'état de surface ainsi que de l'anatomie implantaire dépend directement de la densité osseuse, son **analyse radiologique** constitue donc un élément capital lors de la planification implantaire.

→ L'imagerie **tridimensionnelle** est le meilleur examen radiologique pour réaliser une analyse morphologique et qualitative de l'os résiduel (8).

♦ Remarque : La densité osseuse observée sur ces clichés ne permet cependant pas une corrélation précise avec la situation clinique. En effet, une faible corrélation entre la sensation clinique et la réalité histologique a été retrouvée (20). La technique chirurgicale doit de ce fait être adaptée au cours de l'intervention en fonction du ressenti tactile du praticien.

3.1.1.2. Volume osseux minimal et règles de positionnement tridimensionnel (27)

L'imagerie pré-implantaire doit également être capable de renseigner de façon précise le **volume osseux** résiduel. En effet, un volume minimum est nécessaire dans les 3 plans de l'espace afin de pouvoir mettre en place un ou plusieurs implants sans endommager les structures anatomiques adjacentes.

Ce volume découle des règles de positionnement implantaire, que nous rappellerons brièvement :

- 1) Dans le sens vestibulo/lingual : des lamelles osseuses d'au moins 1 mm doivent être présentes de part et d'autre de l'implant (on passe à 2 mm en secteur esthétique) ;
- 2) Dans le sens vertical : le col de l'implant doit se trouver entre 1 et 3 mm apicalement au collet des dents adjacentes. De plus, il est nécessaire de respecter une marge de sécurité de 2 mm par rapport aux obstacles anatomiques. Une pénétration de 1 à 2 mm dans le sinus est quant à elle tolérée (comblement sinusien par voie crestale, cf. technique des ostéotomes (28)) ;
- 3) Dans le sens mésio/distal : une distance de 1,5 à 2 mm entre dent et implant est nécessaire, elle est d'au moins 3 mm entre 2 implants contigus.

→ Si la quantité d'os n'est pas suffisante, il faut s'orienter vers des **aménagements osseux** préalables.

Cette analyse initiale est capitale puisque ce sont ces informations qualitatives et quantitatives qui vont permettre de poser l'indication de la technique chirurgicale pouvant être utilisée (deux temps chirurgicaux, un temps chirurgical, mise en charge immédiate) ainsi que des moyens chirurgicaux à mettre en œuvre pour permettre son succès (sous-dimensionnement des puits de forage, ancrage bicortical, taraudage) (1).

3.1.1.3. Intérêts de l'IAO dans cette application

Les logiciels d'IAO permettent de déterminer la densité osseuse péri-implantaire et de ce fait d'**optimiser** le **positionnement** implantaire tridimensionnel par simulation en fonction de cette donnée précieuse.

D'autre part, lorsque le volume osseux est insuffisant ou mal situé par rapport aux exigences prothétiques, il est nécessaire de recourir à des **greffes osseuses** (29). Ce type d'intervention plus ou moins lourd et invasif rallonge considérablement la durée globale du traitement et va de pair avec une augmentation non négligeable du coût de la réhabilitation (26).

Nous verrons que l'IAO s'impose aujourd'hui comme une alternative à ces augmentations osseuses en optimisant le volume osseux disponible au niveau du site implantaire grâce à une analyse fine et précise des bases osseuses. Le cas échéant, les logiciels associés permettent de déterminer le type de greffe osseuse à envisager ainsi que la quantité de matériau nécessaire à celle-ci dès la phase de simulation.

La réalisation d'une telle planification permet également une visualisation plus aisée des conséquences tridimensionnelles du positionnement des implants.

3.1.2. Localisation des obstacles anatomiques critiques

L'imagerie consacre par ailleurs un intérêt particulier à la localisation précise de certaines structures anatomiques dites « à risque » afin de conserver une **marge de sécurité** par rapport à celles-ci au cours de la chirurgie. On comprend donc que la planification implantaire doit intégrer ce paramètre essentiel en vue de réaliser une chirurgie atraumatique vis à vis de ces éléments. Les logiciels de simulation apportent en ce sens une aide complémentaire en autorisant la mise en évidence de ces obstacles anatomiques (13).

Il conviendra de rappeler brièvement les principales structures anatomiques à identifier au stade de la planification, sous peine de les endommager durant la chirurgie implantaire (30).

3.1.2.1. Le sinus maxillaire

L'imagerie doit pouvoir renseigner l'**anatomie sinusienne** ainsi que ses particularités, avec notamment:

- 1) la présence de septa, correspondant à des cloisons osseuses dont la présence peut modifier le protocole chirurgical car impliquant un risque majoré de perforation de la membrane sinusienne (31) ;
- 2) l'état de la membrane de Schneider ainsi que la perméabilité de l'ostium (24) ;
- 3) la présence d'une pathologie sinusienne, notamment si une greffe de sinus est envisagée ;
- 4) la position de l'artère alvéolo-antrale également dans le cas d'une greffe par voie d'abord vestibulaire.

3.1.2.2. Le canal dentaire inférieur

Principal obstacle anatomique à la mandibule, la lésion de son paquet vasculo-nerveux induit un risque neurologique majeur. C'est la raison pour laquelle une marge de sécurité de 2 mm doit impérativement être respectée vis à vis de celui-ci afin de préserver les petites ramifications nerveuses pouvant être comprimées lors de la chirurgie (30).

3.1.2.3. Le foramen mentonnier

L'émergence du nerf mentonnier présente parfois une boucle antérieure qu'il convient de détecter radiologiquement étant donné que son anatomie est inconstante. Une distance de sécurité de 2 mm doit également être préservée ici.

3.1.2.4. Vaisseaux et risque hémorragique

Lors d'une chirurgie implantaire intéressant la zone postérieure mandibulaire, l'application d'un axe ou d'une profondeur de forage ne tenant pas compte du relief mandibulaire peut conduire à une perforation de la corticale interne, associée à un risque d'atteinte du réseau vasculaire à l'origine d'**hémorragies sous-mylohyoïdiennes** (4). Il convient donc de repérer la présence de concavités linguales à la mandibule, impliquant un risque de lésion des artères submentale et sublinguale ou encore d'atteinte du nerf lingual (30).

♦ Remarque : Deux points importants se dégagent ici :

- 1) L'importance de disposer d'une technique d'imagerie de qualité alliant fiabilité, précision et permettant de localiser rigoureusement ces obstacles anatomiques à risque : intérêt de l'**imagerie sectionnelle**.
- 2) La nécessité d'intégrer ces informations cruciales lors de la phase chirurgicale : intérêt des guides chirurgicaux et de la **chirurgie assistée** par ordinateur.

→ L'IAO s'impose alors comme un outil de choix dans ces 2 applications majeures.

3.1.3. Planification implantaire proprement dite

C'est sur la base des informations apportées par ces clichés radiologiques que le site implantaire, la longueur, le diamètre, le design mais aussi le positionnement implantaire tridimensionnel sont déterminés.

Afin d'effectuer cette planification implantaire, le praticien dispose aujourd'hui de différents outils : - Les calques

- Les bibliothèques d'implants

3.1.3.1. Les calques

La **planification conventionnelle** est réalisée à l'aide de calques fournis par les fabricants et indiquant la silhouette des implants disponibles. Ils sont superposés aux clichés radiologiques afin de vérifier par transparence le volume d'os périphérique disponible ainsi que la proximité de structures anatomiques. Les calques indiquent également, par un repère apical, la position de la pointe du foret qui sera utilisé de façon à prévoir une distance de sécurité.

Lorsque le praticien contrôle la position de l'implant à l'aide du calque sur des coupes coronales de scanner, il convient de contrôler sur plusieurs coupes le respect des structures adjacentes car chaque coupe est espacée de 1 mm. Un implant dont le diamètre varie de 3 à 6 mm s'étale donc sur 3 à 6 coupes.

→ Les calques correspondent à des outils que l'on peut qualifier de « **statiques** » et majorent le risque d'erreur ainsi que d'imprécision au stade de la phase de planification implantaire.

3.1.3.2. Les bibliothèques d'implants

Si la planification est réalisée sur un **logiciel** de simulation d'IAO, le praticien qui dispose de bibliothèques d'implants peut réaliser une planification dynamique en fonction du projet prothétique et des informations anatomiques apportées par l'imagerie, visualisés en temps réel sur l'écran. Le positionnement tridimensionnel de l'implant retenu est alors intégré sur toutes les coupes disponibles, à l'intérieur desquelles il est possible de naviguer avec une vision de « l'impact » du positionnement implantaire dans les 3 dimensions de l'espace.

L'imagerie occupe une place majeure au sein de la thérapeutique en aiguillant le diagnostic pré-implantaire. L'évolution de cette discipline s'est notamment faite en parallèle et à travers le développement d'une **imagerie de plus en plus fine** ayant pour principaux objectifs un diagnostic plus précis, garant d'une sécurité opératoire accrue (32). Les logiciels associés à l'IAO exploitent aujourd'hui le potentiel de cette imagerie nouvelle représentée par le scanner et le CBCT.

3.2. Quel protocole radiologique d'acquisition adopter en implantologie ?

« *L'analyse des examens radiologiques requiert des clichés exploitables, précis et fiables afin de réaliser une planification implantaire de qualité.* » (4)

3.2.1. Évolution vers une imagerie sectionnelle

La connaissance précise des sites à implanter ainsi que des structures anatomiques voisines ne pouvant être appréhendée qu'à travers une analyse radiographique rigoureuse, les techniques d'investigations radiologiques ont considérablement évolué ces dernières décennies en réponse à la nécessité d'améliorer la précision du diagnostic pré-implantaire. L'imagerie sectionnelle permet aujourd'hui d'effectuer une planification implantaire fiable (15).

3.2.1.1. Limites inhérentes à l'imagerie bidimensionnelle

L'imagerie bidimensionnelle (radiographie rétroalvéolaire RA et panoramique dentaire OPG) se voit aujourd'hui supplantée par l'imagerie de coupe, plus fiable et plus précise lors de l'analyse pré-implantaire.

Même si la radiographie panoramique est toujours indiquée en première intention en tant que cliché de « débrouillage » permettant de dresser un bilan global de l'état de la cavité buccale, ce type de cliché s'avère souvent insuffisant et présente de **nombreuses limites** (33). Il s'agit en effet d'une image surdimensionnée (le coefficient d'agrandissement varie de 1,25 à 1,7) présentant des déformations ainsi que des distorsions (34). C'est pourquoi cet examen ne permet qu'une estimation approximative des dimensions osseuses et exclut toute mesure précise (d'après Cavézian et Pasquet, 2005).

Cependant, les examens rétroalvéolaires ou panoramiques peuvent parfois être suffisants dans les cas isolés qualifiés de « simples » où les sites à implanter ne présentent pas d'obstacles anatomiques majeurs et pour lesquels le volume osseux disponible est confortable.

Toutefois, ce type d'imagerie ne renseigne aucunement sur le volume osseux disponible, elle ne peut donc informer sur la largeur de la crête osseuse dans le sens vestibulo/lingual ni sur la présence de concavités (35). Dans ce cas, l'examen clinique apporte certes une estimation, mais seule l'**imagerie volumique** permet d'identifier précisément ce paramètre crucial (20).

L'imagerie bidimensionnelle souffre donc d'un manque d'informations vis à vis d'un plan de l'espace (25). Les images en 3 dimensions apportées par le scanner et le CBCT sont aujourd'hui très demandées car elles permettent de s'entourer d'un maximum de **précautions**, encore faut il qu'elles soient justifiées.

3.2.1.2. Intérêts de l'imagerie sectionnelle

L'acquisition d'un volume anatomique en 3 dimensions permet d'obtenir des images reconstruites en 2 dimensions selon différents plans de l'espace : plans panoramiques, coupes axiales ou horizontales, coupes coronales ou transversales (perpendiculaires à la tangente à la courbe panoramique au point de coupe). Ces coupes sont acquises tous les millimètres (34).

Les principaux **intérêts** qui se dégagent de l'imagerie de coupe sont les suivants : (4)

- 1) fournir des clichés en taille réelle et sans déformation ;
- 2) obtenir des indications précises relatives à la qualité et la quantité osseuse ;
- 3) mettre en évidence des pathologies non visibles sur la radiographie panoramique ;
- 4) bien délimiter les structures anatomiques et leurs rapports ;
- 5) visualiser les rapports entre la zone osseuse à implanter avec l'orientation des racines avoisinantes ;
- 6) représenter un support pédagogique permettant d'expliquer au patient sa situation clinique ;
- 7) constituer un document initial à forte valeur médico-légale ;
- 8) réalisée avec le guide radiologique et couplée avec un logiciel de simulation implantaire, les données recueillies permettent de réaliser la **planification implantaire** et d'élaborer une **stratégie chirurgico-prothétique** ;
- 9) un guide chirurgical peut ensuite être élaboré à partir de ces données (24).

♦ Remarque concernant la mesure des bases osseuses : l'examen radiologique 3D permet une grande souplesse dynamique dans l'analyse des dimensions des bases osseuses. Les logiciels associés sont performants et donnent accès aux dimensions exactes, plus particulièrement aux endroits où **chaque millimètre** de tissu osseux compte.

→ Les applications sont donc d'autant plus intéressantes en présence d'un volume osseux résiduel insuffisant ou réduit (20).

L'imagerie sectionnelle permet également d'orienter vers la nécessité et le type de greffe à envisager en fonction des caractéristiques du déficit osseux.

Scanner et CBCT permettent d'obtenir des informations précises concernant les volumes osseux disponibles, les rapports anatomiques ainsi que la présence d'une pathologie non détectée à la radiographie classique. L'intégration de ces données fondamentales à l'intérieur de logiciels de simulation implantaire dédiés constitue l'essence même de l'IAO (23).

3.2.2. Imagerie sectionnelle et planification assistée par ordinateur

Parallèlement au souhait de réalisations prothétiques garantes d'une esthétique croissante, des outils radiographiques et informatiques de plus en plus sophistiqués arrivent sur le marché. C'est grâce aux développements et avancées de l'imagerie tridimensionnelle que le concept d'IAO vit le jour à travers la mise au point de logiciels de simulation performants débouchant bientôt sur la fabrication de guides chirurgicaux fiables (25).

Il est à noter que le **cone beam** s'impose aujourd'hui comme une modalité d'acquisition tridimensionnelle de choix mais aussi d'avenir en permettant de gagner en qualité et précision lors de la phase de planification, tout en réduisant les doses d'irradiation délivrées au patient et souvent décriées (30). Il présente d'autre part des avantages non négligeables par rapport au scanner, en plus d'être plus accessible au cabinet dentaire (32).

Une étude pilote ex-vivo a démontré sa capacité à offrir des données fiables au cours de la phase de planification implantaire ainsi que leur transfert précis sur le site chirurgical chez l'édenté partiel (15).

Les logiciels d'IAO ont en somme pour vocation d'effectuer une **planification implantaire précise** et rigoureuse résultant en un **positionnement implantaire tridimensionnel amélioré** tout en **minimisant** les **risques anatomiques** associés durant l'intervention. Nous verrons qu'il en découle de nombreux apports lors de la chirurgie mais également d'un point de vue prothétique (36).

Cette planification virtuelle permet d'autre part l'investigation de différentes possibilités thérapeutiques menant à un plan de traitement optimal (7).

Ces logiciels peuvent par ailleurs être utilisés comme outils d'aide à la prise de décision pour les cas complexes (par exemple chez l'édenté total maxillaire où la résorption osseuse vient souvent compliquer la thérapeutique). La fusion des informations lors de la phase diagnostique initiale vient ici simplifier la prise de décision concernant le **type de prothèse** à envisager, tout en augmentant la prédictibilité du **résultat thérapeutique** esthétique et fonctionnel attendu (17).

♦ Remarque : Les données du scanner sont directement converties par le praticien à l'aide d'un logiciel spécifique ou transmises à un centre de traitement qui, après suppression de tout artéfact des reconstructions, adresse au praticien un CD-ROM lui permettant d'entamer la planification du cas (1).

4. PLANIFICATION IMPLANTAIRE SUR LOGICIELS DE SIMULATION DÉDIÉS

Nous présenterons dans ce chapitre les différents temps de la planification virtuelle ainsi que les diverses fonctions associées aux principaux logiciels de simulation implantaire. Nous nous intéresserons plus particulièrement à 4 systèmes actuellement sur le marché en soulignant leur diversité ainsi que leurs particularités à travers les 4 approches différentes que nous décrirons.

4.1. Transfert des données de l'imagerie au format DICOM à l'intérieur du logiciel de planification implantaire

Suite à l'acquisition volumique, la 1^{ère} étape consiste à extraire les fichiers DICOM fournis par le radiologue ou autre personne compétente en radiologie (CD-ROM, clé USB, etc.). Après avoir sélectionné la zone de travail relative au patient, un modèle tridimensionnel est reconstruit et visualisé dans les 3 plans de l'espace (5). Il est alors aisé de naviguer à l'intérieur de ce modèle comportant à la fois les informations anatomiques et prothétiques. Celui-ci servira ensuite de support à la planification numérique.

♦ Remarque : Intérêt lors du couplage Cerec et CBCT : acquisition volumique au **cabinet** et réalisation de l'**empreinte optique** du site édenté lors d'un seul et même rendez-vous puis planification après fusion de ces 2 types de données. Ceci autorise l'esquisse des options thérapeutiques possibles ainsi que l'estimation du coût de la thérapeutique, renseignant alors le patient lors de la 1^{ère} consultation sans multiplier les examens et les visites au cabinet (6).

4.2. Planification virtuelle : le logiciel d'IAO et ses différentes fonctions

4.2.1. Fonctions du logiciel pour la planification du plan de traitement

Les fonctions destinées à la simulation 3D autorisent la superposition d'implants issus d'une large bibliothèque (dans laquelle la plupart des systèmes implantaires sont représentés) sur les bases osseuses détectées par la radiographie selon un mode tridimensionnel (13).

En effet, il est possible de faire pivoter ces implants dans les 3 sens de l'espace puis de visualiser immédiatement l'incidence de ces mouvements sur l'ensemble des coupes disponibles. À partir de cette bibliothèque, il est également aisé de choisir un diamètre et une longueur d'implant et de vérifier si ce choix est compatible avec le volume osseux résiduel ainsi qu'avec le projet prothétique. Nous pouvons aussi sélectionner un des piliers implantaires disponibles afin d'apprécier son incidence sur la future construction prothétique.

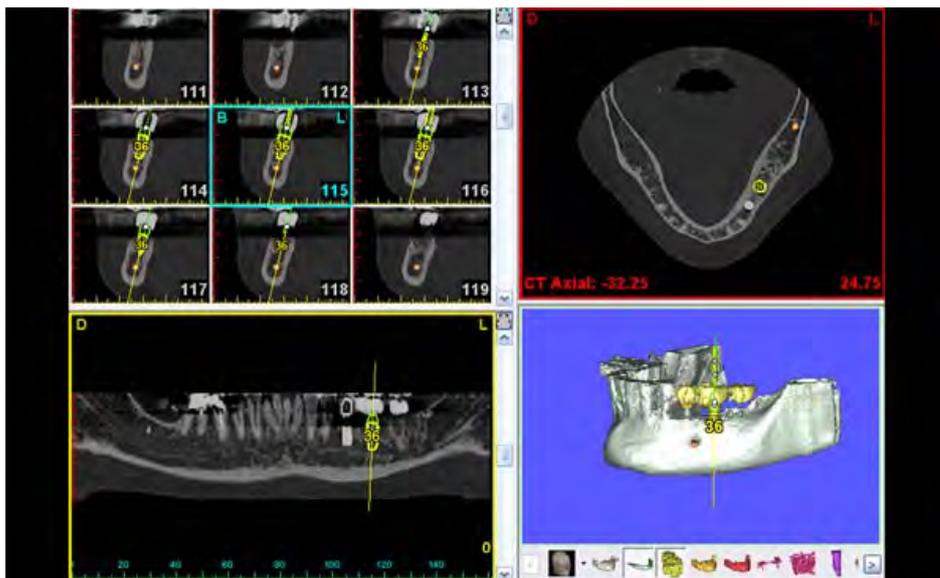


Figure 8 : Capture d'écran illustrant l'accès visuel simultané aux différents plans offerts par le logiciel SimPlant®. En bas à gauche, vue panoramique : l'implant et son pilier, les structures osseuses voisines ainsi que le nerf alvéolaire inférieur apparaissent sur ce plan. En haut à gauche, succession de coupes obliques antéro-postérieures, les 9 plans couvrent ici la simulation d'un implant en site de 36. En haut à droite, coupe axiale : il est possible de « dérouler » l'ensemble des plans axiaux. En bas à droite, reconstitution 3D des coupes.

4.2.1.1. Reconnaissance sur le site de l'intervention chirurgicale

1. Survol dynamique dans tous les plans de l'espace

À partir de l'acquisition volumique, les différents plans sont reconstruits par le logiciel en un volume tridimensionnel. Le logiciel offre simultanément une vue panoramique, axiale, sagittale et une reconstruction 3D en relief.

→ Le praticien a donc la possibilité d'effectuer un repérage des lieux avant la chirurgie (20).

2. Visualisation du volume osseux disponible et des obstacles anatomiques

❖ Les obstacles anatomiques

L'opérateur a la possibilité d'effectuer manuellement le tracé du contenu du canal dentaire inférieur de façon dynamique sur le logiciel à partir de tous les plans ainsi que sa rectification si nécessaire.

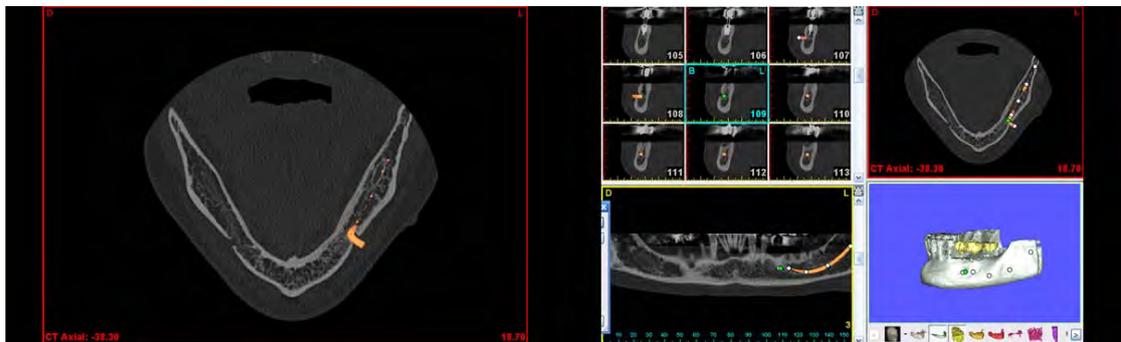


Figure 9 : Capture d'écran démontrant le tracé du parcours du nerf alvéolaire inférieur sur une vue axiale ainsi que son apparition sur l'ensemble des plans permettant une appréciation globale de la zone à implanter en secteur 3 (logiciel SimPlant®).

❖ Volume osseux disponible

Hauteur et largeur osseuse sont plus faciles à déterminer à l'aide des logiciels d'IAO. Ces images permettent par ailleurs de visualiser à la fois le volume osseux résiduel mais aussi le guide radiologique.

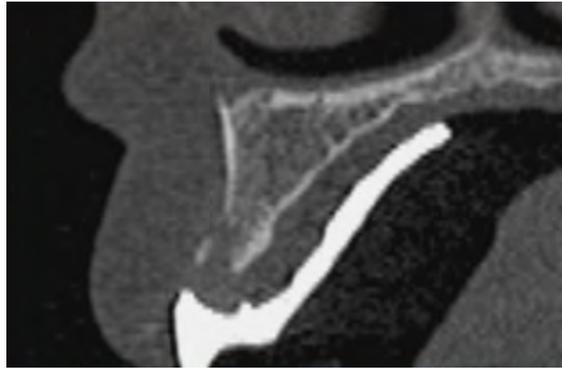


Figure 10 : Agrandissement d'une coupe transversale appelée à recevoir la simulation implantaire dans le cas d'un édentement unitaire antérieur en site de 11. Reconstitution volumique de la situation osseuse autorisant la mesure précise de la hauteur osseuse ainsi que le rapport avec le guide radiologique en regard du site exploré sur le logiciel d'IAO.

❖ **Densité osseuse**

L'avantage d'une reconstitution dynamique réside également en la possibilité d'obtenir la répartition de la densité osseuse autour de l'implant de manière détaillée et imagée (tant en unités Hounsfield (UH), que dans leur traduction plus clinique en qualité osseuse de type I à IV selon la classification de Lekholm et Zarb (1985) ou en os de qualité 1 à 4 selon la classification de Misch (Misch, 1993)).

Comme nous l'avons précisé dans le chapitre 3, la détermination des densités osseuses peut induire une modification de la séquence de forage dans le sens du sous-forage ou de la nécessité d'usage du taraud (20).

♦ Remarque : Il convient toutefois de rappeler que le sens clinique du praticien reste déterminant au moment de la chirurgie, durant laquelle il peut se trouver face à une densité osseuse **différente** de celle prévue au vu de l'examen radiologique.

La reconnaissance des sites à traiter procure une assurance et une sécurité accrues dans le geste chirurgical.

4.2.1.2. Simulation d'une pose d'implant

A) AVEC UN GUIDE RADIOLOGIQUE

1. Positionnement implantaire

Le guide radiologique permet de vérifier l'adéquation entre le projet prothétique et les impératifs anatomiques. La planification implantaire est ainsi réalisée conformément aux souhaits du projet.

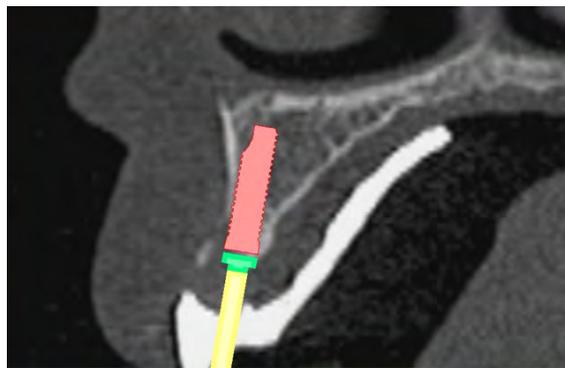


Figure 11 : Capture d'écran de la simulation de la pose d'implant sur une coupe oblique en site de 11. L'axe implantaire coïncide ici avec celui du projet prothétique matérialisé par le guide radiologique.

2. Détermination du diamètre adéquat et nécessité d'augmentation osseuse

Il est également possible de réaliser des simulations avec différents diamètres implantaires afin de visualiser leur incidence, impliquant parfois le recours à des greffes osseuses.

3. Détermination du volume à greffer

Grâce à ces logiciels, la nécessité d'une greffe et son étendue sont mieux identifiées. Il est par exemple possible d'effectuer la simulation d'un comblement sinusien et d'en calculer le volume nécessaire.

4. Choix des piliers

Le logiciel permet de choisir le pilier le plus adapté mais aussi d'en construire un sur mesure.

5. Orientation des implants et des piliers correspondants

Dans les cas complexes, en cas de résorption importante par exemple, des implants présentant des supra-structures angulées peuvent être envisagés afin d'éviter certains obstacles anatomiques (26). Le logiciel permet de déterminer si implants et piliers angulés correspondants sont compatibles avec le projet.

B) SANS GUIDE RADIOLOGIQUE : COUPLAGE CEREC ET CBCT

→ Il faut alors créer un projet prothétique virtuel que l'on modélisera après avoir réalisé une empreinte optique du site édenté.

4.2.1.3. Gestion des rapports des implants avec les structures adjacentes

1. Rapports avec le canal dentaire

La simulation 3D est d'un grand intérêt lorsqu'il faut précisément évaluer les distances séparant implants et obstacles anatomiques critiques, particulièrement en cas de forte résorption osseuse où l'exploitation de chaque millimètre d'os disponible est importante. La lecture de planches 2D peut en effet être à l'origine d'erreurs d'interprétation avec pour conséquences des greffes osseuses qui auraient pu être évitées ou encore l'effraction de structures anatomiques si le volume osseux a été surestimé par rapport à la réalité.

2. Distance inter-implantaire

Il peut arriver que le projet prothétique proposé ne soit pas compatible avec les règles de positionnement implantaire, en présence d'éléments anatomiques adjacents par exemple. Le logiciel de simulation permet ici de repenser un projet plus adapté aux considérations anatomiques.

→ Le concept d'implantologie assistée par ordinateur permet donc de familiariser le praticien avec le site chirurgical mais aussi d'appréhender d'éventuelles **difficultés** liées à l'intervention en amont de celle-ci afin de les gérer plus sereinement. Il constitue par ailleurs un véritable outil de communication au stade de la planification (12). En effet, le patient peut voir en avance les implants en place sur son arcade ainsi qu'une simulation de la prothèse à venir, ce qui rend la thérapeutique à venir un peu plus concrète et limpide pour lui.

4.2.2. Fonctions du logiciel en relation avec le guide chirurgical

Le logiciel permet également de choisir le type de guide chirurgical puisque ce dernier est conçu numériquement à partir de la planification implantaire tridimensionnelle réalisée au préalable (CAO).

4.2.3. Fonctions en relation avec la préparation de la prothèse à partir du guide chirurgical

Nous verrons dans la 2^{ème} partie qu'une prothèse immédiate peut être confectionnée à partir de la planification virtuelle réalisée sur le logiciel d'IAO.

4.3. Présentation de 4 logiciels actuellement sur le marché à travers 4 concepts différents

4.3.1. Le logiciel SimPlant®

Premier logiciel mis au point pour l'implantologie assistée en 1993, il connaît depuis une évolution constante.

Ce logiciel fait intervenir un guide radiologique radio-opaque répondant à un cahier des charges bien précis (décrit en I.2.2.3) s'imposant comme la traduction et la validation du projet prothétique conçu au préalable. Durant l'acquisition radiologique, le patient porte ce guide exactement dans la position prévue. Il fournit alors une indication sur l'enveloppe prothétique des dents ainsi que sur la position et l'orientation des implants souhaitées par le praticien.

L'information sur l'axe des implants est matérialisée par un forage d'environ 2 mm de diamètre au niveau de chaque couronne du guide, là où le praticien souhaiterait idéalement situer l'axe d'émergence de l'implant : c'est à ce niveau que l'implant va être simulé.

C'est sur la base de la planification virtuelle ainsi réalisée qu'un guide chirurgical sera ensuite fabriqué par stéréolithographie (cf. partie II) (12).

4.3.2. Le protocole de traitement par NobelGuide™

4.3.2.1. Présentation du système

La prothèse répondant aux critères de qualité préalablement soulignés et matérialisant le projet prothétique souhaité sert ici de guide d'imagerie durant l'acquisition volumique chez l'édenté **complet**.

Dans le cas d'un édentement **partiel**, le guide d'imagerie correspond au duplicata de la prothèse amovible partielle modifié par un recouvrement des dents restantes et muni de repères radio-opaques.

→ Ce procédé fait ensuite intervenir une procédure de double scannage afin de réaliser ultérieurement une planification implantaire conforme au projet initialement défini (cf. ci-après).

Il autorise la réalisation d'une chirurgie sans lambeau et la mise en charge immédiate d'une prothèse définitive chez l'édenté complet : il s'agit du concept « *Teeth-in-an-Hour* ».

♦ Remarque : Ce concept ne doit être retenu que face à des indications spécifiques et limitées.

4.3.2.2. Avantages de ce protocole de traitement

- 1) Les impératifs prothétiques sont ici au cœur des préoccupations puisque c'est la prothèse du patient qui vient guider les différentes étapes thérapeutiques ;
- 2) La possibilité de disposer d'un modèle tridimensionnel fiable permet dans de nombreux cas de repousser les indications de greffe et ainsi de traiter de façon plus simple et moins invasive un plus grand nombre de patients ;
- 3) La possibilité de réaliser des chirurgies sans lambeau avec une sécurité accrue ;
- 4) L'adjonction d'un protocole de mise en charge immédiate (MCI) avec une prothèse définitive (« *Teeth-in-an-Hour* ») : cette procédure constitue une véritable révolution dans le traitement de l'édenté complet.

Il est à noter que ces avantages ne sont pas spécifiques à ce protocole de traitement et seront mieux détaillés dans la 2^{ème} partie de ce travail.

4.3.2.3. Un système en 8 étapes (5)

1. Élaboration du guide d'imagerie

6 à 8 repères de 1,5 mm de diamètre sont ménagés au niveau de l'extrados de la prothèse puis remplis d'un matériau radio-opaque. Chez l'édenté partiel, le même procédé est réalisé au niveau du duplicata de la prothèse amovible partielle modifiée par recouvrement des dents restantes.

Nous rappelons qu'il est indispensable de se référer à une prothèse de qualité répondant à tous les critères demandés à une prothèse d'usage. Le succès de l'ensemble de la thérapeutique est véritablement dépendant de la qualité de cette restauration prothétique originelle car le futur guide chirurgical est directement déduit par stéréolithographie de l'intrados prothétique.



Figure 12 : Photographie représentant un guide d'imagerie NobelGuide™ : 6 à 8 repères radio-opaques sont disposés à différents niveaux au niveau de l'extrados de cette prothèse amovible complète maxillaire.

2. Acquisition radiologique : double scannage

Un scanner du patient prothèse en bouche est tout d'abord réalisé puis la prothèse seule est scannée. Les repères radio-opaques permettront ultérieurement la superposition des deux acquisitions, indispensable pour obtenir un modèle anatomique et prothétique fiable.

→ La procédure de double scannage permet ici d'obtenir une représentation fidèle de l'os ainsi que du guide radiologique (12).

3. Conversion des fichiers DICOM
4. Planification virtuelle de l'intervention chirurgicale

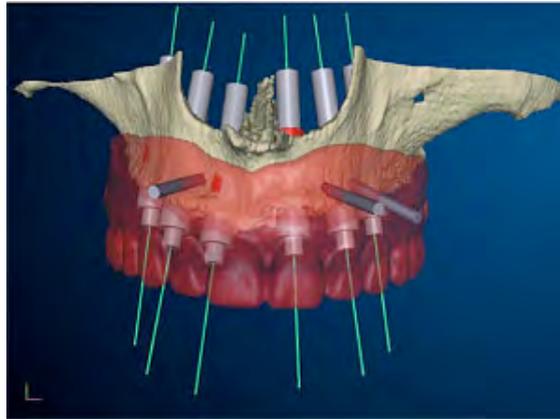


Figure 13 : Image illustrant la planification implantaire virtuelle de l'intervention chirurgicale (logiciel Procera®).

5. Envoi de la commande
6. Réception du guide chirurgical et des composants (+/- prothèse)
7. Réalisation de la prothèse au laboratoire
8. Intervention chirurgicale et pose de la prothèse provisoire ou définitive (**cf. partie II**)

4.3.3. Le couplage du système Cerec au CBCT

4.3.3.1. L'empreinte optique : un outil d'aide à la planification implantaire

Le système intégré de Sirona propose de partir d'un wax up virtuel modélisé à partir d'une empreinte optique de la région édentée et matérialisant le projet prothétique de départ à partir duquel la planification numérique sera bientôt réalisée.

Cette planification interactive est basée sur un projet prothétique capable d'évoluer en temps réel sur l'écran. Il est alors possible de « tester » différentes réhabilitations prothétiques virtuelles jusqu'à obtenir la solution jugée optimale.

Il s'agit donc d'une **planification purement numérique**.

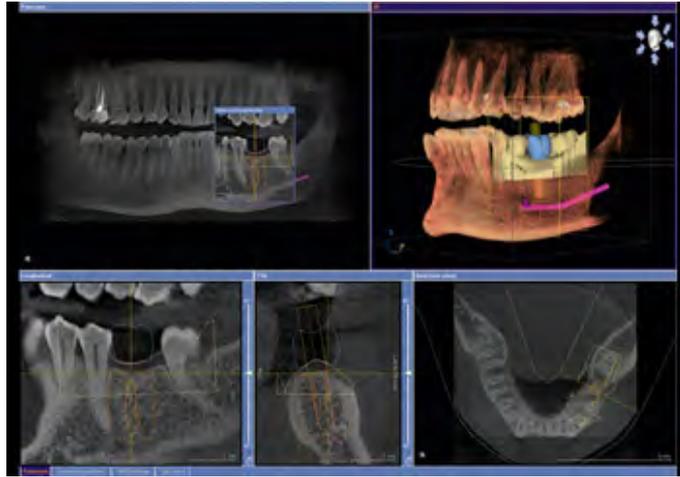


Figure 14 : Capture d'écran de la planification implantaire numérique au niveau du site de 36 sur le logiciel Galileos Galaxis après superposition de l'acquisition radiologique CBCT au projet prothétique modélisé virtuellement (couronne unitaire supra-implantaire).

Les possibilités prothétiques découlant de ce procédé sont également fort intéressantes (6). En effet, le couplage de l'imagerie tridimensionnelle à l'empreinte optique autorise la conception puis la fabrication assistées par ordinateur de la réhabilitation prothétique fixée supra-implantaire au fauteuil avec des résultats prédictibles (cf. partie III) (14).

4.3.3.2. Les étapes relatives à ce système de traitement : (16), (37), (6)

1. Acquisition tridimensionnelle de type CBCT bouche entrouverte car nous sommes dans le cas d'un édentement **partiel** (afin d'éviter les artéfacts dus à l'antagoniste).



**Figure 15 : Photographie du cone beam GALILEOS.
Son encombrement minimal ainsi que son coût nettement inférieur au scanner font de lui un outil abordable en cabinet dentaire.**

2. Empreinte optique du site édenté, de l'antagoniste ainsi que de l'occlusion et obtention d'un modèle tridimensionnel virtuel.



Figure 16 : Photographie représentant l'empreinte optique endo buccale avec la caméra optique du système Cerec.

Plus l'édentement est étendu, plus l'empreinte optique est délicate à réaliser. Il faut parfois passer par un modèle en plâtre conventionnel que l'on va ensuite scanner afin de faciliter cette étape, ce qui limite grandement l'intérêt de ce système (16).

3. Planification prothétique à l'aide du logiciel Cerec

La modélisation de la future couronne est effectuée grâce à la fonction de wax up du logiciel. Le profil d'émergence de la reconstruction est défini en traçant la préparation marginale virtuelle sur la gencive : elle sert de base à la modélisation virtuelle de la restauration envisagée (6). Ces données sont ensuite transférées dans le logiciel de planification implantaire.

4. **Imbrication/superposition** des données issues du **CBCT** et du **Cerec**

Ces informations complémentaires sont ensuite combinées : leur superposition apporte un gain d'informations afin d'effectuer la planification implantaire (6). Pour ce faire, un procédé appelé « *registration* » faisant intervenir un algorithme est utilisé et permet la corrélation spatiale de ces 2 types de données.



Figure 17 : Image représentant l'intérêt de fusionner les données CBCT/Cerec en vue de réaliser une planification implantaire prothétique et chirurgicale sur mesure en site de 45.

♦ Remarque : L'intégration de données numériques issues de **différentes sources** est un concept répandu en médecine, notamment en cancérologie (16). Leur corrélation apporte un **gain d'informations** considérable car les différents aspects d'un problème complexe peuvent être appréhendés simultanément et ainsi faciliter la prise de décision. En oncologie, l'imagerie hybride se présente aujourd'hui comme une perspective d'avenir visant à améliorer la précision du diagnostic et impactant la prise en charge du patient cancéreux (38).

5. Planification implantaire

Grâce au logiciel de simulation dédié (logiciel Galileos Galaxis), la planification est réalisée et modulée afin d'optimiser la relation entre la restauration prothétique et le positionnement de l'implant. Les données sont ensuite transmises au centre d'usinage du guide chirurgical et une prothèse provisoire peut éventuellement être réalisée avant la chirurgie.



Figure 18 : Image représentant un guide chirurgical stéréolithographique à appui dentaire élaboré à partir d'une planification implantaire virtuelle en centre d'usinage (SICAT).

La fusion des données issues de l’empreinte optique à celles du CBCT autorise la conception puis la fabrication assistée par ordinateur (CFAO) d’un guide chirurgical fiable et précis (37).

4.3.3.3. Avantages, inconvénients et limites

Les principaux **avantages** se dégageant de ce système faisant intervenir l’empreinte optique sont les suivants :

- 1) Il permet de se passer de la réalisation du wax up ainsi que du guide radiologique correspondant au laboratoire (16) ;

En effet, les systèmes courants font intervenir la réalisation d’un wax up par le prothésiste avant l’acquisition volumique, ce qui ralentit la procédure.

- 2) Il s’agit d’un véritable outil de communication avec le patient ;
- 3) Il permet au praticien de gagner en autonomie puisque la plupart des étapes thérapeutiques sont réalisées au cabinet (6) (ceci impliquant en retour la surcharge de travail qui va avec) ;
- 4) Le temps global de traitement s’en voit réduit (16), (22), (14) ;
- 5) La planification est simplifiée et interactive (6) ;
- 6) Ce système permet de contourner l’empreinte classique avec ses transferts (cf. réflexe nauséux) ainsi que la coulée du modèle comportant les analogues d’implants (22) ;
- 7) Ce système implique également une simplification logistique par rapport à ses concurrents en éliminant la nécessité de transfert d’éléments physiques, mis à part le guide chirurgical. Tout le reste est géré via internet ou programmes de transfert de fichiers (37).

Le couplage du système Cerec au cone beam laisse par ailleurs entrevoir une **nouvelle approche de l'implantologie** en autorisant le praticien à gérer de plus en plus de tâches au fauteuil (14). Le dentiste tend aujourd'hui à se retrouver maître de l'ensemble de la chaîne de soins : de l'acquisition volumique à la réhabilitation prothétique supra-implantaire d'usage en passant par la CFAO du guide chirurgical découlant de la planification virtuelle réalisée sur le logiciel d'IAO (12).

Cependant, on peut également lui reconnaître des **limites** :

- 1) Le projet prothétique n'est pas testé en bouche car virtuel ;
- 2) Ce système est réservé à des édentements limités, pour lesquels l'IAO n'a peut être pas le plus d'intérêt ;
- 3) Il est limité aux guides à appui dentaire (22).

→ Les 3 types de protocoles de traitement présentés ci-dessus aboutissent à la fabrication assistée par ordinateur d'un guide chirurgical usiné autorisant le transfert de la planification implantaire virtuelle au niveau du site chirurgical (36). **Ces systèmes sont qualifiés de « statiques »** (32).

4.3.4. La navigation chirurgicale/robotique passive : présentation du système RoboDent®

Nous ne toucherons ici que quelques mots de la navigation chirurgicale à travers la présentation du système RoboDent® afin de souligner la diversité des appareils et applications associés à l'IAO.

4.3.4.1. Principe de la robotique passive

Le système RoboDent® peut être comparé au GPS des automobiles car il s'agit d'un outil **guidant** le praticien **en temps réel** lors du forage par la visualisation de cibles sur un écran d'ordinateur (12). Il devrait permettre d'obtenir exactement le positionnement tridimensionnel de l'implant déterminé par la planification virtuelle, toujours effectuée à partir de l'imagerie sectionnelle.

L'avantage de ce système dynamique réside en la possibilité de modifier extemporanément la planification afin de répondre à un paramètre clinique imprévu (ce qui n'est pas possible avec les systèmes de robotique semi-active dits statiques) (39).

4.3.4.2. Chronologie des différentes séquences

1. Définition d'un **projet prothétique** et conception de la **gouttière radiologique**

Le guide radiologique est réalisé de manière conventionnelle mais présente ici la particularité de comporter sur sa partie extra buccale une logette destinée à recevoir par clippage l'**arc de navigation**. Ce dernier permet de situer spatialement l'arcade concernée lors de l'acquisition radiologique mais aussi de la navigation chirurgicale. Il est muni en surface de 6 index en titane permettant ultérieurement au logiciel de mettre en rapport le traceur optique buccal et la cavité buccale du patient.



Figure 19 : Photographie représentant une gouttière radiologique réalisée de manière traditionnelle à partir du duplicata du projet prothétique défini et solidarisée à son arc de navigation dans le cadre de la planification d'implants latéraux maxillaires.

Le guide radiologique comporte en occlusal les zones d'indentation de l'arcade antagoniste en occlusion, ce qui permet de vérifier son bon positionnement.

2. Acquisition tridimensionnelle guide radiologique en place

3. Planification implantaire

La première étape consiste à repérer et à marquer les 6 index titane de l'arc de navigation sur les coupes axiales puis de déterminer les obstacles anatomiques et enfin d'effectuer la simulation implantaire à partir de bibliothèques d'implants.

4. Navigation chirurgicale (cf. partie II chapitre 2)

Lors de la chirurgie, le praticien place ses implants en visualisant sur l'écran les informations nécessaires à leur positionnement tridimensionnel (défini lors de la planification). La représentation de la progression des forets sur l'écran permet au praticien de contrôler en permanence la profondeur et l'angulation du forage osseux (12).

La difficulté vient du fait que les yeux doivent être dissociés de la main au cours de la chirurgie.

La comparaison entre la planification implantaire réalisée préalablement à la chirurgie et le positionnement réel des forets et implants durant l'intervention se fait ici en temps réel sur l'écran (32).

La navigation chirurgicale est donc particulièrement intéressante en présence de conditions anatomiques complexes au stade de la planification, au même titre que les systèmes qualifiés de « statiques » (40).

À retenir :

Cette première partie introductive, très largement consacrée à de nombreux rappels et généralités relatifs à la phase de planification en implantologie, nous a permis d'en reposer les bases fondamentales avant de poursuivre ce travail centré sur cette étape primordiale conditionnant le succès thérapeutique de cette discipline exigeante.

Nous en avons profité pour y inclure les spécificités et intérêts portés par le concept d'implantologie assistée par ordinateur à travers la présentation de 4 approches bien différentes au stade de la planification implantaire.

Il convient d'en retenir que si les modalités diffèrent, les objectifs restent quant à eux bel et bien les mêmes qu'il s'agisse d'une planification classique ou assistée par ordinateur. L'IAO apporte simplement des outils précieux visant à améliorer la précision du diagnostic associé ainsi que celle de la planification en découlant (41).

L'objectif est maintenant de s'intéresser au **transfert** de cette planification implantaire virtuelle au niveau du **site chirurgical** dans une 2^{ème} partie dédiée à cet effet, en gardant en mémoire les grands principes chirurgicaux régissant l'implantologie traditionnelle et ne différant pas à travers l'IAO.

PARTIE II : PLANIFICATION CHIRURGICALE ET CHIRURGIE ASSISTÉE PAR ORDINATEUR

1. LES GUIDES CHIRURGICAUX RÉALISÉS PAR CFAO

L'un des principaux intérêts de l'IAO est la chirurgie guidée lors de la pose d'implants. Pour ce faire, il a fallu mettre au point des artifices capables d'effectuer le transfert fiable et précis des données de la planification implantaire virtuelle réalisée sur les logiciels dédiés au niveau du site chirurgical (42). Ce transfert intéressant à la fois le volet prothétique et chirurgical est aujourd'hui possible par l'intermédiaire de **guides chirurgicaux réalisés par CFAO** en centre d'usinage (43).

Plusieurs types de guides existent et sont notamment caractérisés par le procédé mis en jeu lors de leur fabrication ainsi que le type d'appui qu'ils présentent. Indépendamment de cela, leurs objectifs sont les mêmes : ils doivent être capables d'intégrer les différents paramètres déterminés lors de la planification rigoureuse ayant précédé leur élaboration, autorisant ensuite son transfert précis et le moins invasif possible au niveau du site implantaire retenu.

→ À partir de la planification assistée par ordinateur qu'il a réalisée, le praticien peut faire fabriquer un guide chirurgical sur mesure intégrant toutes les données de la simulation implantaire.

1.1. Différents types de guides chirurgicaux

1.1.1. Les « débuts » / l'implantologie « traditionnelle »

Comme nous l'avons largement décrit dans la 1^{ère} partie de l'exposé, l'implantologie moderne est aujourd'hui guidée (au cours de la planification mais aussi de la phase chirurgicale) par les considérations prothétiques, ayant pris le pas sur les exigences anatomiques du site implantaire. Afin de servir de gabarit durant l'intervention, des **guides** dits **chirurgicaux** ont été mis au point.

Le guide chirurgical matérialise le projet prothétique au stade de la chirurgie. Il doit impérativement être **stable** et **positionné correctement** en bouche durant l'intervention afin d'effectuer le transfert correct des données de la planification au niveau du site implantaire. Il s'agit en fait du même principe que celui du guide radiologique, appliqué ici à la phase chirurgicale.

D'abord créés à partir d'un duplicata du projet prothétique, leurs principaux objectifs étaient la mise en place d'implants lors d'une chirurgie « prothético-consciente » ainsi que l'optimisation du résultat esthétique en découlant (13). Ils étaient obtenus en perforant les couronnes du duplicata ou en évidant largement ces dernières en vestibulaire et n'indiquaient donc qu'une « **direction générale** » de forage. Des fûts en titane associés à des cuillères permettaient également de guider un peu plus « précisément » l'opérateur.

Ces types de guides chirurgicaux sont associés à l'implantologie que l'on peut aujourd'hui qualifier de conventionnelle, nous verrons ultérieurement qu'ils sont plus ou moins précis, et souvent insuffisants (cf. partie III).

L'introduction de la CFAO en implantologie a permis la mise au point de guides chirurgicaux sophistiqués et précis, élaborés à partir de données cliniques informatiquement reconstituées (43). Ces guides autorisent aujourd'hui le passage de **tous les forets** ainsi que la **pose** elle-même des implants à travers une chirurgie guidée, gage d'un positionnement implantaire optimisé et précis.

→ Les techniques de CFAO actuelles, associées à l'évolution de l'informatique, ont rendu possible le lien entre le **diagnostic numérique** et la **réalité clinique** (1).

1.1.2. Les guides chirurgicaux stéréolithographiques

La majorité des guides chirurgicaux associés à l'IAO sont fabriqués selon ce procédé exploité par l'industrie depuis la fin des années 1980 (13).

1.1.2.1. Description du procédé de stéréolithographie

Cette technique fait partie des procédés de prototypage rapide les plus évolués, c'est à dire une fabrication couche par couche qui consiste à **rajouter** de la matière (35).

Elle peut également être définie comme un procédé d'impression en 3 dimensions, équivalent à une « photocopieuse 3D » ou à un dispositif de copie d'écran 3D (1).

La méthode repose sur le durcissement localisé d'un liquide organique (monomère) par photo-polymérisation à l'aide d'un faisceau laser ultra-violet dont le déplacement est contrôlé par ordinateur en fonction des coordonnées spatiales de l'objet virtuel que l'on souhaite reproduire. Le passage piloté de ce faisceau à l'intérieur du bain de résine va solidifier celle-ci et former au sein du bain liquide un modèle tridimensionnel solide.

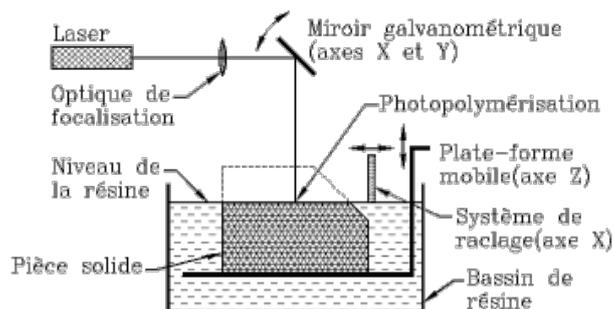


Figure 20 : Schéma illustrant le principe de prototypage rapide.

Ainsi, les données de l'intrados prothétique (prothèse servant de guide d'imagerie, guide radiologique ou projet prothétique virtuel) auxquelles sont ajoutées celles de la planification implantaire réalisée grâce au logiciel sont converties en un **guide chirurgical** qui va permettre le passage d'un projet virtuel à une réalité chirurgicale (5).

La machine de prototypage rapide lit en fait le **diamètre** ainsi que l'**angulation** des implants simulés et polymérise sélectivement la résine autour de ces derniers, formant alors un **cylindre** correspondant à chaque implant. Puis des gaines métalliques en titane sont mises en place à ce niveau. La position précise de chaque implant est donc programmée dans le guide.

L'envoi des données issues de la planification implantaire numérique au centre d'usinage associé aboutit à la fabrication assistée par ordinateur (FAO) du **guide chirurgical** ainsi que du **modèle tridimensionnel** correspondant. À l'issue de ce procédé, le guide chirurgical en résine reçoit dans les trous prévus à cet effet des fûts métalliques de 5 mm de long en titane destinés à guider le forage lors de la chirurgie : ce sont les canons de guidage. Le positionnement en hauteur des implants se fait ensuite par variation de la hauteur de mise en place de ces fûts au sein du guide.

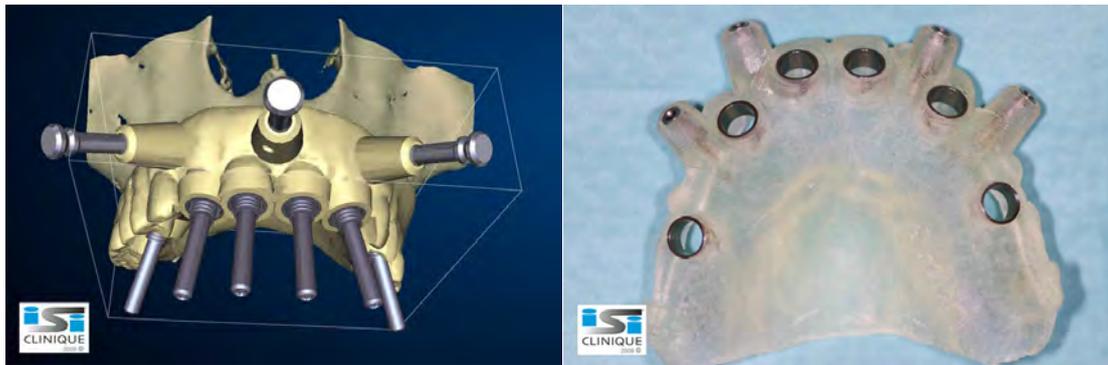


Figure 21 : CAO et FAO d'un guide chirurgical stéréolithographique maxillaire à appui muqueux à partir d'une planification numérique basée sur un projet prothétique.

1.1.2.2. Précision des machines associées au prototypage rapide

La précision de ces machines est de 0,1 mm par 100 mm, ce qui correspond à un taux d'erreur de **0,1 %**. Il s'agit donc d'un procédé très précis aboutissant à la fabrication d'un guide chirurgical que l'on peut espérer fiable (13).

1.1.2.3. Différents types d'appui

Les guides chirurgicaux réalisés par CFAO peuvent présenter 3 types d'appui : dentaire, osseux ou muqueux. De nombreuses études se proposent de comparer la précision de la chirurgie assistée par ordinateur en fonction du type d'appui du guide chirurgical utilisé lors de l'intervention.

1. Guide chirurgical à appui dentaire

Il serait le plus stable et le plus précis, notamment en présence d'un édentement encastré lui conférant une position unique d'autant plus stable et reproductible. Des déviations plus importantes ont été mesurées dans le cas d'un édentement terminal (liées à un enfoncement du guide en distal).

→ Le protocole de traitement couplant le système Cerec au cone beam fait intervenir ce type de guide.

2. Guide chirurgical à appui muqueux

Ce type de guide peut être envisagé chez l'édenté total et repose sur une muqueuse (surface dépressible) qui peut atteindre 3 à 4 mm d'épaisseur. Afin de le stabiliser, des **clavettes transosseuses** ou encore des **vis de stabilisation** (dont le positionnement est défini lors de la planification virtuelle) doivent être utilisées.

Le positionnement du guide à appui muqueux doit par ailleurs se faire à l'aide d'une clé occlusale rigide avant sa stabilisation afin que ce dernier se trouve dans une position correcte durant la chirurgie. En effet, cela évite les contraintes asymétriques susceptibles de le faire basculer dans une direction donnée et le positionnement implantaire non souhaité qui en découlerait.

L'utilisation d'un guide à appui muqueux évite l'élévation d'un lambeau. Il prémunit donc le patient de la morbidité associée à ce geste et améliore fortement les suites opératoires. Il est particulièrement indiqué chez le sujet âgé ou présentant tout type de fragilité tissulaire si les conditions le permettent (1).

→ Le concept NobelGuide fait intervenir un guide à appui muqueux pour une chirurgie sans lambeau, moins invasive (44).

3. Guide chirurgical à appui osseux

Même si l'appui osseux est non déformable, il est également préférable de bloquer ce type de guide impliquant la levée d'un lambeau avec des vis.

S'assurer de la **stabilité** et de la **mise en place précise** de ces **guides** constitue un paramètre fondamental, que ce soit en amont avec le guide radiologique, avant la chirurgie pour les guides à appui muqueux, dentaire ou encore en peropératoire lors de l'intervention elle-même pour le guide à appui osseux. Lorsque la chirurgie se déroule avec un guide à appui muqueux ou osseux, l'usage de clavettes ou de vis ne constitue pas la panacée devant les déviations potentielles. Par ailleurs, si cette transfixation fige le guide dans une **même stabilité** durant toute la chirurgie, elle n'autorise pas la vérification au cours de l'intervention des positions souhaitées de forage.

1.1.3. Guides chirurgicaux usinés par soustraction

La FAO du guide chirurgical à partir de la planification virtuelle peut également être réalisée **par soustraction** à l'aide de machines outils (fraiseuses 5 axes) à partir d'un bloc de matière par usinage soustractif (45). La limite de ce procédé vient de la taille des blocs disponibles à l'heure actuelle, ne permettant de concevoir ce type de guide que pour des édentements de faible étendue.

→ Ce concept innovant ouvre néanmoins la voie à la fabrication d'un guide chirurgical à partir de la simulation informatique réalisée au sein même du **cabinet** et pourrait bien représenter l'avenir de la CFAO en implantologie (cf. *Cerec Guide*).

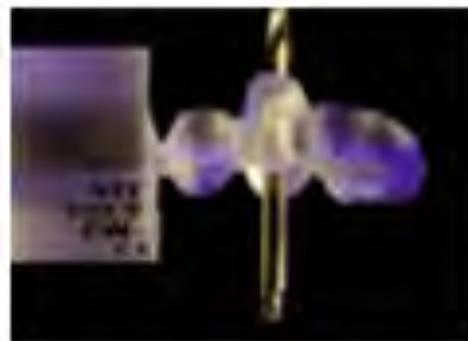


Figure 22 : Image représentant un guide chirurgical stéréolithographique à appui dentaire élaboré par usinage soustractif en cabinet à partir d'un bloc de matière en plexiglas : études cliniques en cours et perspectives faisant intervenir le système Cerec.

1.1.4. Transformation du guide radiologique en guide chirurgical (système *CoDiagnostiX*)

Le guide radiologique utilisé lors de la simulation sur logiciel d'IAO peut également être **transformé en guide chirurgical**. Un outil de laboratoire spécifique vient ici transférer les coordonnées spatiales définies lors de la planification implantaire virtuelle au niveau du guide radiologique en le perforant à l'emplacement implantaire correspondant simulé virtuellement sur le logiciel informatique (46).

Ce guide plus anecdotique est également muni de canons de guidage (47).



Figure 23 : Photographie illustrant la transformation du guide radiologique en guide chirurgical après transfert des coordonnées spatiales de chacun des implants simulés sur logiciel d'IAO.

1.2. Caractéristiques de ces guides chirurgicaux

1.2.1. Leur rôle au sein de la chaîne thérapeutique en IAO

Pour que la chirurgie guidée mérite son appellation, il faut que cette dernière se déroule précisément et conformément à la planification réalisée au préalable. Lors du forage mais aussi de la mise en place de l'implant, le praticien ne doit pouvoir en aucune manière dévier du projet défini sauf s'il en exprime la volonté.

Ceci implique alors la présence d'un **guidage** dirigé et contraignant concernant à la fois l'étape de forage, dans les directions vestibulo/linguale, mésio/distale et corono/apicale ainsi que l'étape de pose de l'implant elle-même (13).

*Projet prothétique → Guide d'imagerie → Acquisition tridimensionnelle → Simulation et envoi des données → Fabrication du **guide chirurgical** → Chirurgie guidée/mise en place des implants → Réhabilitation prothétique.*

Cet objectif a été atteint grâce aux guides chirurgicaux réalisés par CFAO. Résultats d'une succession d'étapes progressives, ils permettent aujourd'hui le transfert précis et fiable de la planification virtuelle sur le site chirurgical.

Le guide chirurgical établit un lien précieux entre planification virtuelle et chirurgie implantaire (*ou bien simulation et réalité clinique*), toujours en accord avec le projet prothétique de départ. La **précision** de ce transfert des données au niveau du site chirurgical est garante d'une sécurité opératoire accrue durant l'intervention et laisse notamment entrevoir la possibilité de repousser les limites de la thérapeutique dans les cas complexes ainsi que la réalisation de chirurgies moins invasives. Ce type de guide chirurgical, en faisant intervenir une véritable notion de **guidage**, permet donc d'appréhender une **nouvelle approche** de l'implantologie.

1.2.2. Quel guidage ?

1.2.2.1. Les débuts des guides chirurgicaux utilisés en IAO

Les premiers guides chirurgicaux furent confrontés à la difficulté de faire passer des forets de diamètres successifs à travers le même orifice tout en gardant strictement la même position du guide. La solution consistait au départ à utiliser un gabarit différent pour le passage de chaque foret. Lors du changement de gabarit, la mise en place du suivant dans la même position n'était pas garantie, elle était alors une source d'imprécision et donc de **dévi**ation par rapport à la planification numérique. Il fut ensuite admis que la précision exigeait de ne plus modifier la position initiale du guide chirurgical après sa mise en place. De plus, à ce moment là, il n'était pas encore possible de déterminer à l'avance la profondeur exacte de forage et de s'y conformer, d'où des déviations.

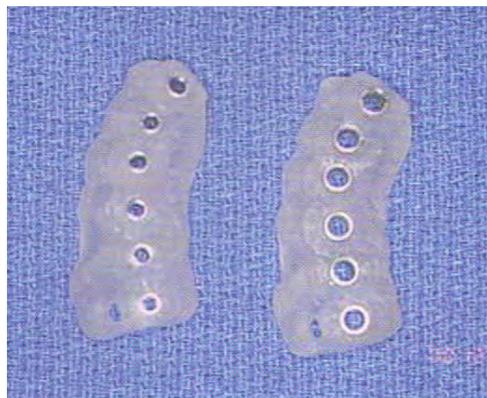


Figure 24 : Photographie représentant les premiers guides chirurgicaux utilisés en IAO. Afin de poser des implants de 3,75 mm de diamètre, deux guides avec deux orifices de diamètres différents étaient nécessaires.

Aujourd'hui, les guides chirurgicaux élaborés par CFAO sont munis de **canons de guidage** et font intervenir une **trousse chirurgicale spécifique** comprenant de nombreux instruments que nous ne détaillerons pas ici dans un souci de simplification.

Nous retiendrons seulement qu'à la réception du guide chirurgical, une feuille de route est fournie et contient toutes les informations relatives aux implants ainsi qu'à la séquence des instruments à adopter afin d'effectuer leur pose, conformément à la planification virtuelle réalisée au préalable. Nous présenterons uniquement 2 outils ayant un rôle majeur dans la fonction de guidage : les cuillères et les porte-implants.

1.2.2.2. Les cuillères

Ces outils permettent d'utiliser le **même guide** chirurgical pour passer successivement l'ensemble des forets de la séquence chirurgicale sans changer la position initiale du guide. Elles présentent à leurs 2 extrémités des œillets venant recevoir des forets de diamètres croissants. Le diamètre externe de leur extrémité est constant, seul le diamètre interne varie afin de s'adapter aux divers diamètres des forets. La profondeur de pénétration de la cuillère dans le canon de guidage est de **5 mm** et correspond également à la hauteur de ce dernier.

Le jeu entre le canon de guidage et les cuillères qui y sont introduites est extrêmement faible et inférieur au dixième de millimètre (13). Cette hauteur de 5 mm combinée avec une tolérance de jeu étroite entre le diamètre interne de l'extrémité de la cuillère et le diamètre du foret est une garantie de **précision**. Dans le sens vertical, la présence d'une butée sur les forets heurtant l'œillet de la cuillère garantit la précision et la sécurité de la profondeur de forage.



Figure 25 : Image illustrant le détail des diamètres des forets accueillis par chaque cuillère avec leurs œillets respectifs pour le système de chirurgie guidée AtlaSurgery® de chez Biotech®, compatible avec le logiciel SimPlant®.



Figure 26 : Image illustrant la précision lors du forage dans le sens vertical : la butée du foret arrive sur le plat de l'œillet de la cuillère et empêche le forage au-delà de ce qui a été prévu lors de la simulation informatique.

1.2.2.3. Rôle des porte-implants

L'étape de mise en place de l'implant au niveau du forage constitue une phase importante lors de la chirurgie. En effet, l'implant peut encore à ce stade être inséré selon un axe erroné. C'est pourquoi des outils contraignants interviennent également lors de cette étape en offrant cette fois-ci une faible tolérance entre le diamètre interne du canon et le diamètre externe du porte-implant. Ils intègrent la variable diamètre et disposent également d'une butée venant au contact avec le canon du guide chirurgical.

Des études soulignent l'importance du **guidage** de l'implant lors de sa mise en place au niveau du lit implantaire : un positionnement implantaire totalement guidé induirait en effet des déviations inférieures (48).

Les porte-implants remplissent alors 3 fonctions majeures : (13)

- 1) garantir que l'axe d'insertion de l'implant est identique à celui du forage ;
- 2) régler précisément la profondeur d'enfoncement de l'implant dans le sens vertical ;
- 3) rapporter précisément au laboratoire la position implantaire à venir dans la perspective de réaliser une prothèse avant la phase chirurgicale.

♦ Remarque : On comprend qu'une ouverture buccale importante est nécessaire à la mise en place d'implants en IAO, notamment pour accéder aux **secteurs postérieurs** (contre-angle, porte-implant, implant, guide chirurgical). Ce paramètre constitue d'ailleurs un facteur limitatif étant donné qu'il faut plus de 45 mm d'ouverture buccale pour pouvoir traiter toutes les situations par chirurgie guidée (1).

1.3. Quelle précision attendre de ces guides ?

Les guides chirurgicaux élaborés par CFAO ont été développés dans l'esprit de contrer les défauts des guides classiques. Ils constituent en fait le maillon qui faisait tant défaut à l'ensemble de la chaîne du traitement implantaire et nous verrons qu'ils revêtent un réel intérêt dans le traitement de cas complexes. Il convient cependant de garder en mémoire que malgré tout le soin apporté lors de la simulation implantaire et l'utilisation de canons de forage, la fiabilité du positionnement implantaire reste encore toute relative (1).

En effet, même si la chirurgie assistée par ces guides réalisés à partir d'une planification tridimensionnelle rigoureuse permet de pallier le manque de précision obtenu avec les guides conventionnels, ils ne constituent pas la panacée devant les déviations possibles et inhérentes à la main humaine. Par ailleurs, leur utilisation doit toujours s'entourer d'un maximum de précautions (apprendre à connaître et à se familiariser avec le système, progression et courbe d'apprentissage en IAO, respect des distances de sécurité classiques vis à vis des structures anatomiques à risque, etc.).

De nombreuses études s'intéressent à la précision du transfert des données de la planification virtuelle au niveau du site implantaire par l'intermédiaire de ces guides. Le problème des données recueillies vient du fait qu'il est difficile de comparer ces dernières de par leurs disparités, ce qui rend délicat une évaluation dans l'absolu (types d'études documentées *in vitro* pour la majorité, appareils d'acquisition volumique diversifiés, différents logiciels mis en jeu, différents types de guides impliqués, plusieurs méthodes d'évaluation utilisées afin d'évaluer la précision du transfert). De plus, les mesures obtenues à l'issue de chacune de ces études sont variables.

Cependant, le regroupement de l'ensemble de ces données offre des valeurs de **déviations moyennes** qui concordent convenablement entre elles et qui nous donnent un ordre d'idée de la précision que l'on peut attribuer à la chirurgie assistée par ordinateur aujourd'hui (13).

1.3.1. Les paramètres mesurés

Les déviations entre la **position réelle** de l'implant et celle **planifiée virtuellement** sur logiciel se déterminent dans les études à travers la mesure des 4 paramètres suivants :

- 1) La déviation au point d'impact du forage, c'est à dire au col de l'implant (en millimètres) ;
- 2) La déviation à l'apex, où elle est plus grande (en millimètres) ;
- 3) La déviation suivant l'axe corono-apical (en millimètres), c'est à dire dans le sens vertical ;
- 4) L'angulation de l'implant dans un plan déterminé, vestibulo/lingual ou mésio/distal (en degrés).

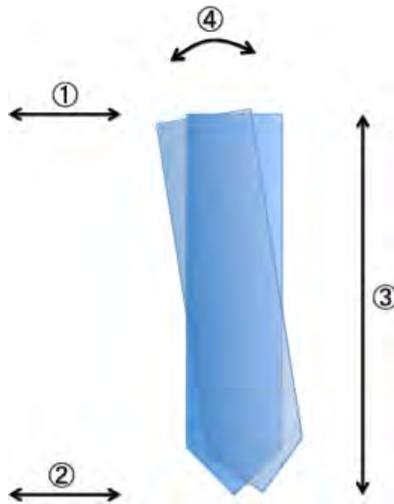


Figure 27 : Schéma illustrant la direction des déviations mesurées dans les études évaluant la précision de l'IAO : (1) : déviation linéaire à l'entrée (2) déviation linéaire à l'apex (3) déviation verticale (4) déviation angulaire.

♦ Remarque : La plupart du temps, ces déviations sont calculées dans les études en superposant l'acquisition radiologique ayant servi de support à la planification virtuelle à un nouveau cliché réalisé dans les mêmes conditions d'exposition après la pose des implants. Une méthode alternative permettant de faire correspondre simulation informatique et positionnement réel des implants après la chirurgie a été développée par Nickenig et Eitner pour éviter d'irradier les patients une nouvelle fois après l'intervention (46).

→ L'acquisition tridimensionnelle post-opératoire est ici réalisée sur le **modèle** en plâtre du patient comportant les analogues d'implants, guide chirurgical en place. Ce dernier comporte en effet des marqueurs permettant de superposer les 2 clichés, pré et post-opératoires.

1.3.2. Les résultats des études

1.3.2.1. Quelques notions importantes

- ❖ Les déviations les plus faibles ont été mesurées sur les modèles et cadavres.

- En **clinique**, les écarts sont légèrement **plus importants**. En effet, les sources d'erreurs les plus communes ont lieu lors de l'acquisition radiologique (cf. immobilité du patient, stabilité et positionnement correct du guide d'imagerie) et de la chirurgie proprement dite.

- ❖ De plus, il ressort des études que pour tous les guides (quel que soit le type d'appui) la déviation apicale est toujours plus importante qu'au niveau du col de l'implant.

- ❖ Concernant la déviation angulaire, la précision du guide à **appui dentaire** serait supérieure à celle des guides à appui muqueux ou osseux (Ozan et coll. 2007) (48).

- ❖ La mesure de déviation verticale n'a pas encore été étudiée en clinique mais sur des cadavres uniquement et a été de 0,60 mm (Ruppin et coll. 2008).

- ❖ Des études récentes *in vitro* et *in vivo* n'indiquent **pas de différences significatives** entre les différents systèmes de chirurgie assistée par ordinateur (46), (49). Il n'existe pas non plus de différences significatives entre les études concernant le procédé mis en jeu lors de la fabrication du guide, son type de **support** et de stabilisation (50).

- Les guides à appui muqueux présenteraient cependant des déviations linéaires (crestales et apicales) supérieures aux autres types de guides (non significatif) (42).

- ❖ Par ailleurs, les études montrent également une grande **dispersion des mesures** relevées, attirant alors toute notre attention et signifiant qu'il n'est pas encore possible de faire une « *confiance aveugle* » en l'implantologie assistée par ordinateur.

| Guide à appui | Déviatiion de position du col implantaire | Déviatiion de position de l'apex implantaire | Déviatiion angulaire |
|---------------|---|--|----------------------|
| Dentaire | 0,84 mm (3 études) | 1,20 mm (3 études) | 2,82 ° (3 études) |
| Muqueux | 1,06 mm (1 étude) | 1,60 mm (1 étude) | 4,51 ° (1 étude) |
| Osseux | 1,35 mm (4 études) | 2,06 mm (4 études) | 6,36 ° (5 études) |

Figure 28 : Tableau synthétisant les mesures des déviations entre la réalité clinique et la simulation informatique en fonction du type de guide chirurgical utilisé.

1.3.2.2. Mesures des déviations : les valeurs (50), (47), (51), (49)

La synthèse des études et méta-analyses récentes relatives à la chirurgie guidée fait état des mesures de déviations moyennes suivantes :

- Déviatiion linéaire d'environ 1 mm au niveau du col implantaire ;
- Déviatiion linéaire de l'ordre de 1,6 mm à l'apex ;
- Déviatiion verticale de 0,6 mm (une seule étude *in vitro* renseigne ce paramètre) ;
- Déviatiion angulaire de 5 à 6 °.

♦ Remarque : **Di Giacomo et coll.** (52) ont réalisé une étude *in vivo* (incluant 4 patients, 6 guides chirurgicaux et 21 implants posés) au cours de laquelle ils ont comparé planification virtuelle et positionnement réel des implants après chirurgie guidée faisant appel à un guide chirurgical stéréolithographique.

Il a rapporté les mesures de déviations moyennes suivantes :

- 1) déviatiion angulaire : 7,25 °
- 2) déviatiion linéaire au niveau du col : 1,45 mm
- 3) déviatiion linéaire apicale : 2,99 mm

→ Ces écarts, principalement expliqués par le manque de stabilité des guides chirurgicaux utilisés, soulignent la nécessité d'améliorer ces systèmes.

Ces déviations peuvent également apparaître plus importantes que celles espérées au terme d'une chirurgie assistée par ordinateur. La pertinence de cette technologie sophistiquée peut alors être remise en cause car, souvent, la différence entre ce que l'on pourrait qualifier de « *bon ou mauvais* » positionnement implantaire s'inscrit dans cette fenêtre de 1 à 1,5 mm. Cependant, il convient de se souvenir que l'objectif de la chirurgie guidée reste avant tout l'**amélioration** de la **précision** du geste chirurgical (8). Il faut donc veiller à la comparer avec celle obtenue à l'aide d'un guide chirurgical conventionnel. Comme nous le verrons dans la partie III, les valeurs de déviations moyennes mesurées à l'aide de la chirurgie assistée restent bien **inférieures** à celle obtenues à l'issue d'une chirurgie dite conventionnelle (1).

Implications cliniques : Ces mesures soulignent qu'il est indispensable de prévoir une marge d'imprécision de 2 mm avec la chirurgie guidée (48).

1.3.2.3. Limites de ces études et perspectives

1. La disparité des études implique une difficulté de comparaison.
2. Les valeurs « extrêmes » recueillies

En plus d'être difficilement comparables, les études évaluant la précision de la chirurgie guidée souffrent de la mise en évidence de valeurs atypiques, révélatrices d'une grande dispersion potentielle des mesures effectuées (35). Elles indiquent également que le praticien doit être capable de vérifier à chaque étape le déroulement optimal du cheminement thérapeutique conformément au projet initial. En effet, la mesure des déviations après l'intervention représente en fait le cumul des erreurs occasionnées à l'issue de chaque étape thérapeutique (de l'imagerie pré-implantaire à l'acte chirurgical lui-même) (48).

3. Nécessité d'études complémentaires

Peu d'études renseignent aujourd'hui la précision associée à l'IAO et l'ensemble des publications souligne la nécessité de réaliser des études complémentaires relatives à cette nouvelle technologie prometteuse. Les études mettent également l'accent sur la nécessité d'améliorer la précision des systèmes associés, en précisant que cela semble difficile à concevoir en dessous de 0,5 mm (48).

Les études à venir viseraient alors à inclure davantage de patients sur des périodes d'observations plus longues afin d'évaluer l'impact réel de ce type de guides sur la thérapeutique implantaire (53). Elles se proposent également d'identifier les sources d'erreurs en mettant en évidence les facteurs générateurs d'imprécision au cours de chaque étape. Il apparaît par ailleurs primordial de clarifier les indications et bénéfices de l'IAO afin de trouver les bons candidats à ce type de thérapeutique. Des informations sur le volume osseux requis pour la chirurgie guidée ainsi que son impact sur la précision de ce type d'intervention manquent également dans la littérature (48).

1.3.2.4. Facteurs connus influençant la précision de ces guides

- 1) La stabilité du guide selon une unique position durant l'acquisition volumique ainsi que la chirurgie implantaire (50), (52), (44) ;
- 2) Le nombre de guides chirurgicaux utilisé influence les déviations apicales et angulaires en faveur de l'utilisation d'un seul guide (48) (avec une différence statistiquement significative) ;
- 3) Il y a moins de déviations si le guide est fixé (48) ;
- 4) Les déviations mesurées sont inférieures si l'implant est guidé durant sa mise en place (guidage complet) (48) ;
- 5) Pour les guides chirurgicaux stéréolithographiques à appui muqueux et au niveau de la mandibule édentée, densité osseuse et épaisseur de la muqueuse peuvent affecter la précision de ce type de guide destiné à une chirurgie sans lambeau (54). La densité osseuse induit des déviations de profondeur (densité osseuse - → forage +) alors que l'épaisseur muqueuse affecte la déviation globale à l'apex (épaisseur muqueuse + → déviation apicale +).

Si la précision et la fiabilité des guides chirurgicaux réalisés par CFAO surpassent celles des guides conventionnels, il convient toutefois de faire preuve de rigueur en vérifiant l'ensemble des étapes thérapeutiques menant à une chirurgie guidée afin de bénéficier du maximum des performances offertes par ces systèmes d'aide au diagnostic et à la chirurgie.

2. CAS PARTICULIER DE LA NAVIGATION CHIRURGICALE (RoboDent®)

Comme nous l'avons largement développé dans le chapitre précédent, la chirurgie assistée par ordinateur peut faire intervenir des systèmes qualifiés de **statiques** et représentés par les guides chirurgicaux réalisés par CFAO. On parle également de robotique semi-active (39).

À côté de ces derniers, des systèmes **dynamiques** ont été mis au point plus récemment et visent également à transférer les données de la planification virtuelle au niveau du site implantaire sans passer par l'utilisation d'un guide chirurgical usiné à partir de celle-ci : il s'agit du concept de la navigation chirurgicale encore appelée robotique passive.

2.1. Grands principes : rappels

Les guides chirurgicaux réalisés par CFAO permettent aujourd'hui d'apporter au praticien une aide chirurgicale indéniable. Ces progrès, aussi appréciables soient-ils pour la phase chirurgicale, nécessitent une procédure rigoureuse **en amont** ainsi qu'un temps de laboratoire incompressible afin de transférer au niveau du site opératoire les données de la simulation.

À partir de techniques déjà utilisées en neurochirurgie, en chirurgie maxillo-faciale ainsi qu'en ORL, sont apparus plus récemment des outils permettant de guider directement la main du praticien au cours de la mise en place des implants. Il est alors possible d'interfacer en temps réel l'imagerie tridimensionnelle et l'instrumentation rotative de mise en forme du lit implantaire. Le praticien peut suivre en direct la progression des forets qu'il utilise par rapport aux éléments anatomiques avoisinants. Leur représentation sur l'écran d'ordinateur lui permet de contrôler en permanence la **profondeur** ainsi que l'**angulation** du forage (12).

→ On comprend que les techniques chirurgicales peu invasives sont également encouragées par ces systèmes dynamiques.

2.1.1. Triangulation des informations et traceurs optiques

Les systèmes les plus aboutis utilisent tous le principe de **traceurs optiques**. Des repères optiques sont solidarités à l'arcade dentaire du patient. Leurs mouvements sont alors suivis à l'aide d'une caméra selon le principe de triangulation. Ce repérage dans l'espace comparable au GPS est simultanément appliqué au contre-angle, permettant ainsi de suivre en temps réel la position de l'un par rapport à l'autre mais aussi celle du foret au sein des structures anatomiques.



Figure 29 : Image illustrant le principe de la robotique passive RoboDent® : triangulation des informations. Contre-angle chirurgical et gouttière munis de leurs traceurs optiques. Écran de contrôle relié à une caméra permettant de guider le praticien en temps réel durant le forage.

2.1.2. Phase préparatoire et planification chirurgicale

Comme nous l'avons souligné dans la 1^{ère} partie de l'exposé, l'analyse prothétique se déroule de manière conventionnelle. On rappelle que la gouttière radiologique issue de la cire diagnostique servira ultérieurement de support au dispositif de repérage utilisé lors de la navigation chirurgicale. La planification implantaire prothétique et chirurgicale est ensuite réalisée à l'aide du logiciel d'IAO dédié comme nous l'avons précédemment décrite.

2.1.3. Chirurgie guidée

L'intervention se déroule ensuite de manière classique mais le champ opératoire et l'instrumentation rotative doivent être adaptés.

Pour permettre le suivi des mouvements respectifs de l'arcade dentaire du patient et du foret, l'une et l'autre sont équipés de **traceurs** dont la position dans l'espace est repérée par une **caméra**. Celle-ci est reliée à l'ordinateur qui calcule et retranscrit en temps réel sur l'écran la position du foret au sein des structures anatomiques.

Ce dispositif fournit au praticien un repérage de type viseur ainsi qu'une alerte sonore lui permettant en permanence de contrôler axe et profondeur du foret. La détermination de la position de la main du praticien et donc du contre-angle par rapport au site implantaire se fait par détection à l'infrarouge pulsé à raison de 20 cycles par seconde (39).



Figures 30 et 31 : Photographies représentant le système de traceurs optiques lors de la chirurgie guidée RoboDent®.

Chaque foret doit être identifié et présenté dans une petite dépression au niveau de l'arc de navigation avant d'être utilisé par l'opérateur. Le dernier élément identifié sera l'implant.

Après fixation de la gouttière et identification de l'instrument rotatif sur l'arc de navigation, la première phase du protocole consiste à marquer les sites implantaire. Le passage des différents forets s'appuie ensuite sur le respect des 3 paramètres suivants :

- 1) le **centrage** et le **point d'émergence** implantaire déjà définis par le point **bleu** ;
- 2) l'**angulation** définie par le point **vert**, qui doit se superposer au point bleu afin de respecter l'angulation implantaire définie lors de la planification ;
- 3) la **pénétration verticale** est schématisée par une jauge verticale.

La zone verticale colorée en **vert** correspond à la longueur de l'implant alors que la zone **rouge** définie correspond quant à elle à la limite verticale à ne pas dépasser.

Lorsque le point d'émergence et l'axe de forage sont respectés, la cible devient **verte** et signale au praticien son bon positionnement et la possibilité de commencer le forage. La jauge de positionnement vertical émet quant à elle un signal sonore lorsque la profondeur de forage planifiée est atteinte.

→ Une alerte sonore permet de vérifier en permanence l'axe ainsi que la profondeur de pénétration du foret.

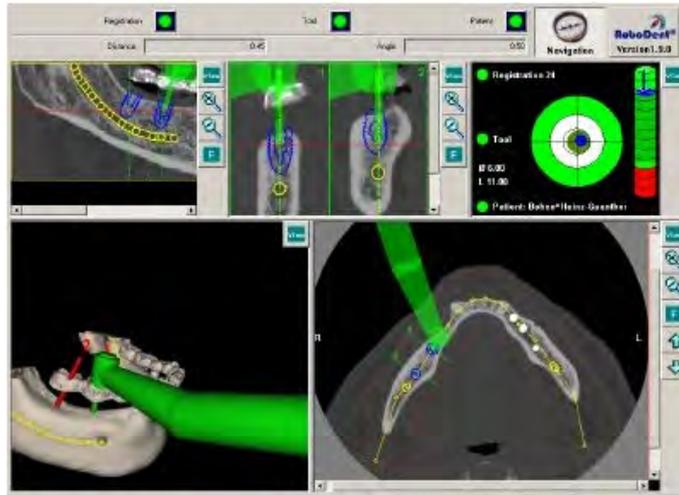


Figure 32 : Capture d'écran de la navigation chirurgicale.

En haut à droite : écran de contrôle du point d'entrée et de l'angulation du foret.

Le passage de l'ensemble de la séquence de forage obéit ensuite au même protocole jusqu'à la mise en place de l'implant. La progression de l'implant lors du vissage peut également être visualisée sur l'écran de contrôle.

L'utilisation de ce système implique que l'opérateur doit apprendre à se familiariser avec l'encombrement des différents guides qui sont fixés sur le patient et le contre-angle. Il doit également adopter des positions de travail qui ne viennent pas interférer avec le suivi optique des traceurs.

2.2. Quelle précision attendre de la robotique passive ?

La chirurgie assistée par ordinateur en temps réel autorise une sécurité opératoire accrue en implantologie de par la précision offerte par ce système développé dans le but de pallier les inconvénients de la technologie de prototypage rapide (8). Cependant, selon des études récentes *in vitro*, la robotique passive offrirait des valeurs de précision proches de celles obtenues avec un guide chirurgical élaboré par CFAO.

Il n'y aurait donc pas de différence statistiquement significative de précision entre ces 2 systèmes autorisant le transfert des données de la planification virtuelle au niveau du site chirurgical implantaire (46), (47), (49).

D'autres études reconnaissent à la navigation chirurgicale une précision significativement supérieure par rapport aux systèmes dits statiques (48), (39). Cependant, les différences de précision mesurées pourraient s'expliquer par le fait qu'il ne s'agisse pas du même type d'études (*précliniques* pour les systèmes dynamiques vs *cliniques* pour les systèmes statiques).

Ceci souligne encore une fois la nécessité de réaliser des **études complémentaires** et « **comparables** » venant éclaircir la précision que l'on peut attribuer à l'IAO ainsi qu'à ces différents systèmes.

2.3. Intérêts de la navigation

2.3.1. Avantages par rapport aux systèmes statiques

- 1) Le guide radiologique et chirurgical est élaboré de façon traditionnelle : il peut de ce fait être fabriqué par tout laboratoire de prothèse ;
- 2) Il n'y a pas de gouttière chirurgicale recouvrant le site implantaire : elle n'est donc pas à l'origine d'une interférence de la tête du contre-angle avec l'arcade antagoniste dans le cas d'une ouverture buccale limitée. Cet accès au site implantaire permet donc une bonne irrigation peropératoire ainsi que le refroidissement du tissu osseux lors du forage ;
- 3) Le praticien garde à tout moment la totale maîtrise de son geste chirurgical et peut modifier en cours d'intervention sa planification pour faire face à un paramètre clinique imprévu ;
- 4) Il n'existe pas de risque de mauvais positionnement de la gouttière car l'arc de navigation muni de ses index, associé au traceur buccal, donne en permanence au logiciel la situation spatiale de cette dernière. Il n'y a donc pas ici l'inconvénient du risque d'inadaptation du guide chirurgical à l'origine des déviations que l'on peut rencontrer avec les systèmes dits statiques (15).

2.3.2. Chirurgies sans lambeaux moins invasives

La grande précision du positionnement implantaire permet d'augmenter la fréquence de ces techniques chirurgicales avec plus de sécurité. La navigation chirurgicale diminuerait également les atteintes iatrogènes au cours de la chirurgie (40).

2.3.3. Réalisation prothétique pré-implantaire

Ce système de navigation chirurgicale capable de répondre à toutes sortes de situations cliniques semble toutefois particulièrement intéressant dans le traitement de deux types d'édentements : l'édentement unitaire antérieur et l'édentement total dans le cadre de réhabilitations prothétiques fixées implanto-portées. Ces deux situations sont en effet susceptibles de bénéficier d'une **mise en situation prothétique ou mise en charge immédiate** (39). La précision du positionnement implantaire autorise la réalisation d'une prothèse provisoire avant même que la chirurgie n'ait eu lieu.

Ces deux derniers points constituent des **intérêts communs** à la chirurgie assistée par ordinateur en général, qu'elle soit associée à des systèmes statiques ou dynamiques. Ils seront plus largement abordés dans le chapitre suivant.

3. FUSION DES DONNÉES ET CONSÉQUENCES SUR L'APPROCHE CHIRURGICALE EN IAO

Le couplage des informations recueillies à travers l'**imagerie sectionnelle** pré-implantaire à des **logiciels de planification** performants aboutit à la possibilité de réaliser une **chirurgie assistée** par ordinateur. Celle-ci est garante d'un positionnement implantaire tridimensionnel amélioré qui se rapproche alors plus précisément du projet planifié (*qu'il soit physique ou virtuel*) que lors d'une chirurgie conventionnelle dite « à main levée ».

Les guides chirurgicaux réalisés par CFAO ainsi que les systèmes associés à la navigation chirurgicale permettent aujourd'hui d'effectuer le transfert précis et fiable de cette planification numérique au niveau du site implantaire. Ils laissent entrevoir de par cette précision tant recherchée des possibilités d'approches chirurgicales **moins invasives** (53) voire plus « osées ».

Ce transfert précis permet également d'appréhender les **cas complexes** avec plus de sérénité ainsi que de confectionner une **réhabilitation prothétique** avant même que la chirurgie implantaire n'ait eu lieu.

3.1. Chirurgies sans lambeaux

Il est aujourd'hui largement admis que cette technique chirurgicale dite « *en aveugle* » offre des avantages non négligeables par rapport à une chirurgie conventionnelle en minimisant voire réduisant à néant les inconvénients inhérents à la levée d'un lambeau (55). Cependant, elle nécessite une attention toute particulière et ne peut être envisagée qu'en présence de conditions anatomiques bien définies. En effet, l'angulation implantaire ne doit pas provoquer de perforation des corticales alvéolaires, qui résulterait en une déhiscence ou une fenestration fragilisant la corticale osseuse (56). On comprend donc l'importance d'une planification implantaire rigoureuse afin de répondre à ce type de technique chirurgicale en toute sécurité et avec la plus grande précision.

3.1.1. Conditions à la pose d'implants par la technique sans lambeau (rappels)

Cette approche chirurgicale fait intervenir un cahier des charges rigoureux comprenant des critères d'exclusion et d'inclusion stricts. La chirurgie transmuqueuse est en effet très exigeante en terme d'**indications** :

- 1) La largeur osseuse doit être suffisante dans les plans frontal et sagittal : elle doit être d'au moins 7 mm ;
- 2) La gencive doit être présente en quantité suffisante, avec au moins 5 mm de tissu kératinisé péri-implantaire (57) ;
- 3) Il ne doit pas y avoir de concavités osseuses dans un plan sagittal ;
- 4) Ce type d'intervention nécessite une étude radiographique préopératoire complète faisant intervenir l'**imagerie 3D** (57) ;
- 5) L'utilisation d'un guide chirurgical est préférable et **fiabilise** ce type d'intervention (33), (57).

♦ Remarque : En cas de résorption extrême, il est selon nous plus prudent de lever un lambeau (48).

3.1.2. Avantages et intérêts d'une chirurgie implantaire sans lambeau

Mettre en place un implant sans incision ni décollement des tissus mous est une technique attractive dont les intérêts sont directement liés à la différence de cicatrisation et de suites opératoires observées par rapport à une technique traditionnelle (1).

Une intervention sans lambeau présente de multiples **avantages** (31) :

- 1) La cicatrisation est accélérée : l'os cortical est majoritairement vascularisé par le périoste. Préserver ce dernier permet une cicatrisation osseuse plus rapide et diminue par là même la résorption osseuse pouvant s'y produire ;
- 2) Le risque infectieux est diminué : les risques d'absence de coaptation au niveau des berges du lambeau ainsi que de contamination au niveau du site opératoire disparaissent ;
- 3) Le risque hémorragique est également réduit : ce paramètre est essentiel lorsqu'il s'agit de traiter une population où la fréquence de prise de médicaments anti-thrombotiques est élevée puisque le consensus actuel est à la poursuite de ce type de traitement durant la chirurgie implantaire ;
- 4) Ce type de technique allant dans le sens de l'esthétique impliquerait par ailleurs un meilleur engagement du patient dans le traitement (33) ;
- 5) La chirurgie implantaire se fait ici en 1 temps avec la possibilité de réaliser une mise en charge immédiate (57).

3.1.3. Limites

Malgré ses avantages et son apparente sensation de « facilité » à même de séduire un praticien peu expérimenté, la chirurgie sans lambeau amène également un certain nombre de **contraintes** qu'il convient de considérer :

- 1) Tout d'abord le tissu osseux sous-jacent ne peut être visualisé. Il s'ensuit une forte perte de repères amenant un risque élevé de perforation de l'os cortical par l'apex implantaire dans les cas où l'axe de la crête a été mal appréhendé ou bien en présence d'une forte concavité vestibulaire ;

- 2) Tout déficit en tissus kératinisés au niveau du point d'impact sera aggravé par les techniques de « *punch* » et un déplacement apical des tissus doit être préféré dans ce cas à une technique sans lambeau sous peine de devoir recourir, dans un second temps, à un aménagement tissulaire péri-implantaire ;
- 3) Un défaut osseux localisé ne peut être corrigé au cours d'une chirurgie sans lambeau ;
- 4) Cette technique est fortement opérateur-dépendante et nécessite une courbe d'apprentissage importante.

La chirurgie transmuqueuse constitue donc une approche prédictible si la sélection des patients ainsi que la technique chirurgicale adoptée sont appropriées à sa mise en œuvre. Il est à noter qu'il n'existe pas de différence significative concernant le taux de succès de ce type d'intervention par rapport à une chirurgie réalisée de manière conventionnelle (57). Chacune d'entre elles montre des taux de survie implantaire élevés et situés aux alentours de 98 %.

3.1.4. Chirurgie « *flapless* » et implantologie assistée par ordinateur

3.1.4.1. Apport de l'IAO

En autorisant le transfert guidé de la planification implantaire au niveau du site opératoire avec précision, le concept d'implantologie assistée par ordinateur encourage la réalisation de chirurgies implantaires sans lambeaux (45).

Cette nouvelle technologie va donc dans le sens de chirurgies moins invasives, que l'on veut de plus en plus atraumatiques en réponse aux demandes légitimes de confort et d'esthétique émanant de nos patients.

Ces techniques chirurgicales exigeantes peuvent alors être envisagées plus sereinement à travers cette sous-discipline conférant à ce type d'intervention une sécurité opératoire accrue.

Le concept d'implantologie assistée par ordinateur est donc venu révolutionner cette procédure chirurgicale longtemps controversée en rendant ce type d'intervention dite « à *l'aveugle* » nettement plus prévisible qu'auparavant (55).

3.1.4.2. Le point sur l'édentement total maxillaire

L'ensemble des éléments soulignés dans le paragraphe relatif aux limites d'une chirurgie implantaire sans lambeau nous amène à ne pouvoir préconiser ce type d'intervention pratiquée « à main levée » dans le traitement de l'édenté complet maxillaire puisque c'est de la concertation intime d'une **réalité anatomique** et d'un **projet prothétique** que va dépendre le succès de la thérapeutique. Cette réalité anatomique doit donc pouvoir être finement analysée pour servir au mieux les intérêts de la réhabilitation finale.

→ Il est indispensable, dès lors qu'une chirurgie sans lambeau est envisagée dans ce type de situation clinique, de recourir à l'aide informatique pour obtenir un guide chirurgical stéréolithographique qui est le seul **garant** de la **planification** opératoire (selon M. Daas et K. Dada).

♦ Rappel : La précision de ces guides, si elle est élevée, n'est cependant pas absolue et ne doit pas faire oublier l'instauration de marges chirurgicales suffisantes (1).

3.1.4.3. Les études : synthèse concernant la chirurgie guidée sans lambeau

1. Du point de vue du ressenti du patient

Une chirurgie guidée sans lambeau réduit significativement douleur et inconfort durant la période postopératoire immédiate. Ce type d'intervention entraîne en effet moins de saignements, d'œdèmes et de trismus que lors d'une intervention classique faisant intervenir la levée d'un lambeau. Elle met d'autre part en jeu une procédure chirurgicale plus rapide fort appréciée des patients ainsi que des praticiens (45).

La comparaison de la chirurgie guidée **sans lambeau** à la chirurgie guidée **avec lambeau** donne de meilleurs résultats en terme de douleur et de confort en faveur de la chirurgie « *flapless* ». Elle en simplifie également le protocole chirurgical et prothétique (26).

Certaines études ont tenté d'évaluer la satisfaction des patients suite à ce type de procédure (planification virtuelle associée à chirurgie sans lambeau et parfois à une MCI) à travers, entre autre, des échelles visuelles analogiques. Les résultats de ces évaluations furent très positifs en faveur de la chirurgie guidée sans lambeau (56), (55).

2. Du point de vue de la fiabilité de ce type d'intervention

La concordance entre la planification préopératoire et la chirurgie montre que l'IAO est fiable pour réaliser des chirurgies sans lambeaux (47).

La plupart des études réalisées sur le sujet s'intéressent à la fiabilité de la chirurgie guidée associée à une procédure sans lambeau chez l'édenté total, avec des taux de succès élevés qui n'ont plus à être démontrés.

Il est à noter qu'une étude prospective sur 12 mois évaluant la fiabilité de ce type de procédure cette fois-ci chez l'édenté partiel a également montré d'excellents résultats.

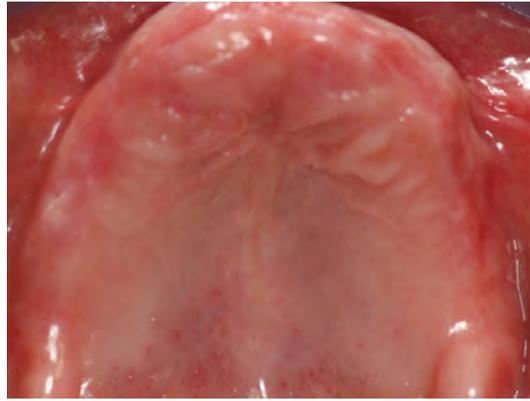
→ 57 implants ont été posés à la mandibule chez 16 patients à l'aide d'un guide chirurgical élaboré par CFAO en faisant intervenir une chirurgie sans lambeau. Seuls 2 implants furent perdus précocement chez un patient. Il a été conclu que la planification implantaire basée sur l'imagerie 3D et le guide chirurgical en découlant représentaient une option de traitement fiable pour réaliser une chirurgie sans lambeau chez l'édenté partiel (55).

L'IAO constitue donc une bonne indication pour les candidats à ce type de chirurgies « à minima » en augmentant la prédictibilité ainsi que la précision du geste chirurgical associé.

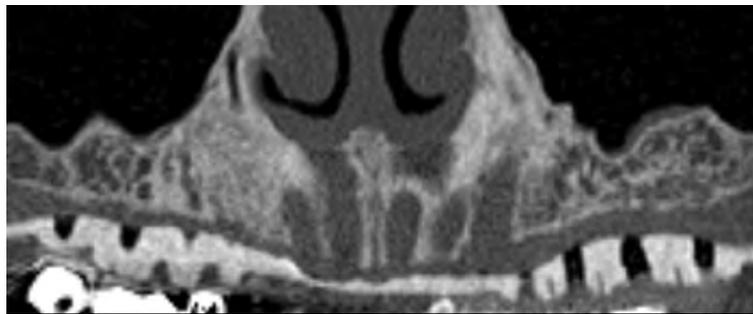
Figure 33 : Présentation d'un cas de chirurgie guidée sans lambeau chez l'édenté total maxillaire (Dr Davarpanah).



- a. **Vue de la prothèse d'usage de la patiente répondant aux critères de qualité requis. Celle-ci désire une réhabilitation implanto-portée évitant une chirurgie d'augmentation osseuse et souhaite également bénéficier d'une temporisation immédiate.**



- b. **Vue occlusale de l'édentement. L'effondrement de la hauteur osseuse est important dans la zone postérieure gauche. La muqueuse est ferme et adhérente.**



- c. **Coupe panoramique confirmant l'absence de volume osseux antérieur et les limites de hauteur pour certains des sites postérieurs : les implants seront disposés dans les zones canines et postérieures.**

→ La simulation permet ici de déterminer la position optimale des implants dans ces régions ainsi que d'effectuer une chirurgie sans lambeau.



- d. **Vue occlusale du guide radiologique avec le mordru en silicone rigide confirmant sa bonne position durant l'acquisition radiologique.**



- e. **Vue générale du guide chirurgical résultant de la planification virtuelle réalisée sur le logiciel SimPlant. Notez la disposition en trépied des vis de fixation ainsi que les 10 canons de guidage.**

| Implant | 17 | 16 | 15 | 14 | 13 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 |
|-------------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|-----------|-----------|
| Implant | NIOSS510 | NIOSS510 | NIOSS410 | NIOSS410 | NIOSS485 | IFOS411 | NIOSS411 | NIOSS410 | NIOSS510 | NIOSS510 |
| Planned | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 |
| Planned | 10 | 10 | 10 | 10 | 8.5 | 11.5 | 11.5 | 10 | 10 | 10 |
| Implant Placement | | | | | | | | | | |
| Depth | (3) | (3) | (3) | (3) | (2) | (4) | (4) | (3) | (3) | (3) |
| Tissue | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 |
| Starter | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 |
| Drill / | 2(B)/3 | 2(B)/3 | 2(B)/1 | 2(B)/1 | 2(A)/1 | 2(C)/1 | 2(C)/1 | 2(B)/1 | 2(B)/3 | 2(B)/3 |
| Drill / | 3.25(B)/4 | 3.25(B)/4 | 3(B)/2 | 3(B)/2 | 3(A)/2 | 3(C)/2 | 3(C)/2 | 3(B)/2 | 3.25(B)/4 | 3.25(B)/4 |
| Drill / | 3.85(B)/4 | 3.85(B)/4 | / | / | / | / | / | / | 3.85(B)/4 | 3.85(B)/4 |
| Tap | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 |
| Implant | 5(3) | 5(3) | 4(3) | 4(3) | 4(2) | 4(4) | 4(4) | 4(3) | 5(3) | 5(3) |
| Bone | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 5 |
| Analog Placement | | | | | | | | | | |
| Analog | 5(3) | 5(3) | 4(3) | 4(3) | 4(2) | 4(4) | 4(4) | 4(3) | 5(3) | 5(3) |
| Analog | IILAW5 | IILAW5 | IILA20 | IILA20 | IILA20 | IILA20 | IILA20 | IILA20 | IILAW5 | IILAW5 |

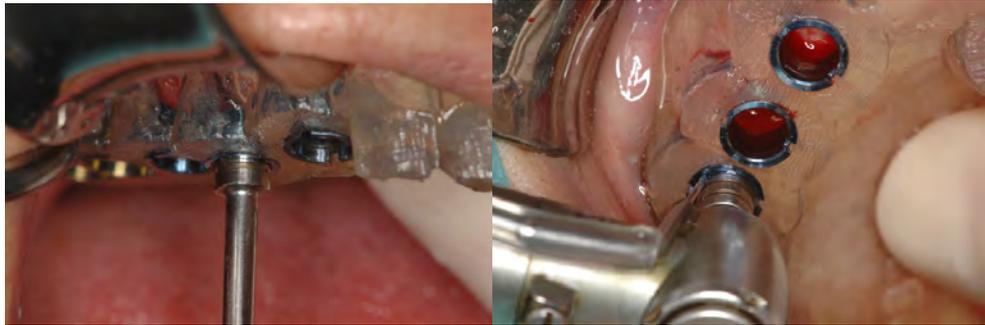
- f. **Feuille de route à suivre durant la chirurgie.**



- g. **Mise en occlusion du guide chirurgical, mordu rigide en silicone en place, avant pose des vis de fixation dans cette position stable.**



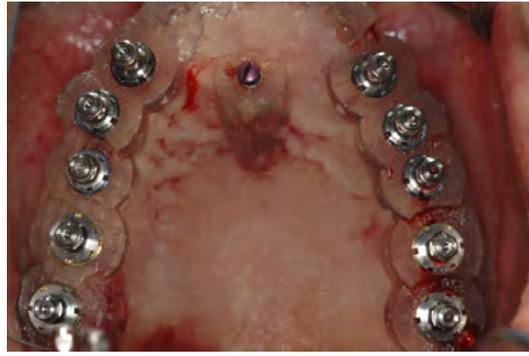
- h. Anesthésie locale au travers des canons de guidage après fixation du guide chirurgical afin d'éviter une déformation des tissus mous empêchant son bon positionnement.**



- i. Passage du bistouri circulaire puis du foret pilote en site de 15 puis de 25 afin de stabiliser le guide contre la muqueuse grâce à la mise d'implants à ce niveau.**



- j. Passage des forets de 3 mm puis mise en place des implants controlatéraux distaux en sites de 15 et 25 après montage de ces derniers au porte-implant. Ces implants sont ensuite progressivement amenés en butée contre le guide.**



- k. **Vue de l'ensemble des implants posés suivant la séquence chirurgicale dictée par la feuille de route en sites de 14 et 24, puis 16 et 17 et enfin au niveau des sites antérieurs avant dépose des vis de fixation du guide.**



- l. **Vue occlusale de tous les implants posés en situation transgingivale. Cette chirurgie peu invasive présente l'avantage d'occasionner des suites opératoires moindres, le traumatisme des tissus mous est alors minimisé.**

3.2. Diminution des indications de greffes osseuses

La fusion des données issues de l'imagerie tridimensionnelle aux logiciels de simulation implantaire permet aujourd'hui de réaliser une planification complète, rigoureuse et interactive considérant à la fois les impératifs prothétiques et anatomiques. Elle **optimise** de ce fait le maximum du **volume osseux disponible** de par sa précision et sa fiabilité, qualités retrouvées lors du transfert de cette planification sur le site chirurgical.

L'utilisation de la chirurgie guidée au niveau antérieur permet également d'optimiser le positionnement des implants vis à vis des fréquentes concavités vestibulaires et permet ainsi dans bien des cas de diminuer le recours aux greffes d'apposition (5).

L'IAO représente un formidable outil thérapeutique en autorisant la mise en place d'implants dans une situation anatomique **optimisée** utilisant l'os disponible tout en respectant les structures anatomiques et en prenant simultanément en compte les objectifs prothétiques. Les procédures d'augmentations osseuses peuvent alors être évitées ou réduites (45). Le concept d'implantologie assistée par ordinateur privilégie encore une fois les techniques chirurgicales atraumatiques et se présente aujourd'hui comme une véritable **alternative** aux **greffes osseuses** (Fortin et coll. 2009) grâce à la précision et à la fiabilité accrues qu'elle confère aux phases diagnostiques et chirurgicales de la thérapeutique implantaire.

♦ Remarque : Il convient toutefois de préciser qu'il est aujourd'hui de plus en plus facile et courant de réaliser des greffes osseuses ou des soulevés de sinus, ce qui rend la mise en place d'implants plus « sécurisée » sans avoir à exploiter le moindre mm³ d'os.

3.3. Gestion de cas complexes avec une sécurité accrue

La prise en charge de cas difficiles en implantologie représente souvent un véritable challenge pour le praticien, notamment chez le débutant. L'IAO se présente alors comme un concept séduisant qui vient ici guider, encadrer et par là même, simplifier l'ensemble des étapes thérapeutiques. Cette nouvelle technologie apporte en effet des repères au praticien ainsi qu'une véritable chronologie venant le sécuriser dans sa démarche thérapeutique.

3.3.1. Résorption osseuse avancée

La perte prématurée de l'organe dentaire entraîne une résorption osseuse des maxillaires, d'autant plus importante que l'édentement est ancien et non compensé. Certains cas d'atrophies osseuses deviennent alors particulièrement difficiles à gérer et impliquent souvent le recours à des procédures d'augmentations afin d'obtenir un volume osseux compatible avec la mise en place d'implants dentaires tout en respectant une marge de sécurité vis à vis des structures anatomiques dites à risque.

L'IAO permet aujourd'hui, comme nous l'avons précisé précédemment, d'optimiser le volume osseux résiduel et de ce fait limite la nécessité de recourir à des aménagements osseux pré-implantaires invasifs. Cet outil précieux permet alors d'appréhender de manière différente et moins invasive les cas de résorption osseuse avancée tout en s'entourant d'un maximum de précautions.

L'**imagerie** tridimensionnelle permet d'une part d'explorer le volume osseux disponible « *sous tous ses angles, dans les moindres détails* » et de repérer avec précision la position des éléments anatomiques adjacents à préserver durant la chirurgie. Cette imagerie de coupe fine et précise permet également au praticien de se familiariser avec les lieux de sa future intervention. Elle servira ensuite de base à une planification implantaire rigoureuse et interactive exploitant l'os disponible.

L'étape suivante relève de la **chirurgie assistée** par ordinateur, autorisant à ce stade le transfert précis et fiable de cette planification sur le site implantaire de façon guidée.

→ Le lien qui existe ici entre chaque étape permet par ailleurs de perdre le moins d'informations possible (cf. « *chaîne IAO* »).

L'IAO permet donc d'appréhender ce type de situation relativement complexe à gérer au cours d'une thérapeutique classique de façon plus sereine et moins invasive en éliminant parfois la nécessité de greffe osseuse. En effet, l'analyse tridimensionnelle du volume osseux permet son exploitation optimale. Conjuguée à l'emploi d'implants courts et angulés dont les taux de succès sont comparables aux techniques conventionnelles, elle permet de **repousser** les **limites** des **traitements non invasifs** et diminue ainsi le recours aux techniques de chirurgie avancée (5).

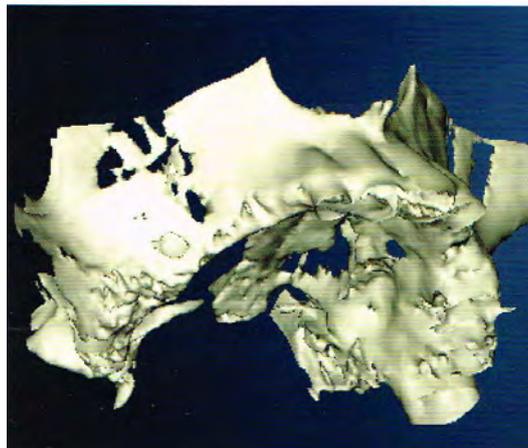
♦ Remarque : En cas de résorption osseuse maxillaire sévère chez l'édenté total, il est possible de combiner procédure chirurgicale « **All-on-4** » et **chirurgie guidée**. Ce protocole chirurgical et prothétique (avec MCI) constitue aujourd'hui une modalité de traitement prédictible avec un taux de survie implantaire comparable aux techniques conventionnelles (Paulo Malo) (26). Face à un patient présentant un contexte occlusal favorable et sans capacités masticatoires trop importantes, cette option de traitement est particulièrement intéressante car elle évite le recours à la greffe tout en offrant un ancrage implantaire satisfaisant (5).

La chirurgie guidée, associée à d'autres techniques constituant des alternatives aux greffes osseuses (implants zygomatiques, procédure All-on-4, implants angulés) permet aujourd'hui de repousser encore plus loin les **limites thérapeutiques** lors du traitement de **cas complexes** présentant une résorption osseuse sévère.

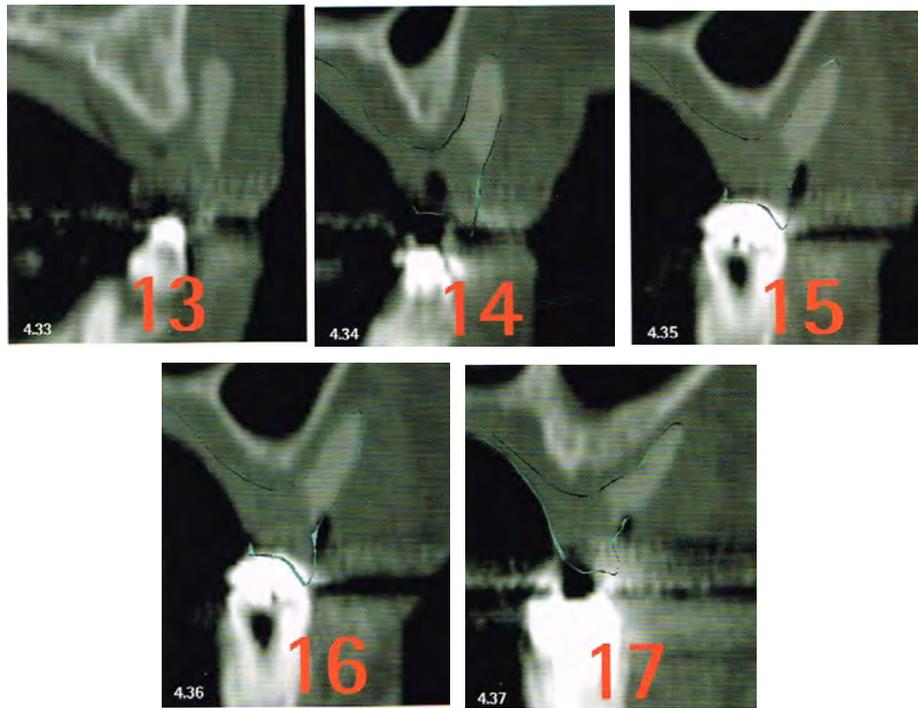
Figure 34 : Intérêt de l'IAO dans la planification implantaire d'un cas de forte résorption osseuse : traitement d'un édentement partiel maxillaire de classe II division 1 selon le procédé NobelGuide®.



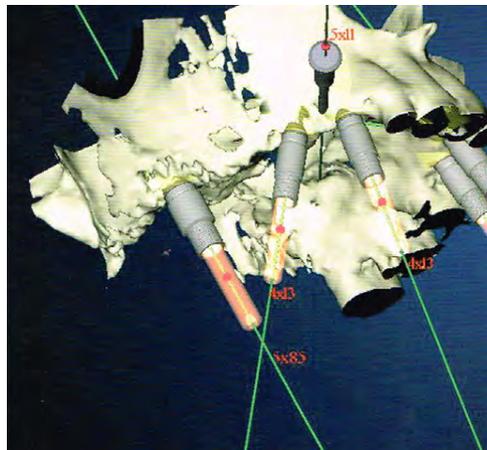
a. Vue endo buccale initiale : une réhabilitation globale de l'arcade maxillaire est envisagée. Cette patiente a été initialement adressée pour la mise en place d'implants au niveau de 13, 24 et 25. En raison du faible volume osseux au niveau du secteur 1, la mise en place d'implants au niveau de 14, 15, 16 et 17 avait été écartée, la patiente refusant une surélévation du plancher sinusien.



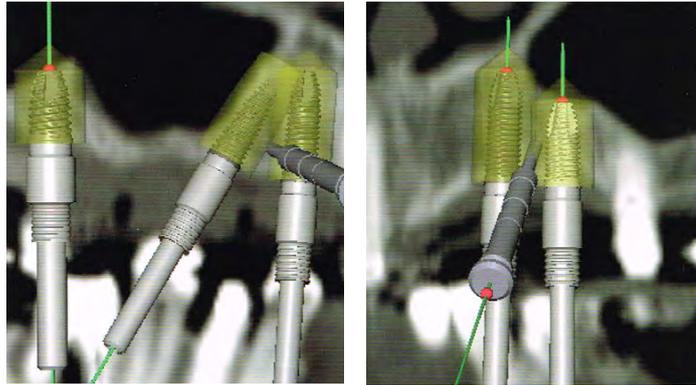
b. Reconstruction tridimensionnelle du volume osseux de la patiente, les dents ont été volontairement exclues de ce volume afin d'éliminer les artéfacts. L'examen attentif de cette reconstruction atteste de la forte résorption dans le secteur 1.



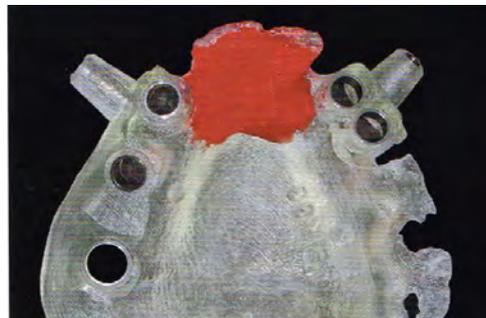
- c. Cette résorption est confirmée par les reconstructions obliques au niveau de 14, 15 et 16 où le volume osseux diminue régulièrement. On note par ailleurs la présence d'une cloison sinusienne au niveau de 17.



- d. Détail de la planification retenue pour cette patiente : mise en place d'un implant court au niveau de 17, implant angulé le long de la paroi antérieure du sinus et 3 implants comme prévu initialement.



- e. Ces reconstructions panoramiques démontrent l'utilisation optimale du volume osseux résiduel. Cette approche aurait été beaucoup plus difficile et hasardeuse en chirurgie conventionnelle.



- f. Guide chirurgical stéréolithographique découlant de cette planification virtuelle.

3.3.2. Procédure d'extraction-implantation immédiate

L'analyse de la littérature relative au positionnement d'implants au niveau de sites extractionnels montre des taux de succès équivalents à ceux d'implants mis en place dans des sites cicatrisés (1). Cette procédure admise comme étant fiable et scientifiquement établie est même devenue un axe de développement privilégié en implantologie à travers les nombreux avantages qu'elle confère.

Ce protocole rigoureux, s'il répond à des impératifs bien précis qu'il convient d'évaluer avant et pendant l'intervention chirurgicale, présente en contrepartie l'avantage d'apporter une solution à la question récurrente de la **temporisation immédiate**.

L'objectif ici n'est pas de s'étendre sur cette procédure d'extraction-implantation immédiate (EII) parfaitement bien traitée par ailleurs mais plutôt de tenter de préciser brièvement l'apport de l'IAO dans la gestion de telles situations cliniques.

Quel intérêt présente l'IAO dans ce type de procédure ?

Afin qu'une procédure d'EII soit prédictible, le choix du diamètre et de la longueur implantaire adéquats ainsi que l'obtention d'une stabilité primaire correcte constituent des prérequis à son ostéointégration. Ces questions doivent donc être réfléchies par le praticien **en amont** de la chirurgie. La simulation informatique en IAO permet de préciser ces paramètres et de les anticiper avant l'intervention. D'autre part, lors du passage à l'édentement complet maxillaire, une procédure de chirurgie guidée représente une aide notable dans ces situations cliniques délicates par rapport à une chirurgie conventionnelle en permettant :

- 1) un meilleur respect des objectifs prothétiques ;
- 2) une optimisation du positionnement tridimensionnel des implants, facteur clé dans ce type de procédure chirurgicale ;
- 3) une exploitation optimale de l'os supra-alvéolaire garantissant le meilleur ancrage osseux possible à la future reconstruction implanto-portée ;
- 4) une plus grande prévisibilité du geste chirurgical.

La procédure d'**extraction-implantation guidée** permet donc un meilleur positionnement tridimensionnel des implants en fonction des exigences prothétiques et pas simplement du volume osseux résiduel. Il s'agit de l'objectif le plus délicat à atteindre dans les protocoles d'EII quand ces dernières s'effectuent à main levée. De plus, il est plus facile de maintenir un axe implantaire idéal dans le cas d'une EI guidée malgré la présence d'une corticale alvéolaire qui, à main levée, entraînerait inévitablement le foret dans l'axe de l'alvéole post-extractionnelle, souvent bien différent de l'axe implantaire souhaité. L'apport de la planification assistée par ordinateur aux techniques d'EII en terme de prédictibilité est indéniable non seulement pour le praticien mais surtout pour le patient. Il transforme une procédure chirurgicale réputée « hasardeuse » en un **protocole fiable et prévisible** (1).

3.3.3. Multiplicité de sites implantaires

Le concept d'implantologie assistée par ordinateur constitue également une aide précieuse au diagnostic ainsi qu'à la chirurgie implantaire lors de la prise en charge de patients **édentés complets** candidats à une réhabilitation prothétique fixée implanto-portée. De multiples sites doivent ici être considérés et rendent une planification conventionnelle difficile à réaliser et surtout à transférer avec précision à la phase chirurgicale.

Par ailleurs, ce type de réalisation implique de positionner les différents implants (6 à 8 au maxillaire, 4 à 6 à la mandibule) qui se trouvent plus ou moins éloignés les uns des autres de la manière la plus **parallèle** possible afin d'optimiser la réalisation ainsi que le résultat prothétique en découlant (58).

L'IAO permet de guider le praticien de la planification implantaire à la réhabilitation prothétique finale en gardant le même fil directeur durant l'ensemble des étapes thérapeutiques : le projet prothétique de départ. La planification prothétique et chirurgicale est alors simplifiée ; le positionnement implantaire tridimensionnel simulé est optimisé et transféré de façon guidée et précise au niveau des sites implantaires retenus.

Des chirurgies moins invasives associées à des MCI peuvent alors être envisagées en réponse aux attentes de confort, d'esthétique et de fonction allant de plus en plus de pair avec la mise en jeu de ces thérapeutiques prothétiques souvent complexes et exigeantes (59).

3.4. Réalisation d'une prothèse avant la chirurgie pour une mise en charge immédiate

Nous envisagerons brièvement le concept de MCI à travers l'intérêt découlant de l'IAO dans cette approche réservée à des situations cliniques bien particulières sans entrer dans les détails prothétiques qui ne constituent pas l'objet de ce travail.

3.4.1. Rappels sur la MCI

La MCI, qui prévalait avant l'énoncé par Bränemark des règles permettant l'ostéointégration, est revenue au goût du jour dès le début des années 1980 (équipe de Goteborg) afin de satisfaire les **impératifs grandissants** émanant de patients et praticiens également en quête de moyens permettant de raccourcir la durée globale des traitements implantaires.

Elle peut être définie comme la charge imposée à un implant immédiatement après ou dans les heures qui suivent la chirurgie et s'impose aujourd'hui comme une réponse à la temporisation immédiate (59).

De nombreux facteurs interviennent dans le succès de ce type de procédure comportant par ailleurs des critères d'exclusion et d'inclusion très précis que nous n'aborderons pas ici (33).

♦ Remarque : Il convient de rappeler que la **mise en charge immédiate** n'a d'intérêt que si elle fait intervenir une prothèse fixée implanto-portée chez l'édenté complet maxillaire ou mandibulaire. On parle en revanche de **mise en situation prothétique** lorsqu'il s'agit de la mise en place d'une prothèse provisoire après pose d'un implant unitaire antérieur (en sous occlusion ici, en réponse à un impératif esthétique).

3.4.2. Quels intérêts à la MCI ?

Le recours à la MCI présente de nombreux **intérêts** pour le patient comme pour le praticien :

- 1) le plan de traitement ne comporte qu'une seule intervention chirurgicale, ce qui en plus d'améliorer grandement le confort du patient diminue de façon importante les complications postopératoires potentielles ;
- 2) le temps de traitement est considérablement réduit ;
- 3) le résultat esthétique est immédiat ;
- 4) le travail ultérieur du praticien est facilité : toute son attention est focalisée sur la qualité de la prothèse délivrée et sur son équilibration ;
- 5) la mise en condition tissulaire est bien meilleure lors des procédures de MCI (1).

3.4.3. Apport de l'IAO

Lors d'une **thérapeutique conventionnelle** incluant une MCI, une empreinte est réalisée à la fin de la chirurgie implantaire. Le modèle en plâtre correspondant sert ensuite de support à la confection d'une prothèse provisoire. Cette dernière est en général mise en place quelques heures après l'intervention ou le lendemain, après son retour du laboratoire de prothèse.

En autorisant la réalisation d'une prothèse avant même que l'acte chirurgical n'ait eu lieu, l'IAO se présente encore une fois comme un concept révolutionnaire venant renverser la chronologie conventionnelle des séquences existant depuis les débuts de l'implantologie en **supprimant** l'étape de prise d'**empreinte** post-chirurgicale classique.

Ceci n'est évidemment possible que si la pose des implants s'effectue de façon précise par rapport à la planification virtuelle. Du point de vue prothétique, il aura également fallu attendre la mise au point de pièces prothétiques autorisant une certaine marge de manœuvre dans la correction des divergences existant par rapport à la simulation sans porter atteinte à la précision de la réhabilitation.

3.4.3.1. Bridge provisoire réalisé avant la chirurgie

Le guide chirurgical stéréolithographique matérialisant les axes implantaires planifiés en fonction du projet prothétique présente un intérêt majeur à ce stade. En effet, les répliques d'implants ainsi que leur système de fixation au guide peuvent être mis en place au niveau de l'intrados de ce dernier. Puis un coffrage est réalisé (comme pour une empreinte secondaire) avant d'injecter du silicone autour des analogues d'implants et de couler le **maître modèle** (5). Celui-ci sera ensuite monté sur articulateur grâce au duplicata stéréolithographique commandé en même temps que le guide chirurgical (par montage croisé) et servira de support à la réalisation prothétique (58).



Figure 35 : Photographie illustrant le traitement du guide chirurgical pour la réalisation du modèle de travail sur lequel la prothèse provisoire ou d'usage sera réalisée.

3.4.3.2. Bridge définitif réalisé avant la chirurgie

La procédure « *Teeth-in-an-Hour* » permet la pose d'une prothèse définitive fabriquée avant la chirurgie selon le même procédé. Elle représente un réel gain de temps et de confort pour le patient comme pour l'équipe soignante et constitue une option fiable de traitement (1).

3.4.3.3. Les piliers compensateurs

Dans le cadre d'une procédure de chirurgie guidée et de la mise en place d'une prothèse fabriquée avant la phase chirurgicale, il est indispensable d'utiliser des **piliers expansifs** afin de pallier aux imprécisions de positionnement des implants que l'on peut rencontrer dans ce type de procédure. Ils garantissent ainsi la passivité de la prothèse mise en place (1).



Figure 36 : Image représentant un pilier compensateur permettant de pallier aux imprécisions de positionnement des implants dans le sens axial. Notez que leur utilisation appelle de nombreuses précautions.

À retenir :

Les guides chirurgicaux réalisés par CFAO ainsi que les systèmes dynamiques associés à la navigation chirurgicale autorisent aujourd'hui le transfert précis et fiable des données de la planification virtuelle effectuée sur le logiciel interactif d'IAO au niveau du site implantaire. Ils possèdent la vertu d'apporter une sécurité opératoire accrue au geste chirurgical associé par rapport à une chirurgie dite « conventionnelle » en diminuant le risque d'endommager les structures anatomiques voisines (58).

La précision du positionnement implantaire tridimensionnel obtenue à travers l'utilisation de ces outils d'aide au diagnostic et à la chirurgie permet d'envisager une nouvelle approche de l'implantologie notamment pour les cas complexes (14), tout en répondant plus volontiers aux attentes de confort et d'esthétique émanant des patients.

Il convient cependant de garder à l'esprit qu'il n'est pas possible aujourd'hui de consacrer une confiance totale en l'IAO, qui a encore beaucoup de preuves à faire (52). Une marge d'imprécision d'environ 2 mm vis à vis des obstacles anatomiques à risque doit effectivement être anticipée et considérée avant de se lancer dans ce type de chirurgie guidée.

Des études complémentaires sont d'autre part nécessaires afin de valider la précision de ces systèmes ainsi que de déterminer leurs véritables intérêts et indications à la lumière des thérapies implantaires classiques manuelles.

Nous **comparerons** dans une 3^{ème} et dernière partie le concept d'implantologie assistée au protocole conventionnel en précisant ses **atouts, limites et perspectives**.

PARTIE III : COMPARAISON DE L'IAO AVEC LA THÉRAPEUTIQUE CONVENTIONNELLE. ATOUTS, LIMITES ET PERSPECTIVES.

1. CONFRONTATION DE LA THÉRAPEUTIQUE CLASSIQUE AU CONCEPT D'IAO

1.1. Intérêt de l'IAO lors de la phase de planification implantaire et influence sur sa précision (rappels partie I)

1.1.1. À propos de la technique d'imagerie pré-implantaire

1.1.1.1. Rappels

Lors d'une thérapeutique implantaire dite **conventionnelle**, la planification implantaire prothétique et chirurgicale est réalisée sur la base de clichés en deux dimensions ou de coupes 2D issues d'une acquisition volumique (50).

Or, il convient de rappeler que l'imagerie bidimensionnelle souffre d'un manque d'informations cruciales concernant les volumes osseux disponibles dans un plan de l'espace (vestibulo/lingual). De plus, l'OPG ne constitue pas une technique d'acquisition fiable en implantologie car cette image est surdimensionnée et présente de nombreuses déformations et distorsions qui peuvent nuire à l'interprétation correcte des clichés et de ce fait induire le praticien en erreur. Elle ne permet pas par ailleurs de localiser certains obstacles anatomiques avec précision. Les lacunes inhérentes à ce type de cliché peuvent représenter un danger en implantologie.

L'imagerie tridimensionnelle revêt aujourd'hui un véritable intérêt lors du diagnostic pré-implantaire malgré les doses d'irradiation supérieures qu'elle délivre par rapport à l'imagerie classique. Elle permet en effet de collecter des informations fines et précises qui vont orienter le plan de traitement, notamment dans la prise en charge de **cas complexes** pour lesquels elle apparaît aujourd'hui comme incontournable.

Elle est de ce fait **justifiée** à chaque fois qu'elle apporte une sécurité accrue au bon cheminement de la thérapeutique implantaire après avoir pesé la **balance bénéfice/coût + irradiation**.

L'IAO fait donc intervenir une imagerie volumique apparaissant comme le gold standard au stade de la planification implantaire. Ce concept présente également l'avantage de réaliser **un seul cliché** servant de base à la planification implantaire d'emblée et évite de ce fait la multiplication d'acquisitions radiologiques souvent inutiles (RA, panoramique puis scanner si nécessaire, parfois même 2 scanners : le premier à visée diagnostique puis avec le guide radiologique en place).

1.1.1.2. Quelle précision attendre de l'imagerie tridimensionnelle ?

Qu'il s'agisse du scanner ou bien du cone beam, un logiciel informatique reconstitue le volume analysé après l'acquisition puis segmente ce dernier afin d'obtenir des images de coupes. La précision de la segmentation du cone beam est de **95%** (Loubele et coll. 2008).

L'étude de ces auteurs, réalisée avec 5 cone beams différents, a montré une corrélation de 95% entre les mesures réelles et celles obtenues sur les images volumiques.

Quelques études récentes ont mesuré la précision du scanner et du cone beam.

Lang et coll. (2010) ont comparé la précision des mesures obtenues avec un scanner et 5 cone beams différents par rapport à un modèle 3D considéré comme le gold standard dans cette étude. La déviation moyenne obtenue pour le scanner fut de 0,137 mm alors que pour le CBCT elle variait de 0,165 à 0,386 mm selon le fabricant.

Ainsi, quelle que soit la technique d'acquisition radiographique utilisée, on peut dire que la précision de mesure est de l'ordre du quart de millimètre par rapport à la réalité.

1.1.1.3. Intérêt des logiciels d'IAO au stade de l'imagerie

Les logiciels permettent à l'opérateur de naviguer à l'intérieur du volume anatomique avant l'intervention autorisant ainsi sa familiarisation avec les lieux.

IAO → Analyse dynamique VS planches en 2D → Analyse statique.

1.1.2. Guides d'imagerie et planification

Lors d'une thérapeutique implantaire classique faisant intervenir une acquisition volumique, un **guide radiologique** est parfois utilisé afin de valider la cohérence entre les objectifs prothétiques et les possibilités implantaires. → *Jusque là, les étapes sont similaires à celles de l'IAO.*

Si le praticien n'utilise **pas de guide radiologique** à ce stade, le choix des sites implantaires à l'issue de la planification aura tendance à être guidé par le volume osseux résiduel (1).

1.1.3. Planification implantaire proprement dite

« La pose des implants concorde plus précisément avec la planification lorsqu'elle est issue d'une prévisualisation 3D scanner des structures anatomiques que lorsqu'elle est le résultat d'une planification faite à partir de coupes 2D reconstruites » (Jacobs et coll. 1999).

1.1.3.1. Conventionnelle → Les **calques**

La planification est réalisée par la superposition d'un calque matérialisant le contour implantaire sur l'incidence coronale correspondant à la coupe sélectionnée mais également aux coupes adjacentes. Cela permet alors une étude **bidimensionnelle** qui ne peut être fiable que si l'axe d'implantation est identique à celui de la reconstruction, d'où l'importance du radiologue qui doit fournir des coupes perpendiculaires au plan d'occlusion idéal.

Ces coupes impliquent également une dissociation des données lors d'une planification classique et la perte d'informations qui s'en suit.

1.1.3.2. IAO → Les **bibliothèques** d'implants

Il s'agit alors d'une planification implantaire à la fois prothétique et chirurgicale, didactique et interactive, qui permet de visualiser correctement le projet implantaire.

L'utilisation de ces programmes de simulation implantaire apporte un réel plus dans la planification des cas complexes et ce, sans étape clinique supplémentaire. La réalisation d'une telle planification permet en effet la visualisation d'un plus grand nombre d'éléments anatomiques, chirurgicaux et prothétiques (1).

Elle est par ailleurs précise et transposable de façon fiable à la phase chirurgicale.

Pour Jacobs, la prédictibilité de ce type de simulation est bien réelle puisque, comparée à une étude pré-implantaire sans l'utilisation de guide chirurgical spécifique, elle retrouve :

- une meilleure concordance entre le site implantaire retenu lors de la simulation et le site implanté ;
- une meilleure prédictibilité quant au choix de la taille et du diamètre implantaire ;
- une meilleure prévisibilité des complications anatomiques (1).

1.2. Précision du dispositif de transfert à la phase chirurgicale

Au cours d'une thérapeutique implantaire **traditionnelle**, le guide radiologique (s'il existe) est parfois transformé en guide chirurgical en l'ajoutant afin de transposer le projet prothétique au niveau du site opératoire.



Figure 37 : Photographie illustrant la transformation d'un guide radiologique en guide chirurgical afin de transposer le projet prothétique au stade de la chirurgie.

Les couronnes radio-opaques sont ici évidées à la fraise résine en regard des sites implantaires retenus (46 et 47).

Cette transformation aléatoire implique inévitablement une perte d'informations considérable à l'origine d'un transfert plus ou moins « hasardeux » de la planification implantaire au niveau du site chirurgical.

Bien souvent, ce guide chirurgical est seulement utilisé en début d'intervention afin de localiser le point d'impact du site implantaire avant d'effectuer le forage osseux du lit implantaire.

La chirurgie est alors dite « *à main levée* » ou « *manuelle* ». Elle peut faire intervenir un guide chirurgical conventionnel ou est caractérisée par l'absence de guide.

→ Il est à noter qu'aucune donnée n'est disponible dans la littérature concernant la précision du positionnement implantaire manuel chez l'édenté partiel ou complet (50).

Pour ce qui est de l'**implantologie assistée par ordinateur**, nous rappelons que des guides chirurgicaux réalisés par CFAO ou des systèmes dynamiques guidant le praticien en temps réel au cours de la chirurgie interviennent afin d'effectuer le transfert de la planification au niveau du site opératoire de façon fiable et précise. De nombreuses études renseignent par ailleurs la précision que l'on peut attendre d'une chirurgie guidée, même si elles méritent d'être approfondies (cf. partie II).

La déviation due à l'imprécision de la fabrication du guide chirurgical stéréolithographique serait quant à elle inférieure à 0,25 mm (13).

Qu'en est-il d'un guide chirurgical conventionnel ? Quelle précision peut-on en attendre ?
Aucune étude ne renseigne ce paramètre.

1.3. Impact sur la précision du positionnement implantaire tridimensionnel au niveau du site : les études

Peu d'études comparent les déviations relevées entre une chirurgie dite **à main levée** (faisant appel ou non à un guide chirurgical conventionnel) et une procédure **assistée** par ordinateur, par rapport à une planification de départ. De plus, les études disponibles à ce jour ne présentent pas un suivi à long terme (45).

Les études *in vitro* réalisées à ce sujet montrent une amélioration significative en faveur de la chirurgie guidée, et ce pour **toutes** les déviations mesurées (35).

Il n'existe pas d'étude *in vivo* dans la littérature rapportant la précision de la chirurgie guidée par rapport à une intervention manuelle (48).

Il est donc difficile de déterminer clairement les **bénéfices** et **indications** de l'IAO par rapport à un traitement conventionnel en l'absence de données cliniques précises et validées venant les appuyer.

❖ **Sarment et coll.** ont tenté d'évaluer la précision des guides chirurgicaux stéréolithographiques par rapport aux guides conventionnels en les comparant *in vitro*.

→ L'étude a été menée sur des modèles en résine : 5 implants ont été planifiés à partir d'un CBCT à l'aide d'un logiciel de part et d'autre de mâchoires mandibulaires. 5 opérateurs ont ensuite réalisé les forages implantaire en ayant accès à la planification réalisée au préalable. Du côté droit de la mâchoire (*côté contrôle*), un guide chirurgical conventionnel issu de la transformation du guide radiologique a été utilisé. Du côté gauche (*côté test*), un guide chirurgical stéréolithographique a servi à transférer la planification virtuelle sur le site.

Un nouveau scanner fut réalisé après pose des implants puis cette acquisition a été superposée à la planification de départ afin de mesurer les déviations obtenues.

L'ensemble des déviations mesurées furent bien **inférieures** avec le guide chirurgical stéréolithographique entre les différents praticiens mais aussi pour le même praticien.

Malgré les limites de cette étude préclinique, il a été conclu que le positionnement implantaire tridimensionnel était amélioré avec les guides chirurgicaux réalisés par CFAO. En effet, une différence **significative** fut relevée entre les 2 types de guides en faveur de ce dernier (51).

❖ **Nickenig et coll.** ont quant à eux réalisé une étude combinée *in vivo/in vitro* afin d'évaluer la différence de précision entre positionnement implantaire basé sur planification virtuelle et guide chirurgical en découlant par rapport à une intervention conventionnelle à main levée.

→ 23 implants ont été mis en place sur 10 patients à l'aide du guide chirurgical prévu à cet effet puis l'implantation manuelle sur les modèles correspondants à ces patients fut réalisée. Les opérateurs avaient cette fois-ci pour consigne de placer ces mêmes implants dans la situation qui leur semblait la meilleure d'un point de vue anatomique et prothétique. Ils disposaient ici d'une radiographie panoramique.

Le guide chirurgical a encore une fois montré des déviations linéaires et angulaires significativement inférieures entre planification et position réelle des implants par rapport à la méthode conventionnelle.

Il a donc été conclu que la **précision** du positionnement implantaire assisté par ordinateur était élevée et significativement supérieure à la pose manuelle d'implants (49).

❖ Plusieurs études ont par ailleurs été effectuées sur des répliques de mâchoires où la position des implants est choisie sur un logiciel de simulation et la mise en place des implants réalisée d'une façon conventionnelle chez l'édenté total maxillaire.

Ces études ont montré une déviation angulaire de l'ordre de **10 °** et des déviations de **1,4 mm** et **1,9 mm** respectivement au niveau du col et de l'apex des implants (→ cf. figure 38).

Il est à noter qu'il s'agit d'études *in vitro* et que ces erreurs sont naturellement majorées par les conditions cliniques.

De plus, contrairement aux situations d'édentement unitaire et partiel, l'absence totale de dents permettant la prise d'appui fait ici cruellement défaut.

→ C'est dans ce contexte que l'on assista bientôt au développement de la planification puis de la chirurgie implantaire assistées par ordinateur.

| Auteurs | Type d'étude | Déviation obtenue par rapport à la position prévue | | | Type de déviation |
|----------------|---|--|-------------|---------------|--|
| | | mm | | degrés | |
| Sarment | Répliques de mâchoires : Guide classique vs stéréolithographique | 1,5 2,1 | - - | - - | Col Apex |
| Hoffmann | Répliques de mâchoires : 112 forages manuels/forages par navigation | - - | - 1,1 | 11,2° - | Angulation Verticale |
| Brief | Répliques de mâchoires : Guide classique/forage par navigation | 1,35 1,62 | - - | - - | Col Apex |
| Kramer | Répliques de mâchoires : Guide classique/forage par navigation | 0,73 | - 0,68 | - 6,45 ° | Mésio-distale Vestibulo- linguale Verticale |
| Moyenne | | 1,4 1,9 | 1,04 | 10,5 ° | Col Apex Verticale Angulation |

Figure 38 : Tableau rapportant la précision obtenue avec une chirurgie conventionnelle.

Plusieurs études ont alors montré que la déviation moyenne obtenue avec ce protocole était bien inférieure à celle obtenue avec la chirurgie conventionnelle, comme le montre le tableau suivant (→ cf. figure 39).

| Auteurs | Type d'étude | Nombre d'implants | Déviations (mm) entre la simulation et la position prévue | Type de déviation |
|----------------|---------------|-------------------|---|---------------------------|
| Besimo | Prospective | 76 | Maxillaire : 0,6 Mandibulaire : 0,3 | Apex Apex |
| Naitoh | Prospective | 21 | 0,3 | Col |
| Sarment | Prospective | 25 | 0,9 1,0 | Col Apex |
| Tardieu | Cas clinique | 5 | 0,41 | Col |
| Di Giacomo | Rétrospective | 21 | 1,45 2,99 | Col Apex |
| Moyenne | | | 0,85 0,96 | Col Apex |

Figure 39 : Tableau rapportant la précision obtenue avec la chirurgie guidée.

Il convient de souligner qu'il est aujourd'hui extrêmement difficile de comparer la précision du positionnement implantaire tridimensionnel obtenu à l'issue d'une thérapeutique implantaire conventionnelle par rapport à un protocole faisant intervenir l'IAO. En effet, peu d'études ont été réalisées sur le sujet. De plus, il n'existe pas d'études *in vivo* renseignant ce paramètre dans la littérature qui permettraient la transposition des résultats en clinique afin de définir plus clairement les **bénéfices** et **indications** de ce concept.

Cependant, les résultats des études *in vitro* s'accordent pour démontrer une amélioration significative de la précision du positionnement implantaire lorsque la chirurgie est assistée par ordinateur, par rapport à une chirurgie dite classique à main levée : l'objectif principal de l'IAO semble alors bel et bien atteint.

Dans l'attente de données complémentaires fiables, nous allons tenter dans la suite de notre travail de dégager les situations cliniques qui nous semblent les plus favorables à la mise en jeu de ces systèmes à la lumière des atouts que l'on peut leur attribuer.

2. ATOUPS DE CE CONCEPT DANS SES INDICATIONS THÉRAPEUTIQUES MAJEURES

L'IAO s'impose aujourd'hui comme une véritable aide au diagnostic ainsi qu'à la chirurgie implantaire. Il en résulte un positionnement implantaire tridimensionnel amélioré par rapport à une chirurgie dite traditionnelle, associé à de nombreux autres avantages largement abordés précédemment (cf. parties I et II). Cependant, il convient de contraster ces propos. En effet, certains auteurs insistent sur le fait que la précision du positionnement implantaire obtenue à travers une **insertion manuelle** est **suffisante** dans la plupart des situations cliniques (60).

En l'absence de consensus concernant les véritables indications et bénéfices portés par l'IAO et à la lumière de quelques rappels, nous exposerons différentes situations cliniques pour lesquelles elle nous semble apporter un véritable « plus » avec une balance bénéfice/coût **positive** dans la thérapeutique implantaire.

2.1. Intérêts dans les cas complexes pour les praticiens débutants

De nombreux auteurs s'accordent sur le fait que l'IAO ne représente pas une indication thérapeutique « majeure » dans les situations cliniques sans difficultés particulières. Celles-ci sont en effet facilement menées à bien à travers une prise en charge **classique** et résultent en un positionnement implantaire correct ainsi qu'à une réhabilitation prothétique satisfaisante répondant favorablement aux impératifs recherchés et s'inscrivant dans la pérennité.

Ce concept semble cependant particulièrement intéressant et bénéfique dans la gestion de cas complexes, notamment chez les praticiens peu confirmés débutant en implantologie (8).

En effet, même si elles demandent un travail d'amont considérable (*à côté duquel on ne peut pas passer ici → point +*) ainsi qu'une courbe d'apprentissage non négligeable, ces nouvelles technologies représentent un réel progrès aussi bien pour la planification pré-implantaire que pour l'aide peropératoire dans les cas complexes faisant intervenir une prothèse fixée implanto-portée, plus particulièrement chez les praticiens un peu « frileux » devant ce type de thérapeutique souvent considéré à tort comme élitiste.

L'IAO va alors permettre au **praticien débutant** d'être guidé tout au long des étapes thérapeutiques par un projet prothétique mûrement réfléchi et validé, servant de référence durant l'ensemble du traitement. Le diagnostic est précis, rigoureux et complet (cf. partie I), la chirurgie est guidée (cf. partie II). Ceci est extrêmement confortable, rassurant et oblige l'opérateur à savoir vers quoi il se dirige sans brûler les étapes, clairement codifiées et incompressibles.

Le positionnement implantaire tridimensionnel s'en voit également amélioré, tout comme les résultats esthétiques et fonctionnels qui en découlent lors de la phase prothétique, plus prédictibles ici.

Ce concept apporte par ailleurs une sécurité opératoire supplémentaire non négligeable au praticien durant une intervention qui aurait été plus délicate à appréhender de manière conventionnelle. La chirurgie guidée diminue également le risque d'endommager les structures anatomiques voisines du site implantaire (58).

La prise en charge de cas complexes, plus particulièrement par des praticiens débutants dans ce type de thérapeutique, constitue à nos yeux l'indication principale qu'il conviendra de retenir de l'IAO. Par ailleurs, dans toutes les situations cliniques pour lesquelles le volume osseux disponible est limité ou faisant intervenir une demande esthétique forte, le recours à une planification plus élaborée est alors justifié (52).

2.2. Une procédure moins opérateur-dépendante

La précision du positionnement implantaire tridimensionnel à l'issue d'une thérapeutique **conventionnelle** dite « à main levée » repose principalement sur le degré d'expérience ainsi que sur les compétences du praticien qui pose les implants. Il en découle un résultat plus ou moins prédictible et fonction du praticien (44).

→ La chirurgie **guidée** constituerait quant à elle un protocole moins opérateur-dépendant.

En effet, les procédures faisant intervenir les guides chirurgicaux associés à l'IAO résulteraient en un positionnement implantaire tridimensionnel **aussi précis**, qu'ils soient utilisés par un praticien expérimenté ou débutant en implantologie (42).

Par ailleurs, l'utilisation de ces guides **diminuerait les variations de précision** de positionnement implantaire observées entre différents praticiens par rapport à une chirurgie faisant intervenir un guide chirurgical conventionnel (54).

Ce point conforte encore une fois l'intérêt particulier de recourir à ce type de protocole pour les praticiens peu expérimentés en quête d'une sécurité opératoire accrue.

2.3. Nécessité d'une précision critique

Il est également souligné dans la littérature que le recours à l'IAO constitue une **indication de choix** dans la prise en charge de patients nécessitant une précision extrême lors de la mise en place d'implants (cf. résorption osseuse avancée, II.3.3.1)) (51).

Il en est de même pour garantir le parallélisme le plus proche possible entre de multiples implants répartis sur l'ensemble de l'arcade et plus ou moins distants les uns des autres (cf. édentement total → X des sites, II.3.3.4)) (58).

♦ Remarque : Ce type d'intervention serait plus ou moins aléatoire à main levée.

Cette approche apporte donc en définitive une **précision** couplée à une **sécurité** supplémentaire lors de la prise en charge de patients qu'il serait plus difficile de traiter de manière conventionnelle (56).

2.4. Un véritable outil de communication

La communication, qu'elle soit verbale ou non verbale, occupe aujourd'hui une place prépondérante dans la relation de soins en s'imposant comme la base de la relation de **confiance**, élément clé du succès thérapeutique en odontologie (61). De nombreux outils numériques ont récemment fait leur apparition au sein de nos cabinets dentaires (appareils photo, iPad, caméras optiques et CFAO, etc.) et viennent renforcer ce message.

Le concept d'IAO constitue en ce sens un excellent outil de communication, d'abord **visuel** mais aussi **didactique**.

En autorisant la visualisation progressive de l'ensemble des étapes thérapeutiques pas à pas sur écran (comprenant tout d'abord l'acquisition volumique confrontée au projet prothétique puis la planification virtuelle +/- la navigation) ce concept intelligent permet au patient de se sentir véritablement impliqué dans une thérapeutique implantaire souvent complexe, longue et onéreuse. De plus, cette approche originale permet au patient d'en comprendre le cheminement de façon plus aisée et d'accorder plus volontiers sa confiance à son praticien.

Ce concept renvoie également une **image valorisante** du cabinet dentaire ainsi que du travail effectué par le praticien (16).

L'IAO constitue par ailleurs un outil de communication majeur avec le laboratoire de prothèse équipé de cette nouvelle technologie (8). Le technicien de laboratoire peut en effet visualiser la position des implants planifiés et mieux comprendre les enjeux de la restauration prothétique à venir.

Le couplage de l'empreinte optique au cone beam (*Cerec meets Galileos*) mise sur cette approche interactive et dynamique orientée vers la **communication** patient/praticien/assistante mais aussi praticien/prothésiste dentaire (6).

2.5. L'ouverture à de nouvelles possibilités prothétiques

Si l'introduction de la CFAO en implantologie a permis de résoudre le problème du transfert fiable et précis des données de la planification virtuelle réalisée sur logiciel d'IAO au niveau du site chirurgical, elle a aujourd'hui pour dessein d'en bouleverser l'approche d'un point de vue prothétique.

L'objectif ici n'est pas de développer l'ensemble des possibilités nouvelles offertes par la CFAO en implantologie lors de la phase prothétique, mais plutôt d'en préciser les destinations et intérêts dans le prolongement d'une simulation informatique.

2.5.1. Réalisation d'une prothèse provisoire ou d'usage en pré-implantaire

→ cf. II.3.4.

2.5.2. Intégration de l’empreinte optique à la phase prothétique



Figure 40 : L’empreinte optique, un véritable outil de communication à la disposition du praticien au cours des différentes phases de la thérapeutique implantaire.

(Cerec meets Galileos)

2.5.2.1. Couronnes supra-implantaires réalisées au fauteuil par CFAO

D’abord réservée aux restaurations supra-dentaires, la CFAO s’est ensuite largement étendue aux réhabilitations conjointes implanto-portées (62), notamment grâce à la mise au point de biomatériaux répondant aux propriétés physiques et mécaniques recherchées en implantologie (63), (14).

La CFAO permet aujourd’hui de réaliser des **couronnes supra-implantaires tout céramique** de haute qualité sur piliers titane ou céramique en une seule visite au fauteuil grâce à l’empreinte optique (64).

→ Il est alors possible d’exploiter les données de la planification virtuelle (cf. modélisation du projet prothétique au stade de la simulation) lors de la phase prothétique.

Elle autorise également la fabrication de piliers implantaires céramiques personnalisés.

♦ Perspective : Fabrication d’un pilier implantaire personnalisé en céramique et de sa couronne au fauteuil en une seule visite (cf. étude *in vitro* (65)).

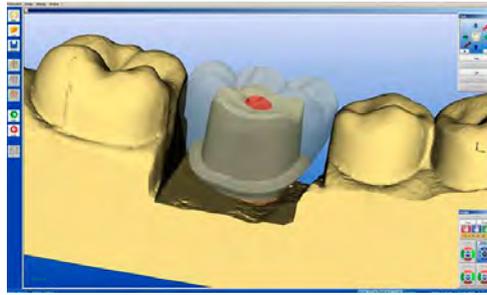


Figure 41 : Capture d'écran illustrant la modélisation virtuelle d'un pilier implantaire personnalisé « sur mesure » et de sa couronne tout céramique au niveau d'une première molaire mandibulaire via le système Cerec au fauteuil.

2.5.2.2. Les piliers personnalisés

Les progrès de la CFAO autorisent aujourd'hui la fabrication assistée par ordinateur de **piliers implantaires personnalisés** à partir d'une empreinte optique intra-buccale directe (66). Ce type de parties secondaires présente la particularité d'être intimement adapté aux tissus mous péri-implantaires ainsi qu'au profil d'émergence de l'implant, permettant alors de répondre plus favorablement aux impératifs esthétiques (notamment en secteur antérieur) que des piliers standards (65).

Deux protocoles d'empreinte ont été mis au point pour obtenir ce type de supra-structures usinées en zircone ou en titane :

1) La technique des « scanbodies »

Un « corps de scannage » préfabriqué sert de **transfert** durant l'empreinte optique puis la FAO du pilier personnalisé et de sa couronne est réalisée au laboratoire de prothèse.



Figure 42 : Photographie du kit d'empreinte optique de Sirona représentant son corps de scannage (« scanbody »).

2) La technique par indexation des vis de cicatrisation Encode

Une vis de cicatrisation particulière est mise en place directement après la chirurgie et servira à la FAO du pilier implantaire personnalisé après empreinte optique du « codage » présent sur cette dernière.



Figure 43 : Image représentant une vis de cicatrisation Encode ainsi que le pilier personnalisé conçu à partir de l'empreinte optique de l'indexation présente sur celle-ci (Biomet 3I).

Ce type de pilier présente l'avantage de conférer aux restaurations antérieures une adaptation marginale précise tout en simplifiant les étapes thérapeutiques et en améliorant le confort du patient. Il a également le mérite d'introduire de nouveaux matériaux biocompatibles en implantologie comme la zircone (car faisant intervenir un procédé d'usinage). Cependant, des études complémentaires sont encore nécessaires afin de valider ces protocoles d'empreinte optique innovants (66).

3. LIMITES ET PERSPECTIVES DE L'IAO

Dans le souci d'être le plus complet possible, nous clôturerons ce travail en précisant les principales limites relatives aux systèmes associés à l'IAO ainsi que les perspectives qui peuvent être attendues à l'avenir au vu de celles-ci.

3.1. Aspects pratiques : logistique et coûts

Si l'introduction d'une nouvelle technologie génère des avantages certains, elle s'accompagne en retour de coûts supplémentaires ainsi que de difficultés spécifiques. L'objectif ici est d'aborder les contraintes logistiques et aspects financiers de ce concept, critères par ailleurs peu renseignés dans la littérature.

3.1.1. Logistique : les diverses étapes de l'IAO

Ces contraintes se répartissent au travers des **10 étapes** menant classiquement au terme du traitement en IAO (13).

- 1) Confection du guide radiologique : exigence de l'IAO impliquant temps et coût ;
- 2) Examen radiologique : il ne constitue pas une contrainte propre à ce concept ;
- 3) Simulation à l'aide du logiciel et télé-envoi du projet par internet : implique du temps ;
- 4) Envoi du modèle en plâtre à l'usine : indispensable si le guide est à appui dentaire (sauf avec le système Cerec) ;
- 5) Vérification à l'usine de la conformité de la simulation et du modèle en plâtre ;
- 6) Confirmation : un délai de fabrication du guide chirurgical d'environ **10 jours** est ensuite nécessaire ;
- 7) Renvoi du guide chirurgical, du modèle en plâtre et de la feuille de route ;
- 8) Essayage en bouche du guide : s'assurer une fois de plus que l'ouverture buccale est compatible avec la pose des implants ;
- 9) Confection de l'éventuelle prothèse avant la chirurgie ;
- 10) Chirurgie +/- pose de la prothèse immédiate.

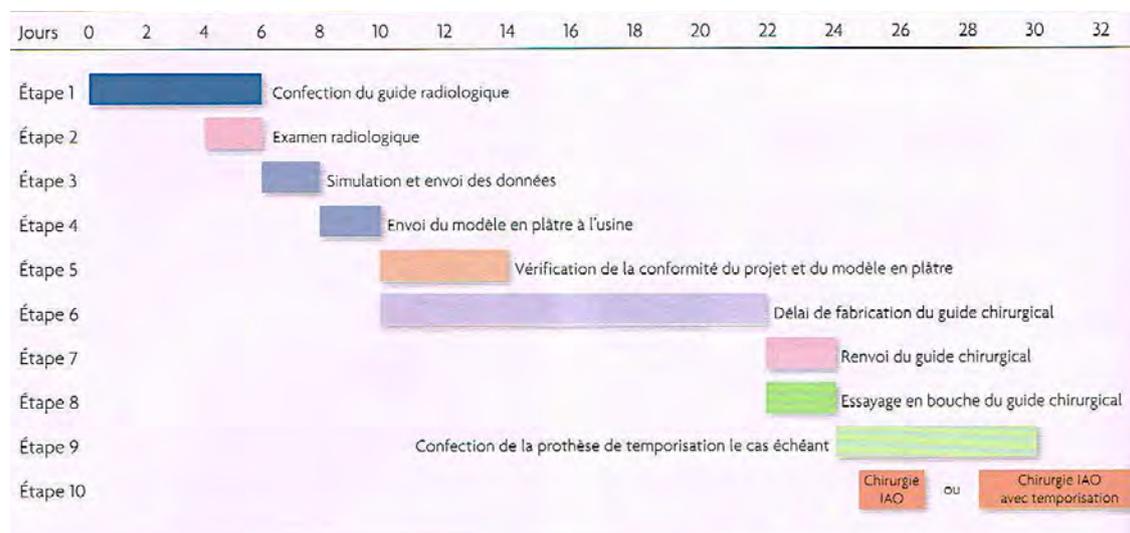


Figure 44 : Diagramme de PERT des étapes de l'IAO.

La séquence de déroulement des 10 étapes est détaillée. La chirurgie s'effectue soit immédiatement après réception du guide chirurgical, soit lorsque la prothèse est prête.

♦ Remarque : Le système intégré de Sirona représente une simplification d'un point de vue logistique en diminuant le nombre d'étapes et en les centralisant au niveau du cabinet dentaire.

On comprend donc que le concept d'implantologie assistée par ordinateur implique des efforts logistiques certains qui peuvent freiner de nombreux praticiens et représenter une **limite** à la mise en jeu de cette thérapeutique exigeante (37), d'où l'introduction de nouveaux systèmes simplifiant l'ensemble de la chaîne thérapeutique menant à une chirurgie guidée (6).

3.1.2. La question de la balance bénéfice/coût

Cette intrigue faisant largement débat aujourd'hui apparaît particulièrement difficile à résoudre en l'absence de données concrètes relatives à ce sujet motivant des études complémentaires (45). Afin de nous faire notre propre opinion sur la question, nous considérerons le coût supplémentaire représenté par les 2 étapes princeps différant d'une thérapeutique implantaire conventionnelle, à savoir : 1) la planification virtuelle à l'aide du logiciel d'IAO puis 2) l'élaboration du guide chirurgical stéréolithographique en découlant.

1. Simulation à l'aide du logiciel d'IAO

Le logiciel implique un investissement initial allant de **4 500 à 8 000 €** en plus de la boîte d'instruments de chirurgie (13). Il est cependant important de noter que si le temps passé à l'étude de cas et à la planification est important, il permet ensuite une intervention plus simple et plus rapide par rapport à une procédure classique.

2. Coût du guide chirurgical

Le coût d'un guide chirurgical pour un implant unitaire est d'environ **360 €** auxquels se rajoutent **80 €** par implant supplémentaire (13). Donc pour un édenté complet recevant 8 implants, le coût s'élève à environ 920 €.

❖ Cas particulier de la navigation chirurgicale : investissement initial **extrêmement élevé** d'environ 80 000 €.

Le recours à l'IAO implique donc un investissement initial relativement lourd pour le praticien qui s'équipe de cette nouvelle technologie (logiciel, accastillage spécifique, etc.) (8). Ces systèmes d'aide semblent de ce fait actuellement plus accessibles et destinés aux cabinets dentaires particulièrement orientés vers la pratique clinique quotidienne de l'implantologie, notamment dans la gestion de cas complexes faisant intervenir des enjeux esthétiques et de confort majeurs (51).

Par ailleurs, du côté du patient cette fois-ci, on comprend que le coût supplémentaire non négligeable représenté par la réalisation d'un guide chirurgical usiné (ou par l'utilisation de la navigation chirurgicale) sera répercuté sur un devis souvent déjà considéré comme « chargé » lors d'une thérapeutique implantaire faisant intervenir un protocole classique (8).

Les contraintes financières inhérentes à la mise en jeu de l'IAO freinent aujourd'hui son développement en cabinet dentaire. De plus, ce concept attirant la curiosité de nombreux praticiens a encore beaucoup de preuves à faire afin de défendre ses intérêts et indications sur la scène scientifique, avant d'être plus largement approuvé (53).

3.2. Courbe d'apprentissage en IAO

L'ensemble des publications relatives à l'IAO s'accorde sur le fait que ce concept fait intervenir une courbe d'apprentissage inéluctable tendant à améliorer la maîtrise de la chirurgie guidée (58). Le praticien doit en effet apprendre à se familiariser avec les logiciels ainsi qu'avec les instruments de la trousse chirurgicale, ce qui implique efforts et entraînement (8). Les éléments de la logistique doivent également être progressivement appréhendés avant de relever d'une simple logique (13).

Il convient cependant de rappeler que l'opérateur doit savoir à tout moment **reprendre la main** sur la technologie.

3.3. Complications et échecs de la chirurgie guidée

À l'instar de toute nouvelle technologie, des complications et échecs ne peuvent être évités lors de la chirurgie en IAO. Ils sont en général liés aux problèmes de précision des systèmes, aux erreurs de simulation ainsi qu'aux incidents per-opérateurs (13).

3.3.1. Rappel sur la précision de la chirurgie assistée par ordinateur

La chirurgie guidée proprement dite ne s'effectue qu'au terme d'une série d'opérations techniques (cf. « *chaîne* »). Chacune d'elles est inévitablement liée à des approximations et à des erreurs par rapport à la réalité clinique. Le cumul de ces erreurs a été passé en revue et se traduit cliniquement par les mesures des déviations linéaires et angulaires décrites dans le chapitre correspondant.

En valeur absolue, ces valeurs peuvent sembler importantes car un écart de **1 à 1,5 mm** est suffisant pour passer d'un positionnement implantaire satisfaisant à une implantation problématique. Cependant, il convient de rappeler que ces variations sont moindres que celles obtenues avec une thérapeutique classique (50).

3.3.2. Erreurs lors de la planification

Des erreurs de simulation peuvent avoir lieu, notamment durant la phase d'apprentissage. Elles peuvent alors se traduire par un positionnement implantaire inadéquat avec d'éventuelles implications prothétiques. Ce type d'erreur peut rapidement mener à une **complication** lors de la **chirurgie** guidée.

Il faut donc parfois savoir reprendre la main sur le guide chirurgical et terminer manuellement l'intervention en cas de doute ou d'incident per-opératoire (13).

3.3.3. Complications per-opératoires

Une méta-analyse portant sur 428 patients fait état de multiples **complications** dont la fréquence est variable (50) :

- 1) La complication la plus courante est liée aux difficultés d'accès dans les secteurs postérieurs ;
- 2) Chez 8 patients, les implants n'ont pas pu être posés car ils ont nécessité une greffe osseuse préalable ;
- 3) Une fenestration a été observée chez 3 patients ; le même nombre de patients a été concerné par une fracture du guide chirurgical.

| Nature de la complication | Nombre de patients | Distribution des complications (%) | Patients (%) |
|-----------------------------------|--------------------|------------------------------------|--------------|
| Accès insuffisant | 10 | 25,6 | 2,3 |
| Greffe osseuse nécessaire | 8 | 20,5 | 1,9 |
| Fenestration | 3 | 7,7 | 0,7 |
| Fracture du guide chirurgical | 3 | 7,7 | 0,7 |
| Manque de stabilité primaire | 1 | 2,6 | 0,2 |
| Insertion d'implant plus large | 2 | 5,1 | 0,5 |
| Insertion d'implant plus court | 1 | 2,6 | 0,2 |
| Insertion d'implant moins large | 1 | 2,6 | 0,2 |
| Impossibilité de placer l'implant | 1 | 2,6 | 0,2 |
| Infection des sites forés | 3 | 7,7 | 0,7 |
| Sinusite aigue | 2 | 5,1 | 0,5 |
| Fistule marginale | 1 | 2,6 | 0,2 |
| Fistule bucco-sinusienne | 1 | 2,6 | 0,2 |
| Douleurs prolongées | 1 | 2,6 | 0,2 |
| Défaut gingival | 1 | 2,6 | 0,2 |
| Total | 39 | 100 | 9,1 |

Figure 45 : Tableau synthétisant les complications de la chirurgie guidée et leur fréquence* d'après Schneider et coll. 2009.

* Les incidents ont été classés en fonction de la nature de la complication. Les incidents infectieux ont été classés à part. La complication la plus fréquente est liée au manque d'accès (25,6 % de l'ensemble des complications), suivie des incidents en relation avec les déviations entre simulation et réalité clinique (20,5 % et 7,7 % de l'ensemble des complications).

D'après le Dalai Lama, « *Si vous perdez, ne perdez pas la leçon* ». De même que dans tout autre type de traitement, complications et échecs semblent inéluctables durant la phase d'apprentissage de la chirurgie guidée. Il convient de chercher à les analyser, les comprendre mais aussi les partager afin d'améliorer la fiabilité de nos thérapeutiques. Ces erreurs seront ensuite minimisées avec le temps et aisément gérées. Il faut également veiller à tenir compte de la précision des systèmes impliqués afin de considérer ce paramètre important lors de l'évaluation du cas et prévenir ces complications, qui ne retirent rien à la pertinence ainsi qu'aux bénéfices portés par le concept d'implantologie assistée par ordinateur.

3.4. Perspectives en IAO

De nombreux systèmes se bousculent aujourd'hui sur le marché et peuvent être regroupés selon 2 catégories principales : 1) les systèmes dits passifs (*robotique semi-active*) et 2) ceux associés à la navigation chirurgicale (*robotique passive*).

Nous avons tenté, au fil cet exposé aspirant à être le plus clair et concis possible, d'en exposer les particularités et intérêts à travers les différentes approches développées ainsi que leurs aboutissements d'un point de vue chirurgical mais aussi prothétique.

Il est à noter que si chacun de ces systèmes présente des atouts certains, il s'accompagne par ailleurs de points négatifs. En définitive, aucun de ces outils n'est « parfait » à l'heure actuelle et une nette amélioration de ces nouvelles technologies est attendue avant de gagner plus largement nos cabinets.

Il conviendra donc, en guise de discussion et à la lumière de ce qui a été dit tout au long de ce travail, de tenter de dessiner le système idéal que l'on peut attendre dans le futur en IAO.

3.4.1. À propos du couplage CBCT/empreinte optique : perspectives

L'empreinte optique, objet de communication en plein essor au sein de nos cabinets dentaires, pourrait bel et bien s'imposer comme un outil de choix dans l'avenir de l'IAO. Cependant, les indications du seul système intégré disponible sur le marché restent à ce jour et à notre sens trop limitées pour prétendre présenter un véritable intérêt lors de la planification implantaire. De plus, le peu d'études relatives à la précision de ce système publiées dans la littérature à l'heure actuelle dénote un recul clinique insuffisant.

3.4.1.1. Élargir les indications à des édentements plus étendus

Les cas d'implantologie « simples » sont en effet aisés à gérer de manière conventionnelle. L'IAO ne constitue donc pas une indication majeure dans la plupart des édentements de faible étendue auxquels est réservé ce système à l'heure actuelle.

→ Il serait en ce sens intéressant de généraliser son utilisation à tout type d'édentement pour qu'il présente un véritable intérêt.

3.4.1.2. Usiner le guide chirurgical au cabinet

L'usinage se fait actuellement en centres, avec pour perspective sa réalisation en cabinet dans un futur proche (cf. *Cerec Guide*).

→ Ceci impliquerait alors une simplification logistique majeure.

3.4.1.3. Vers une autonomie accrue du praticien : gestion intégrale de la thérapeutique implantaire en cabinet

L'intégration de l'empreinte optique aux phases diagnostiques et thérapeutiques ouvre la voie à la **prise en charge intégrale** d'un cas implantaire **au fauteuil** grâce à la CFAO.

→ Le système d'IAO de demain tendrait alors vers une autonomie accrue du praticien.

3.4.2. Vers une chirurgie entièrement robotisée ?

La **robotique active**, dans laquelle le robot se substitue complètement au praticien et réalise lui-même l'intervention, soit à partir d'une programmation pré-opératoire soit par pilotage extemporané de l'opérateur, n'est pas pour l'instant utilisée en implantologie mais pourrait également représenter l'avenir de cette discipline (39).

L'idée serait alors de développer et d'améliorer les systèmes existants en incorporant dans le futur les bénéfices de chacun afin d'aboutir à un protocole entièrement robotisé ne nécessitant aucune intervention manuelle (8) ; à l'image de ce qui se fait en médecine aujourd'hui.

Les robots ont en ce sens fait une entrée remarquée en **chirurgie orthopédique**, notamment en matière de chirurgie de la hanche et du genou. Ils ont pour vocation d'apporter précision, fiabilité et possibilité de simulation à une chirurgie présentant par ailleurs un caractère moins invasif qu'au cours d'une intervention « manuelle » (67).

→ La chirurgie assistée par ordinateur répond donc aux mêmes objectifs qu'en implantologie en mettant en jeu un protocole superposable à celui de l'implantologie assistée par ordinateur en terme de planification.

L'assistance robotique pour la mise en place de prothèse articulaire fait ici intervenir un système disposant d'une console de planification permettant la **modélisation** du creusement du lit osseux de l'implant. Cette modélisation 3D s'effectue à partir de l'importation d'images d'un **scanner** de l'articulation concernée et d'une **bibliothèque** de prothèse articulaire.

Elle est ensuite **transférée** sur l'ordinateur du robot en salle d'opération, lequel réalise le creusement automatique du lit implantaire selon le pré-planning (68).

Les nombreuses interventions réalisées en chirurgie orthopédique confirment la fiabilité ainsi que la précision de ce système. Cependant, il reste à en évaluer le bénéfice à long terme afin d'en justifier le surcoût.

De plus, malgré le potentiel que l'on pressent de cette nouvelle technologie, il existe encore de nombreux obstacles à un large usage de la robotique médico-chirurgicale à ce jour.

Des travaux centrés sur le praticien et visant à repousser ces limites sont actuellement en cours (69).

Conclusion

Les **clés du succès en implantologie** reposent sur un diagnostic précis couplé à une planification implantaire rigoureuse basée sur un **projet prothétique** s'imposant comme le véritable fil directeur de l'ensemble de la thérapeutique. Le but de la chirurgie guidée est le transfert précis à chaque étape d'un concept occluso-prothétique défini dès la phase initiale de traitement. Toute la prévisibilité du traitement repose alors sur sa fiabilité.

Le concept d'implantologie assistée par ordinateur fusionne aujourd'hui l'ensemble de ces paramètres pointus afin d'y répondre avec **précision**. Il résulte des dispositifs de transfert de cette planification virtuelle un positionnement implantaire tridimensionnel **amélioré** au niveau du site chirurgical en comparaison avec une thérapeutique conventionnelle.

L'utilisation d'une planification implantaire plus élaborée permet au praticien de diminuer les risques d'atteintes iatrogènes au cours de la chirurgie ainsi que de répondre avec plus de prédictibilité aux **impératifs** esthétiques, fonctionnels mais aussi de confort grandissants chez nos patients. Sa principale richesse est de contribuer à l'élaboration d'une solution individualisée pour chacun d'eux.

Ce concept à la fois séduisant et innovant nous semble donc particulièrement intéressant et bénéfique dans la gestion de **cas complexes** en implantologie, plus particulièrement pour le praticien débutant malgré les nombreuses controverses et interrogations qu'il soulève à l'heure actuelle. Ces nouvelles technologies laissent par ailleurs entrevoir une **nouvelle approche de l'implantologie** d'un point de vue chirurgical mais également prothétique.

Elles encouragent en effet le recours à des chirurgies moins invasives et se présentent d'autre part comme de véritables alternatives aux greffes osseuses.

Les possibilités prothétiques offertes par ce concept sont également attractives et particulièrement axées vers le souci de **confort** du patient, allant de pair avec celui du praticien. En autorisant la réalisation d'une prothèse avant même que la chirurgie implantaire n'ait eu lieu afin d'effectuer une mise en charge immédiate ainsi qu'à travers l'autonomie accrue que ces nouvelles technologies consacrent au praticien au fauteuil, elles vont alors dans le sens d'une réduction du temps global de traitement.

Cependant, l'IAO présente également des **limites** et **points négatifs** qu'il convient de considérer avant de se lancer dans ce type de thérapeutique exigeante présentant par ailleurs des contraintes logistiques et financières non négligeables.

Les données récentes de la littérature motivent en effet la réalisation d'études complémentaires ainsi que l'amélioration de ces systèmes d'aide au diagnostic et à la chirurgie, notamment en terme de précision. Des études à plus long terme incluant davantage de patients ainsi que le ratio bénéfice/coût sont aujourd'hui nécessaires afin de préciser les véritables **intérêts**, **indications** et **bénéfices** portés par ces nouvelles technologies prometteuses ; et ce à la lumière des thérapeutiques traditionnelles. Les résultats pourraient conduire au développement plus franc de ces systèmes d'aide révolutionnaires au sein de cabinets dentaires par ailleurs de plus en plus orientés vers l'utilisation d'**outils de communication numériques**.

Les avancées de la CFAO, couplées au développement de l'empreinte optique au sein de nos cabinets dentaires, devraient largement contribuer à faire de ces protocoles de traitement innovants des procédures « routinières » dans notre exercice clinique quotidien.

Le Président du Jury,

Le Directeur de Thèse,

« Persistent precision provides predictable prognosis ».

Per Ingvar Bränemark

Dès qu'il a commencé à communiquer sur ses travaux de recherche, Per Ingvar Bränemark n'a cessé de mettre en avant la règle des 5 P : « *Une précision constante conduit à un résultat prévisible* ».

Les systèmes associés au concept d'implantologie assistée par ordinateur ne représentent aujourd'hui que des outils au service de cette quête permanente d'amélioration de nos procédures cliniques. Leur emploi ne dispense donc pas des différentes étapes clés d'un traitement implantaire conventionnel.

Plus que tous les autres facteurs, l'**occlusion** représente l'élément capital du succès à longue échéance de ces traitements.

Bibliographie

1. Dada K, Daas M, Malo P. Esthétique et implants pour l'édenté complet maxillaire. Paris: Quintessence international; 2011.
2. Van der Zel JM. Implant planning and placement using optical scanning and cone beam CT technology. *J Prosthodont Off J Am Coll Prosthodont*. août 2008;17(6):476-481.
3. Martinez H, Renault P, Renault G. Les implants : chirurgie et prothèse choix thérapeutique stratégique. Rueil-Malmaison: Éd. CdP; 2008.
4. Emmanuel G, David A, Jérémy A, Alain A. Codes de la réussite en implantologie orale. Éd. Med'com; 2012.
5. Les traitements implantaire avec Nobelguide TM. Paris, France: Quintessence international; 2008. 236 p.
6. Bindl A, Ritter L, Mehl A. Digital 3-D implant planning: Cerec meets Galileos. *Int J Comput Dent*. 2010;13(3):221-231.
7. Worthington P, Rubenstein J, Hatcher DC. The role of cone-beam computed tomography in the planning and placement of implants. *J Am Dent Assoc* 1939. oct 2010;141 Suppl 3:19S-24S.
8. Azari A, Nikzad S. Computer-assisted implantology: historical background and potential outcomes-a review. *Int J Med Robot Comput Assist Surg MRCAS*. juin 2008;4(2):95-104.
9. Baudoin C-A, Bennani V, Touati B. Un projet prothétique en implantologie. Paris, France: Quintessence international; 2003. 133 p.
10. Seban A, Bonnaud P, Sixou M. Le bilan préopératoire à visée implantaire. Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson; 2009.
11. Adell R, Lekholm U, Rockler B, Brånemark P-I. A 15-year study of osseointegrated implants in the treatment of the edentulous jaw. *Int J Oral Surg*. janv 1981;10(6):387-416.

12. Ait-Ameur A, Decat V, Treil J, Campan P, Teillet M, Le Gac O et al. Nouveautés en implantologie: de l'aide au diagnostic à l'aide à la chirurgie (French). *Dent Implant News Help Diagn Help Surg Engl.* cover date 2009;90(5):624-633.
13. Szmukler-Moncler S, Davarpanah K, Davarpanah M. *Implantologie assistée par ordinateur.* Rueil-Malmaison: Éd. CdP; 2010.
14. Patel N. Integrating three-dimensional digital technologies for comprehensive implant dentistry. *J Am Dent Assoc* 1939. juin 2010;141 Suppl 2:20S-4S.
15. Van Assche N, Van Steenberghe D, Guerrero ME, Hirsch E, Schutyser F, Quirynen M et al. Accuracy of implant placement based on pre-surgical planning of three-dimensional cone-beam images : a pilot study (English). *J Clin Periodontol.* cover date 2007;34(9):816-821.
16. Ritter L, Neugebauer J, Dreiseidler T, Rothamel D, Cizek J, Karapetian VE, et al. 3D X-ray meets CAD/CAM dentistry: a novel procedure for virtual dental implant planning. *Int J Comput Dent.* 2009;12(1):29-40.
17. Avrampou M, Mericske-Stern R, Blatz MB, Katsoulis J. Virtual implant planning in the edentulous maxilla: criteria for decision making of prosthesis design. *Clin Oral Implants Res.* août 2013;24 Suppl A100:152-159.
18. Patrick M, Anne B-L, Isabelle K-G, Marc B. *Accéder à l'implantologie.* Éd. CdP; 2003.
19. Fouad K, Pierre K, P TD. *Greffe osseuse en implantologie.* Quintessence international; 2010.
20. Mithridade D, Serge S-M, Ph R, Christian V. *Manuel d'implantologie clinique.* Éd. CdP; 2012.
21. Marc B, Patrick M. *Les clés du succès en implantologie.* Editions CDP; 2009.
22. Calmès B de, Sauvigné T. *A propos d'un cas de planification implantaire avec Galiléos et Cerec.* Lyon, France; 2011. 23 p.
23. Voitik AJ. CT data and its CAD and CAM utility in implant planning: part I. *J Oral Implantol.* 2002;28(6):302-303.

24. Cavézian R, Pasquet G. Imagerie Cone Beam et implants. *Rev Stomatol Chir Maxillofac.* sept 2012;113(4):245-258.
25. Mupparapu M, Singer SR. Implant imaging for the dentist. *J Can Dent Assoc.* janv 2004;70(1):32.
26. Spinelli D, DE Vico G, Schiavetti R, Bonino M, Pozzi A, Bollero P, et al. Immediate loading of four implants (BTLock®) in the maxilla and provisional restoration with guide-surgery (SimPlant, Materialise®): case report. *ORAL Implantol.* avr 2010;3(2):10-19.
27. Armand S, Benque E-P. *La restauration unitaire antérieure en implantologie.* Paris, France; 2008. 108 p.
28. Hadi A. *Les greffes de sinus en implantologie.* Éd. CdP; 2011.
29. Alfred S, Patrick B. *Pratique clinique des greffes osseuses et implants.* Elsevier Masson; 2012.
30. Gupta J, Ali SP. Cone beam computed tomography in oral implants. *Natl J Maxillofac Surg.* 2013;4(1):2-6.
31. Nikzad S, Azari A, Ghassemzadeh A. Modified flapless dental implant surgery for planning treatment in a maxilla including sinus lift augmentation through use of virtual surgical planning and a 3-dimensional model. *J Oral Maxillofac Surg Off J Am Assoc Oral Maxillofac Surg.* sept 2010;68(9):2291-2298.
32. Dreiseidler T, Neugebauer J, Ritter L, Lingohr T, Rothamel D, Mischkowski RA, et al. Accuracy of a newly developed integrated system for dental implant planning. *Clin Oral Implants Res.* nov 2009;20(11):1191-1199.
33. Gérard A. *L'implantologie non enfouie.* Elsevier Masson; 2008.
34. Monsour PA, Dudhia R. Implant radiography and radiology. *Aust Dent J.* juin 2008;53 Suppl 1:S11-25.
35. Chrcanovic BR, Oliveira DR, Custódio AL. Accuracy evaluation of computed tomography-derived stereolithographic surgical guides in zygomatic implant placement in human cadavers. *J Oral Implantol.* 2010;36(5):345-355.

36. Almog DM, LaMar J, LaMar FR, LaMar F. Cone beam computerized tomography-based dental imaging for implant planning and surgical guidance, Part 1: Single implant in the mandibular molar region. *J Oral Implantol.* 2006;32(2):77-81.
37. Neugebauer J, Kistler F, Kistler S, Züdorf G, Freyer D, Ritter L, et al. CAD/CAM-produced surgical guides: Optimizing the treatment workflow. *Int J Comput Dent.* 2011;14(2):93-103.
38. Schillaci O, Simonetti G. Fusion imaging in nuclear medicine--applications of dual-modality systems in oncology. *Cancer Biother Radiopharm.* févr 2004;19(1):1-10.
39. Armand S, Legac O, Galibourg A. [Computer-aided implantology: Contribution of the Robodent(®) passive robotic system.]. *Rev Stomatol Chir Maxillo-Faciale Chir Orale.* 2 août 2013;
40. Ng FC, Ho KH, Wexler A. Computer-assisted navigational surgery enhances safety in dental implantology. *Ann Acad Med Singapore.* juin 2005;34(5):383-388.
41. Dandekeri SS, Sowmya MK, Bhandary S. Stereolithographic surgical template: a review. *J Clin Diagn Res JCDR.* sept 2013;7(9):2093-2095.
42. Turbush SK, Turkyilmaz I. Accuracy of three different types of stereolithographic surgical guide in implant placement: an in vitro study. *J Prosthet Dent.* sept 2012;108(3):181-188.
43. Fuster-Torres MA, Albalat-Estela S, Alcañiz-Raya M, Peñarrocha-Diago M. CAD / CAM dental systems in implant dentistry: update. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal.* mars 2009;14(3):E141-145.
44. Frisardi G, Chessa G, Barone S, Paoli A, Razionale A, Frisardi F. Integration of 3D anatomical data obtained by CT imaging and 3D optical scanning for computer aided implant surgery. *BMC Med Imaging.* 2011;11:5.
45. Hultin M, Svensson KG, Trulsson M. Clinical advantages of computer-guided implant placement: a systematic review. *Clin Oral Implants Res.* oct 2012;23 Suppl 6:124-135.
46. Nickenig H-J, Eitner S. An alternative method to match planned and achieved positions of implants, after virtual planning using cone-beam CT data and surgical guide templates - A method reducing patient radiation exposure (part I) (English). *J Cranio-Maxillo-Fac Surg.* cover date 2010;38(6):436-440.

47. Nickenig H-J, Eitner S. Reliability of implant placement after virtual planning of implant positions using cone beam CT data and surgical (guide) templates (English). *J Cranio-Maxillo-Fac Surg.* cover date 2007;35(4-5):207-211.
48. Van Assche N, Vercruyssen M, Coucke W, Teughels W, Jacobs R, Quirynen M. Accuracy of computer-aided implant placement. *Clin Oral Implants Res.* oct 2012;23 Suppl 6:112-123.
49. Nickenig H-J, Wichmann M, Hamel J, Schlegel KA, Eitner S. Evaluation of the difference in accuracy between implant placement by virtual planning data and surgical guide templates versus the conventional free-hand method — a combined in vivo — in vitro technique using cone-beam CT (Part II) (English). *J Cranio-Maxillo-Fac Surg.* cover date 2010;38(7):488-493.
50. Schneider D, Marquardt P, Zwahlen M, Jung RE. A systematic review on the accuracy and the clinical outcome of computer-guided template-based implant dentistry. *Clin Oral Implants Res.* sept 2009;20 Suppl 4:73-86.
51. Sarment DP, Sukovic P, Clinthorne N. Accuracy of implant placement with a stereolithographic surgical guide. *Int J Oral Maxillofac Implants.* août 2003;18(4):571-577.
52. Di Giacomo GAP, Cury PR, de Araujo NS, Sendyk WR, Sendyk CL. Clinical application of stereolithographic surgical guides for implant placement: preliminary results. *J Periodontol.* avr 2005;76(4):503-507.
53. Azari A, Nikzad S. Flapless implant surgery: review of the literature and report of 2 cases with computer-guided surgical approach. *J Oral Maxillofac Surg Off J Am Assoc Oral Maxillofac Surg.* mai 2008;66(5):1015-1021.
54. Ochi M, Kanazawa M, Sato D, Kasugai S, Hirano S, Minakuchi S. Factors affecting accuracy of implant placement with mucosa-supported stereolithographic surgical guides in edentulous mandibles. *Comput Biol Med.* nov 2013;43(11):1653-1660.
55. Nikzad S, Azari A. Custom-made radiographic template, computed tomography, and computer-assisted flapless surgery for treatment planning in partial edentulous patients: a prospective 12-month study. *J Oral Maxillofac Surg Off J Am Assoc Oral Maxillofac Surg.* juin 2010;68(6):1353-1359.

56. Nikzad S, Azari A. Computer-assisted implant surgery; a flapless surgical/immediate loaded approach with 1 year follow-up. *Int J Med Robot Comput Assist Surg MRCAS*. déc 2008;4(4):348-354.
57. Rousseau P. Flapless and traditional dental implant surgery: an open, retrospective comparative study. *J Oral Maxillofac Surg Off J Am Assoc Oral Maxillofac Surg*. sept 2010;68(9):2299-2306.
58. Amorfini L, Storelli S, Romeo E. Rehabilitation of a dentate mandible requiring a full arch rehabilitation. Immediate loading of a fixed complete denture on 8 implants placed with a bone-supported surgical computer-planned guide: a case report. *J Oral Implantol*. mars 2011;37 Spec No:106-113.
59. Allum SR. Immediately loaded full-arch provisional implant restorations using CAD/CAM and guided placement: maxillary and mandibular case reports. *Br Dent J*. 12 avr 2008;204(7):377-381.
60. Brief J, Edinger D, Hassfeld S, Eggers G. Accuracy of image-guided implantology. *Clin Oral Implants Res*. août 2005;16(4):495-501.
61. Philippe P. L'éthique en médecine bucco-dentaire. *Espace ID*; 2012.
62. Fasbinder DJ. The CEREC system: 25 years of chairside CAD/CAM dentistry. *J Am Dent Assoc* 1939. juin 2010;141 Suppl 2:3S-4S.
63. Fasbinder DJ, Dennison JB, Heys D, Neiva G. A Clinical Evaluation of Chairside Lithium Disilicate CAD/CAM Crowns A Two-Year Report. *J Am Dent Assoc*. 6 janv 2010;141(suppl 2):10S-14S.
64. Fasbinder DJ. Clinical performance of chairside CAD/CAM restorations. *J Am Dent Assoc*. 9 janv 2006;137(suppl 1):22S-31S.
65. Alfarsi MA, Okutan HM, Bickel M. CAD/CAM to fabricate ceramic implant abutments and crowns: a preliminary in vitro study. *Aust Dent J*. mars 2009;54(1):12-16.
66. Rolland N. Empreinte optique intra-orale sur implant pour la réalisation d'un pilier implantaire personnalisé [Internet] [exercice]. Université Toulouse III - Paul Sabatier; 2014 [cité 8 mai 2014]. Disponible sur: <http://thesesante.ups-tlse.fr/379/>

67. Troccaz J. Quel avenir pour les robots ? [Httpswww-Em--Prem-Comdocadisups-Tlsefrdatarevues003510400088SUP51S942](https://www-em--prem-comdocadisups-tlse.fr/data/revues/003510400088SUP51S942) [Internet]. 16 avr 2008 [cité 11 mai 2014];
68. Aubart F. Application de la robotique active a la hanche et au genou. *J Radiol.* sept 2004;85(9):1412.
69. Aubert N, Rochais Y. Recherche et robotique médicale. *IRBM News.* déc 2007;28(5-6):33-40.

Table des illustrations

Figure 1 : Tableau synthétisant les principaux facteurs positifs et négatifs en prothèse fixée implanto-portée.

Dada K, Daas M, Malo P. Esthétique et implants pour l'édenté complet maxillaire. Paris : Quintessence international ; 2011.

Figure 2 : Photographies représentant la phase préparatoire chez l'édenté total maxillaire.

Les traitements implantaire avec Nobelguide TM. Paris, France : Quintessence international ; 2008.

Figure 3 : Photographie illustrant la préparation d'un wax up des dents manquantes au niveau des sites de 14, 15, 16, 23 et recouvrant le palais.

<http://www.les-implants-dentaires.com/implants-videos/index.htm>

Figure 4 : Image illustrant la modélisation de la future restauration prothétique supra-implantaire envisagée en site de 15 grâce à la fonction de wax up virtuel du système Cerec après empreinte optique du site édenté correspondant.

<http://www.sirona.fr/fr/produits/themes/implantologie-intgre/>

Figure 5 : Image illustrant la fusion du projet prothétique numérique en site de 15 aux données issues de l'imagerie tridimensionnelle CBCT pour une planification implantaire dynamique et interactive personnalisée.

<http://www.sirona.fr/fr/produits/themes/implantologie-intgre/>

Figure 6 : Photographie représentant la vue occlusale d'un guide radiologique essayé en bouche, duplicata d'une prothèse amovible résine restaurant le bloc incisif maxillaire.

Szmukler-Moncler S, Davarpanah K, Davarpanah M. Implantologie assistée par ordinateur. Rueil-Malmaison : Éd. CdP ; 2010.

Figure 7 : Image illustrant le gradient de densité osseuse, d'après Albrektsson et Zarb (1989).

Dada K, Daas M, Malo P. Esthétique et implants pour l'édenté complet maxillaire. Paris : Quintessence international ; 2011.

Figure 8 : Capture d'écran illustrant l'accès visuel simultané aux différents plans offerts par le logiciel SimPlant®.

<http://www.les-implants-dentaires.com/implants-multimedia/iao/implantologie-assistee-par-ordinateur.htm>

Figure 9 : Capture d'écran démontrant le tracé du parcours du nerf alvéolaire inférieur sur une vue axiale ainsi que son apparition sur l'ensemble des plans permettant une appréciation globale de la zone à implanter en secteur 3 (logiciel SimPlant®).

<http://www.les-implants-dentaires.com/implants-multimedia/iao/implantologie-assistee-par-ordinateur.htm#implantologie-5>

Figure 10 : Agrandissement d'une coupe transversale appelée à recevoir la simulation implantaire dans le cas d'un édentement unitaire antérieur en site de 11.

Szmukler-Moncler S, Davarpanah K, Davarpanah M. Implantologie assistée par ordinateur. Rueil-Malmaison : Éd. CdP ; 2010.

Figure 11 : Capture d'écran de la simulation de la pose d'implant sur une coupe oblique en site de 11.

Szmukler-Moncler S, Davarpanah K, Davarpanah M. Implantologie assistée par ordinateur. Rueil-Malmaison : Éd. CdP ; 2010.

Figure 12 : Photographie représentant un guide d'imagerie NobelGuide™.

Les traitements implantaires avec Nobelguide TM. Paris, France : Quintessence international ; 2008.

Figure 13 : Image illustrant la planification implantaire virtuelle de l'intervention chirurgicale (logiciel Procera®).

<http://www.davinci-dental.com/dental-implants/teeth-in-an-hour/>

Figure 14 : Capture d'écran de la planification implantaire numérique au niveau du site de 36 sur le logiciel Galileos Galaxis après superposition de l'acquisition radiologique CBCT au projet prothétique modélisé virtuellement (couronne unitaire supra-implantaire).

<http://www.sirona.fr/fr/produits/systemes-dimagerie/galileos-implant/>

Figure 15 : Photographie du cone beam GALILEOS.

<http://www.sirona3d.com/>

Figure 16 : Photographie représentant l'empreinte optique endo buccale avec la caméra optique du système Cerec.

<http://www.sirona.com/en/products/topics/integrated-implantology-cmg/>

Figure 17 : Image représentant l'intérêt de fusionner les données CBCT/Cerec en vue de réaliser une planification implantaire prothétique et chirurgicale sur mesure en site de 45.

<http://northsidedentalofnewnan.wordpress.com/2012/06/15/introducing-galileos-3d-digital-dentistry/>

Figure 18 : Image représentant un guide chirurgical stéréolithographique à appui dentaire élaboré à partir d'une planification implantaire virtuelle en centre d'usinage (SICAT).

<http://www.sirona.fr/fr/produits/themes/implantologie-intgre/>

Figure 19 : Photographie représentant une gouttière radiologique réalisée de manière traditionnelle à partir du duplicata du projet prothétique défini et solidarisée à son arc de navigation dans le cadre de la planification d'implants latéraux maxillaires.

<http://www.blog66.com/Robodent/Article-Implants-Lat%C3%A9raux-Maxillaire--1,179.html>

Figure 20 : Schéma illustrant le principe de prototypage rapide.

<http://www.univ-reims.fr/formation/ufr-instituts-et-ecoles/institut-de-formation-technique-superieur-ifts/presentation/materiel-et-machines/prototypage-rapide/stereolithographie>

Figure 21 : CAO et FAO d'un guide chirurgical stéréolithographique maxillaire à appui muqueux à partir d'une planification numérique basée sur un projet prothétique.

<http://www.isi-clinique.com/traitements/tech.informatique.html>

Figure 22 : Image représentant un guide chirurgical stéréolithographique à appui dentaire élaboré par usinage soustractif en cabinet à partir d'un bloc de matière en plexiglas.

Brochure Sirona « *Successful implantation in the computer-aided practice: CEREC meets GALILEOS* ».

Figure 23 : Photographie illustrant la transformation du guide radiologique en guide chirurgical après transfert des coordonnées spatiales de chacun des implants simulés sur logiciel d'IAO.

Nickenig, Eitner : An alternative method to match planned and achieved positions of implants, after virtual planning using cone-beam CT data and surgical guide templates - A method reducing patient radiation exposure (part I) (English). J Cranio-Maxillo-Fac Surg. Cover date 2010 ; 38(6) : 436-440.

Figure 24 : Photographie représentant les premiers guides chirurgicaux utilisés en IAO.

Szmukler-Moncler S, Davarpanah K, Davarpanah M. Implantologie assistée par ordinateur. Rueil-Malmaison : Éd. CdP ; 2010.

Figure 25 : Image illustrant le détail des diamètres des forets accueillis par chaque cuillère avec leurs œillets respectifs pour le système de chirurgie guidée AtlaSurgery® de chez Biotech®, compatible avec le logiciel SimPlant®.

<http://www.implants.fr/chirurgie-guidee-atlasurgery.asp>

Figure 26 : Image illustrant la précision lors du forage dans le sens vertical : la butée du foret arrive sur le plat de l'œillet de la cuillère et empêche le forage au-delà de ce qui a été prévu lors de la simulation informatique.

<http://www.straumann.ca/fr/professionals/produits-et-solutions/solutions-numeriques/chirurgie-guidee/les-solutions-produit.html>

Figure 27 : Schéma illustrant la direction des déviations mesurées dans les études évaluant la précision de l'IAO.

Schneider D, Marquardt P, Zwahlen M, Jung RE. A systematic review on the accuracy and the clinical outcome of computer-guided template-based implant dentistry. Clin Oral Implants Res. Sept. 2009 ; 20 Suppl 4 : 73-86.

Figure 28 : Tableau synthétisant les mesures des déviations entre la réalité clinique et la simulation informatique en fonction du type de guide chirurgical utilisé.

Szmukler-Moncler S, Davarpanah K, Davarpanah M. Implantologie assistée par ordinateur. Rueil-Malmaison : Éd. CdP ; 2010.

Figure 29 : Image illustrant le principe de la robotique passive RoboDent® : triangulation des informations.

<http://www.robodent.de/page61/page65/page65.html>

Figures 30 et 31 : Photographies représentant le système de traceurs optiques lors de la chirurgie guidée RoboDent®.

<http://www.intechopen.com/books/implant-dentistry-a-rapidly-evolving-practice/dental-implant-imaging-how-ct-scan-became-a-help-to-surgery>

Figure 32 : Capture d'écran de la navigation chirurgicale.

<https://sites.google.com/site/logicieldentairegratuit/logiciel-de-planification-3d-robodent>

Figure 33 : Présentation d'un cas de chirurgie guidée sans lambeau chez l'édenté total maxillaire (Dr Davarpanah).

<http://www.les-implants-dentaires.com/implants-videos/edentement-complet-implantologie.htm>

Figure 34 : Intérêt de l'IAO dans la planification implantaire d'un cas de forte résorption osseuse : traitement d'un édentement partiel maxillaire de classe II division 1 selon le procédé NobelGuide®.

Les traitements implantaire avec Nobelguide TM. Paris, France : Quintessence international ; 2008.

Figure 35 : Photographie illustrant le traitement du guide chirurgical pour la réalisation du modèle de travail sur lequel la prothèse provisoire ou d'usage sera réalisée.

<http://www.oraldesign.fr>

Figure 36 : Image représentant un pilier compensateur permettant de pallier aux imprécisions de positionnement des implants dans le sens axial.

<http://www.medimatch.co.uk/dental-product/guided-abutment>

Figure 37 : Photographie illustrant la transformation du guide radiologique en guide chirurgical afin de transposer le projet prothétique au stade de la chirurgie.

<http://dento-reseau.com/posts/et-si-lesthetique-etait-posterieure>

Figure 38 : Tableau rapportant la précision obtenue avec une chirurgie conventionnelle.

Dada K, Daas M, Malo P. Esthétique et implants pour l'édenté complet maxillaire. Paris : Quintessence international ; 2011.

Figure 39 : Tableau rapportant la précision obtenue avec la chirurgie guidée.

Dada K, Daas M, Malo P. Esthétique et implants pour l'édenté complet maxillaire. Paris : Quintessence international ; 2011.

Figure 40 : L'empreinte optique, un véritable outil de communication à la disposition du praticien au cours des différentes phases de la thérapeutique implantaire.

http://www.hammasvaline.fi/tuotteet/laitteet_ja_kalusteet/digitaalinen_kuvantaminen/sirona_galileos

Figure 41 : Capture d'écran illustrant la modélisation virtuelle d'un pilier implantaire personnalisé « sur mesure » et de sa couronne tout céramique au niveau d'une première molaire mandibulaire via le système Cerec au fauteuil.

Brochure Sirona « *Successful implantation in the computer-aided practice : CEREC meets GALILEOS* ».

Figure 42 : Photographie du kit d'empreinte optique de Sirona représentant son corps de scannage (« scanbody »).

http://www.dentaltribune.com/articles/business/europe/1321_customized_implant_abutments_sirona_1_aunches_titanium_bases.html

Figure 43 : Image représentant une vis de cicatrisation Encode ainsi que le pilier personnalisé conçu à partir de l'empreinte optique de l'indexation présente sur celle-ci (Biomet 3I).

<http://biomet3i.fr>

Figure 44 : Diagramme de PERT des étapes de l'IAO.

Szmukler-Moncler S, Davarpanah K, Davarpanah M. Implantologie assistée par ordinateur. Rueil-Malmaison : Éd. CdP ; 2010.

Figure 45 : Tableau synthétisant les complications de la chirurgie guidée et leur fréquence* d'après Schneider et coll. 2009.

Szmukler-Moncler S, Davarpanah K, Davarpanah M. Implantologie assistée par ordinateur. Rueil-Malmaison : Éd. CdP ; 2010.

**PLANIFICATION IMPLANTAIRE PAR CFAO À PARTIR D'UN
PROJET PROTHÉTIQUE ET CHIRURGIE ASSISTÉE PAR
ORDINATEUR : ÉTAT DES LIEUX, AVANCÉES ET PERSPECTIVES.**

RÉSUMÉ EN FRANÇAIS :

L'intégration esthétique et fonctionnelle ainsi que la pérennité des réhabilitations prothétiques fixées implanto-portées reposent sur une planification implantaire prothétique et chirurgicale rigoureuse.

L'introduction de la CFAO en implantologie permet aujourd'hui de fusionner les données issues de l'imagerie tridimensionnelle à des logiciels de simulation performants afin d'améliorer la précision de cette étape cruciale, tout en lui conférant une fiabilité accrue.

Son transfert au niveau du site implantaire peut ensuite être effectué grâce à des guides chirurgicaux usinés ou encore via les outils associés à la navigation chirurgicale.

Il découle de ces systèmes innovants une nouvelle approche de l'implantologie allant notamment dans le sens de traitements moins invasifs particulièrement axés vers le souci de confort du patient, véritable acteur de son traitement.

La précision, les atouts, intérêts, limites et perspectives portés par le concept d'implantologie assistée par ordinateur sont discutés dans ce travail de synthèse articulé autour de différents systèmes d'aide au diagnostic et à la chirurgie implantaire.

TITRE EN ANGLAIS : CAD/CAM dental implant planning and computer-aided surgery based on a prosthetic project : update, innovations and prospects.

DISCIPLINE ADMINISTRATIVE : Chirurgie dentaire.

MOTS-CLÉS : planification implantaire virtuelle, chirurgie assistée par ordinateur, guides chirurgicaux, navigation chirurgicale, couplage CBCT/empreinte optique, chirurgies sans lambeaux, réalisation prothétique pré-implantaire, outil de communication numérique.

INTITULÉ 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 : Docteur CHABRERON Olivier